

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM MINISTÉRIO DA
ESPLANADA EM BRASÍLIA:
PROPOSTAS PARA *RETROFIT* DE ENVOLTÓRIA**

ANA MARIA ABRAHÃO NICOLETTI

Brasília
2009

ANA MARIA ABRAHÃO NICOLETTI

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM MINISTÉRIO DA
ESPLANADA EM BRASÍLIA:
PROPOSTAS PARA *RETROFIT* DE ENVOLTÓRIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora:
Profa. Dra. Cláudia Naves David Amorim

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de
Brasília
Número de acervo 977337

N643e Nicoletti, Ana Maria Abrahão
Eficiência energética em um Ministério da Esplanada
em Brasília : propostas para retrofit de envoltória
/ Ana Maria Abrahão Nicoletti.-- 2009.
xxi, 214 f. : il. ; 30 cm

Orientação: Cláudia Naves David Amorim

Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília,
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de
Pesquisa e Pós-Graduação, 2009
Inclui bibliografia

1. Energia - Consumo. 2. Arquitetura e conservação
de energia. 3. Edifícios - Brasília (DF). I. Amorim,
Cláudia Naves David. II. Título.

CDU 621.311

Ana Maria Abrahão Nicoletti

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM MINISTÉRIO DA ESPLANADA EM
BRASÍLIA:
PROPOSTAS PARA *RETROFIT* DE ENVOLTÓRIA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em
Arquitetura e Urbanismo pelo Programa de Pós-Graduação da Faculdade de
Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, UnB

Profa. Cláudia Naves David Amorim, Dra. (orientadora)
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, UnB

Profa. Rosa Maria Sposto, Dra.
Faculdade de Engenharia Civil, UnB

Prof. João Manoel D. Pimenta, Dr.
Faculdade de Engenharia Mecânica, UnB

“Porque o SENHOR dá a sabedoria;
da sua boca é que vem o conhecimento e
o entendimento”.

“Ele reserva a verdadeira sabedoria
para os retos”.

PROVÉRBIOS 2:6-7

Agradecimentos

À Deus por me abençoar com mais esta oportunidade, auxiliando em todos os momentos, concedendo-me saúde, tranquilidade, determinação, perseverança e clareza de entendimento em todos os momentos desta caminhada;

À minha família, Fernando e os filhos Bruno e João Pedro, pelo apoio, compreensão pelo período que estive ausente e confiança em minha capacidade;

Aos meus pais, por tudo o que me ensinaram durante a vida contribuindo para a minha formação;

À Profa. Cláudia Amorim, por todos os anos de competente orientação, dedicação e pelos seus valiosos ensinamentos;

Aos membros da banca, por aceitarem avaliar o trabalho e pelas valiosas sugestões;

Aos Profs. Rosana e Paulo Marcos, pela atenção, apoio e troca de conhecimento;

Aos estagiários do LACAM, Clara, Giselle e Daniel que me atenderam com tanta disposição, contribuindo para que este trabalho fosse mais completo;

Ao Eng. Roberto Queiroga, pela ajuda nos orçamentos das propostas;

Aos amigos do mestrado, Beatriz, Darja, Thaís, Alessandra, Daniel, Renata, Grego, Júlia, Milena e Caio, com os quais compartilhei as angústias e glórias de cada etapa;

À Ketlin, por ter sido uma chefe camarada na etapa final deste trabalho.

Sumário

Lista de figuras.....	xi
Lista de tabelas.....	xvi
Lista de abreviaturas e siglas.....	xviii
Resumo.....	xx
Abstract	xxi
Introdução.....	1
Objetivos.....	5
Organização do trabalho.....	6

PARTE I - Fundamentação teórica e metodológica

Capítulo 1 - Eficiência energética em edificações

1.1. Eficiência energética em edificações: conceituação.....	9
1.2. Eficiência energética em edificações: contexto internacional.....	11
1.3. Eficiência energética em edificações: contexto brasileiro.....	12
1.3.1. Legislação Brasileira sobre o uso e conservação racional de energia em edificações.....	14
1.3.1.1. Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética dos Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C.....	15
1.3.1.1.1. Metodologia Prescritiva.....	17
1.3.1.1.2. Metodologia da Simulação.....	18

Capítulo 2 - Conforto térmico e eficiência energética em edifícios de escritórios

2.1. Conforto térmico	21
2.1.1. Estratégias de conforto para edifícios de escritórios em Brasília.....	24
2.2. <i>Retrofit</i> energético como ferramenta para reabilitação de edificações.....	26
2.3. Edifícios de escritórios no Brasil: possibilidades em retrofit da envoltória.....	30
2.3.1. Estratégias e critérios para elaboração de projetos de retrofit de envoltória visando a eficiência energética.....	34

2.4.	Variáveis da envoltória e suas influências no desempenho térmico e eficiência energética.....	35
2.4.1.	Fechamentos opacos.....	36
2.4.1.1.	Percentual de abertura na fachada (PAF)	38
2.4.1.2.	Transmitância térmica.....	39
2.4.1.2.1.	Painel Wall.....	40
2.4.1.3.	Isolamento térmico	42
2.4.1.3.1.	Painel EPS TI.....	45
2.4.1.4.	Absortância solar.....	47
2.4.2.	Fechamentos transparentes.....	48
2.4.2.1.	Vidros.....	50
2.4.2.1.1.	Vidro plano (float).....	52
2.4.2.1.2.	Vidro e películas refletivos.....	53
2.4.2.1.3.	Vidro duplos ou insulados.....	57
2.4.2.1.4.	Vidro laminado.....	59

Capítulo 3 - Simulação computacional e análise de viabilidade financeira de retrofits energéticos

3.1.	Simulação do desempenho termo-energético de edificações.....	61
3.1.1.	O programa Energyplus.....	62
3.1.1.1.	Arquivos climáticos.....	64
3.1.1.1.1.	O arquivo IWEC para Brasília	65
3.1.1.2.	Método de cálculo do programa Energyplus.....	66
3.1.2.	Programa DesignBuilder - A interface gráfica utilizada.....	68
3.1.3.	Calibração do modelo.....	70
3.2.	Análise da viabilidade financeira de retrofits energéticos.....	72

Capítulo 4 - Arquitetura moderna, preservação e tombamento em Brasília

4.1.	Preservação da arquitetura moderna - o caso do Plano Piloto de Brasília.....	76
4.2.	Preservação de bens culturais.....	78
4.3.	A Esplanada dos Ministérios.....	80
4.3.1.	Estudo de caso : um Ministério da Esplanada.....	81

Parte II - Estudo de caso: um Ministério da Esplanada

Capítulo 5 - Metodologia

5.1.	Caracterização da edificação.....	85
5.1.1.	Obtenção dos dados técnicos do edifício.....	88
5.1.1.1.	Caracterização da envoltória e espaços internos.....	88
5.2.	Cálculo da eficiência da envoltória – Metodologia Prescritiva.....	93
5.2.1.	Cálculo do indicador de consumo da envoltória.....	94
5.2.2.	Cálculo do IC _{máx} De IC _{mín} da envoltória e dos limites dos intervalos.....	96
5.3.	Cálculo da eficiência da envoltória - Metodologia da Simulação.....	101
5.3.1.	Construção do modelo virtual.....	102
5.3.1.1.	Entrada de dados no programa DesignBuilder.....	102
5.3.1.1.1.	Configuração do sítio.....	103
5.3.1.1.2.	Construção geométrica do modelo – 1º Fase.....	104
5.3.1.1.3.	Definição dos materiais construtivos e das aberturas.....	106
5.3.1.1.4.	Definição das cargas térmicas.....	110
5.3.1.1.5.	Construção geométrica do modelo - 2º Fase.....	116
5.3.1.1.6.	Configuração do modelo.....	119
5.3.2.	Calibração do modelo.....	121
5.3.3.	Criação dos modelos de referência.....	126
5.3.3.1.	Simulação dos modelos de referência.....	127
5.3.4.	Propostas de <i>retrofit</i> para a envoltória	129
5.3.4.1.	Alternativas para propostas de <i>retrofit</i> da envoltória.....	130
5.3.4.2.	Caracterização dos modelos propostos.....	132
5.4.	Viabilidade financeira das propostas de <i>retrofit</i>	143

Capítulo 6 - Resultados e Discussão

6.1.	Classificação e etiquetagem do edifício.....	147
6.2.	Classificação e etiquetagem das propostas de retrofit.....	148
6.3.	Análise econômica das alternativas de retrofit.....	162

Capítulo 7 - Conclusões

7.1.	Considerações finais.....	168
7.2.	Recomendações para trabalhos futuros.....	171

Referências Bibliográficas	172
Anexos	
Anexo I - Itens observados nas visitas ao edifício analisado.....	181
Anexo II - Projetos de arquitetura.....	182
Anexo III - Resultados das simulações computacionais gerados pelo programa Designbuilder para o modelo calibrado e modelos propostos.....	184

Lista de figuras

Parte I- Fundamentação teórica e metodológica

Figura 1.1. - Consumo Final de Energia Elétrica no Brasil.....	13
Figura 1.2.(a) - Modelo da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) para edificações.....	17
Figura 1.2.(b) - Selo Procel de economia de energia.....	17
Figura 2.1. - Valores médios das temperaturas de bulbo seco (TBS) e da umidade relativa (UR) para Brasília.....	25
Figura 2.2. - Esquema da seção longitudinal de fachadas - cortinas por várias camadas.....	32
Figura 2.3 - Composição do painel Wall.....	40
Figura 2.4.(a) - Fechamentos externos em Painéis Wall Systems.....	41
Figura 2.4.(b) - Edificações em painéis Wall Systems	41
Figura 2.5.(a) - Fixação de paredes em painéis Wall Systems.....	42
Figura 2.5.(b) - Corte vertical da fixação de paredes em painel Wall.....	42
Figura 2.6. - Painel em EPS TI com 70mm.....	46
Figura 2.7. - Esquema utilizado para explicar o comportamento da energia solar incidente sobre uma superfície transparente.....	50
Figura 2.8. - Transmissão da radiação solar nas regiões do ultravioleta visível e infravermelho para alguns tipos de vidro	52
Figura 2.9. - Reflexão nos vidros incolor, refletivos e películas.....	55
Figura 2.10. - Camadas de vidro laminado com PVB incolor.....	59
Figura 3.1. - Dados climáticos de Brasília apresentado pelo IWEC.....	65
Figura 3.2. - Esquema geral do Energyplus.....	69
Figura 4.1 - Delimitação da área tombada do conjunto urbanístico de Brasília.....	77
Figura 4.2 - Esplanada dos Ministérios em Brasília, vista do Congresso	82
Figura 4.3. - Edifícios dos Ministérios, fachada leste.....	82
Figura 4.4. - Edifícios dos Ministérios, fachada oeste.....	82

Parte II - Estudo de caso: um Ministério da Esplanada

Figura 5.1. - Imagem de satélite da Esplanada dos Ministérios, com a localização e orientação dos edifícios.....	85
Figura 5.2. – Edifício dos Ministérios, fachada leste.....	86
Figura 5.3. - Edifício dos Ministérios, fachada oeste.....	86
Figura 5.4. - Orientação predominante dos edifícios dos Ministérios.....	87
Figura 5.5. - Planta baixa de um pavimento tipo.....	89
Figura 5.6. - Modelo de esquadria modular dos pavimentos tipos.....	89
Figura 5.7.(a) - Fotografia do brise-soleil da fachada oeste.....	90
Figura 5.7.(b) - Angulação do brise-soleil da fachada oeste.....	90
Figura 5.8. - Planta baixa do brise-soleil existente.....	90
Figura 5.9. - Corte AA do pavimento tipo (1º ao 8º pavimentos).....	92
Figura 5.10.(a) - Fotografia da cobertura do edifício.....	92
Figura 5.10.(b)- Detalhe das placas sobrepostas.....	92
Figura 5.11 - Ângulo vertical de sombreamento das barras de sustentação dos brises verticais.....	95
Figura 5.12. - Ângulo horizontal de sombreamento dos brises verticais.....	96
Figura 5.13. - Barra de variáveis da localização do sítio.....	104
Figura 5.14 - Opções de desenho do programa.....	105
Figura 5.15. - Edição de zonas.....	105
Figura 5.16. - Seleção de uma partição interna.....	106
Figura 5.17.(a) - Biblioteca de componentes e materiais construtivos acessados pela aba Construction.....	107
Figura 5.17.(b) - Modo de edição de Construction - aba Layers.....	107
Figura 5.18.(a) - Modo de edição de Construction - aba Image.....	108
Figura 5.18.(b) - Modo de edição de Construction - aba Calculation.....	108
Figura 5.19. - Camadas dos materiais construtivos empregados nas paredes visualizados pelo programa	109
Figura 5.20.(a) - Camadas dos materiais construtivos da laje de cobertura visualizados pelo programa.....	109
Figura 5.20.(b) - Camadas dos materiais construtivos da laje de piso visualizados pelo programa.....	109
Figura 5.21. - Modo de edição: aba opening.....	110

Figura 5.22(a). -Modelo representativo de ambientes de trabalho da zona térmica da fachada leste	111
Figura 5.22.(b) - Modelo representativo de ambientes de trabalho da zona térmica da fachada oeste.....	111
Figura 5.23.(a) - Sistema de iluminação artificial de escritório padrão e forro em placas de aço pintado.....	112
Figura 5.23.(b) - Sistema de iluminação artificial de escritório atípico e forro em lambris de aço pintado.....	112
Figura 5.24.(a) - Rotinas de ocupação e uso de computadores, iluminação e HVAC utilizadas no estudo.....	114
Figura 5.24.(b) - Rotinas de uso de equipamentos de escritório utilizadas no estudo.....	114
Figura 5.25. - Modo de edição de rotinas (schedules) do programa Designbuilder.....	114
Figura 5.26. - Opções de desenho do programa.....	117
Figura 5.27. - Brise modelado para a fachada oeste conforme a situação existente.....	117
Figura 5.28. - Vista em perspectiva da fachada leste.....	118
Figura 5.29. - Vista em perspectiva da fachada oeste.....	118
Figura 5.30. - Opção de dados da aba <i>Data</i>	120
Figura 5.31. - Perfil dos ganhos de internos – 2ª etapa da calibração.....	122
Figura 5.32. - Comparação entre o consumo de edifício real e do modelo calibrado.....	125
Figura 5.33. - Propriedades do vidro especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto I calculado pelo programa.....	133
Figura 5.34. - Camadas dos materiais construtivos empregados na cobertura do Modelo Proposto II, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder.....	133
Figura 5.35. - Propriedades físicas resultantes do novo componente construtivo (cobertura) especificado para o Modelo Proposto II.....	134
Figura 5.36.(a) - Camadas dos materiais construtivos empregados nas paredes das fachadas leste e oeste do Modelo Proposto III, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder.....	135
Figura 5.36.(b). - Propriedades físicas resultantes do novo componente construtivo (vedações externas) especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto III.....	135
Figura 5.37.(a) - Camadas dos materiais construtivos empregados nas paredes das fachadas leste e oeste do Modelo Proposto IV, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder.....	135
Figura 5.37.(b) - Propriedades físicas resultantes do novo componente construtivo (vedações externas) especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto IV.....	135

Figura 5.38.(a) - Camadas dos materiais construtivos empregados nas paredes das fachadas leste e oeste do Modelo Proposto V, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder.....	136
Figura 5.38.(b) - Propriedades físicas resultantes do novo componente construtivo (vedações externas) especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto V	136
Figura 5.39.(a) - Camadas dos materiais construtivos empregados nas paredes das fachadas leste e oeste do Modelo Proposto VI, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder.....	137
Figura 5.39.(b) – Propriedades físicas resultantes do vidro especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto VI.....	137
Figura 5.40.(a). - Camadas dos materiais construtivos empregados na cobertura do Modelo Proposto VII, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder.....	137
Figura 5.40.(b) - Propriedades físicas resultantes do novo componente construtivo (cobertura) especificado para o Modelo Proposto VII.....	137
Figura 5.41.(a) - Camadas dos materiais construtivos empregados nas paredes das fachadas leste e oeste do Modelo Proposto VIII, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder.....	138
Figura 5.41.(b) - Propriedades físicas resultantes do novo componente construtivo (vedações externas) especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto VIII.....	138
Figura 5.42. - Propriedades físicas resultantes do vidro especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto IX.....	139
Figura 5.43.(a) - Propriedades físicas resultantes do vidro com película especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto X.....	139
Figura 5.43.(b) - Propriedades físicas resultantes do vidro/ película de controle solar.....	139
Figura 5.44.(a) - Corte esquemático mostrando a fachada dupla.....	140
Figura 5.44.(b) - Propriedades físicas do conjunto vidro/película de controle solar + câmara de ar + vidro Reflect Float, incolor (marca Cebrace) exibidos pelo programa DesignBuilder.....	140
Figura 5.45. - Vista interna da parede modelada no Modelo Proposto XI, com modulação similar à esquadria existente.....	141
Figura 5.46. - Planta baixa esquemática das esquadrias das fachadas leste e oeste, sendo visualizado da parede interna a ser instalada.....	141
Figura 5.47. - Propriedades físicas do conjunto vidro/película de controle solar + câmara de ar + vidro laminado Cool Lite prata (marca Cebrace), exibidos pelo programa DesignBuilder.....	142
Figura 5.48.(a) - Propriedades térmicas resultantes do novo componente construtivo (parede) especificado para o Modelo Proposto XIV.....	142

Figura 5.48.(b) - Camadas dos materiais construtivos empregados nas paredes das fachadas leste e oeste, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder.....	142
Figura 5.49.(a) - Propriedades físicas resultantes do novo componente construtivo (vedações externas) especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto XV.....	143
Figura 5.49.(b) - Camadas dos materiais construtivos empregados nas paredes das fachadas leste e oeste, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder.....	143
Figura 6.1 - Consumos de energia elétrica anual (Modelo proposto etiqueta D x Modelo real)	150
Figura 6.2. - Gráfico do PMV (voto médio predito) das propostas etiqueta D.....	150
Figura 6.3. - Variação anual da temperatura operativa e da umidade relativa das propostas etiqueta D.....	151
Figura 6.4. - Redução de ganhos de calor por insolação dos modelos propostos com etiqueta D em relação ao modelo real calibrado.....	152
Figura 6.5. - Comparação dos consumos de energia elétrica anual (Modelo proposto etiqueta C x Modelo real)	153
Figura 6.6. - Gráfico do PMV (voto médio predito) das propostas etiqueta C.....	154
Figura 6.7. - Variação anual da temperatura operativa e da umidade relativa das propostas etiqueta C.....	154
Figura 6.8 - Redução de ganhos de calor por insolação dos modelos propostos com etiqueta C em relação ao modelo real calibrado.....	155
Figura 6.9. - Comparação dos consumos de energia elétrica anual (Modelo proposto etiqueta B x Modelo real)	156
Figura 6.10. - Gráfico do PMV (voto médio predito) das propostas etiqueta B.....	157
Figura 6.11. - Variação anual da temperatura operativa e da umidade relativa das propostas etiqueta B.....	158
Figura 6.12. - Redução de ganhos de calor por insolação dos modelos propostos com etiqueta B em relação ao modelo real calibrado.....	159
Figura 6.13. - Comparação dos consumos de energia elétrica anual (Modelo proposto etiqueta A x Modelo real)	160
Figura 6.14. - Gráfico do PMV (voto médio predito) das propostas etiqueta A.....	160
Figura 6.15. - Variação anual da temperatura operativa e da umidade relativa das propostas etiqueta A.....	161
Figura 6.16 - Redução do ganho de calor por insolação do modelo proposto com etiqueta A em relação ao modelo real calibrado.....	161

Lista de tabelas

Parte I - Fundamentação teórica e metodológica

Tabela 1.1. - Equivalente numérico para cada nível de eficiência.....	17
Tabela 2.1. -.Escala térmica de Fanger.....	23
Tabela 2.2. -.Características e dimensões de painéis Wall.....	42
Tabela 2.3. -.Condutividade térmica de alguns materiais de construção.....	44
Tabela 2.4. -.Dimensões e propriedades térmicas de painéis em EPS TI.....	48
Tabela 2.5. -.Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas)	50
Tabela 2.6. -.Propriedades térmicas do vidro Reflect Float , com 6mm (CEBRACE).....	56
Tabela 2.7. -.Propriedades térmicas do conjunto : película refletiva prata e vidro incolor, 6mm.....	57
Tabela 2.8. - Propriedades térmicas do componente testado: vidro 6mm, incolor e película refletiva prata.....	59
Tabela 2.9. -. Propriedades térmicas do conjunto vidro Reflect Float, com 6mm (CEBRACE) + câmara de ar, com 5cm + vidro incolor, com 6mm, com película prata refletiva.....	60
Tabela 2.10 – Propriedades térmicas do conjunto: vidro laminado Cool lite, com 10mm + câmara de ar, com 5cm + vidro incolor, com 6mm, com película prata refletiva.....	60
Tabela 2.11. - Propriedades térmicas e ópticas do vidro laminado Cool Lite Prata.....	62
Tabela 3.1. – Vida útil de componentes construtivos testados nas popostas de <i>retrofit</i>	77

Parte II - Estudo de caso: um Ministério da Esplanada

Tabela 5.1. - Radiação solar recebida nas fachadas do edifício nas orientações predominantes.....	90
Tabela 5.2. - Áreas de fachadas e aberturas do edifício analisado.....	96
Tabela 5.3. - Fator de forma máximo e mínimo por zona bioclimática	97
Tabela 5.4. - Características do vidro com película de controle solar.....	99
Tabela 5.5. - Parâmetros do IC _{máxD}	100
Tabela 5.6. – Cálculo do Índice de Consumo Máximo (IC _{máxD})	100
Tabela 5.7. - Parâmetros do IC _{mín}	101
Tabela 5.8. - Cálculo do Índice de Consumo Mínimo (IC _{mín})	101
Tabela 5.9. - Índices de Consumo Máximo e Mínimo – IC _{máxD} e IC _{mín}	101

Tabela 5.10. - Limites dos intervalos dos níveis de eficiência	102
Tabela 5.11. - Limites dos intervalos dos níveis de eficiência do projeto.....	102
Tabela 5.12. - Propriedades termofísicas dos materiais construtivos que constituem a envoltória.....	103
Tabela 5.13. - Relação dos equipamentos da sala padrão de 2 módulos.....	116
Tabela 5.14. - Dados técnicos dos aparelhos Minisplit Styllus (Trane) e consumo por área....	119
Tabela 5.15. – Valores de “schedules” para operação de climatização (ar condicionado).....	119
Tabela 5.16. - Consumo de energia elétrica mensal fornecido pelas faturas das contas de energia elétrica (2008)	125
Tabela 5.17. - Comparação entre o consumo do edifício real e do modelo calibrado.....	128
Tabela 5.18. - Consumo estimado para o modelo calibrado considerando o 2º subsolo.....	128
Tabela 5.19. - Comparação entre o consumo do edifício real e do modelo calibrado.....	129
Tabela 5.20. – Valor dos PAFts para os modelos de referência.....	131
Tabela 5.21. - Comparação dos valores de consumo (KWh) e de temperatura operativa entre o modelo calibrado e o modelo de referência A.	133
Tabela 5.22. - Comparação dos valores de consumo (KWh) entre o modelo real e os modelos de referência.....	132
Tabela 5.23. - Valores adotados para as variáveis nas simulações dos modelos propostos....	135
Tabela 5.24 – Alternativas de simulações a serem realizadas - Modelos Propostos.....	136
Tabela 6.1. - Comparação dos resultados de consumo de energia elétrica (KWh) entre o modelo real e o modelo calibrado.....	150
Tabela 6.2. - Resultados de consumo de energia elétrica mensal e anual dos modelos propostos que obtiveram a etiqueta D.....	152
Tabela 6.3. - Resultados de consumo de energia elétrica mensal e anual dos modelos propostos que obtiveram a etiqueta C.....	155
Tabela 6.4. - Resultados de consumo de energia elétrica mensal e anual dos modelos propostos que obtiveram a etiqueta B.....	159
Tabela 6.5. - Resultados de consumo de energia elétrica mensal e anual dos modelos propostos que obtiveram a etiqueta A.....	162
Tabela 6.6. - Tabela demonstrativa dos investimentos a serem realizados pelas propostas de <i>retrofit</i>	165
Tabela 6.7. – Comparação dos resultados de consumo anual (KWh) e custo total de energia evitada das propostas de <i>retrofit</i>	166
Tabela 6.8 – Valores dos índices RCB (Relação custo - benefício) das propostas de <i>retrofit</i> ...	166

Lista de abreviaturas e siglas

Acob	Área da cobertura	m ²
ACR	Ano Climático de Referência	-
Aenv	Área do envoltório	m ²
AHS	Ângulo Horizontal de Sombreamento	%
Aproj	Área de projeção da edificação	m ²
Atot	Área total de piso	m ²
AVS	Ângulo Vertical de Sombreamento	%
COP	Coefficiente de performance	-
CTF	Conduction Transfer Functions	-
DC	Densidade de Carga Interna	C/m ³
DPI	Densidade de Potência de Iluminação	W/m ²
FA	Fator altura – Acob/Atot	-
FF	Fator de forma – Aenv/V	-
FS	Fator Solar	-
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning	-
IC	Indicador de Consumo	-
MCE	Medida de Conservação de Energia	-
PAF	Percentual de abertura na fachada	%
PMV	Predicted Mean Vote (VMP – voto médio estimado)	-
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied	%
TFM	Transfer Function Method	-
TIR	Taxa Interna de Retorno	%
TRY	Test Reference Year	-
Ucob	Transmitância Térmica da cobertura	W/(m ² .K)

Entidades e Programas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BEN	Balanco Energético Nacional
CBECS	Commercial Building Energy Consumption Survey
DOE	Department of Energy – USA
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
ISO	International Organization for Standardization
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina
MME	Ministério de Minas e Energia, Brasil
NBR	Norma Brasileira
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
RTQ	Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética dos Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos.

Resumo

Esta dissertação apresenta uma análise da viabilidade técnica e financeira da proposição de *retrofit* de envoltória, em tipologias representativas de edifícios públicos de escritórios, para otimizar o seu desempenho térmico e energético. O trabalho foi desenvolvido por meio da avaliação de componentes construtivos industrializados disponíveis no mercado nacional que se apresentaram potencialmente viáveis para aplicação no objeto de estudo, um dos edifícios dos Ministérios, em Brasília. Neste caso, as propostas mantêm as características essenciais da envoltória, devido à necessidade de preservação do edifício pelo seu caráter representativo e também pelas restrições advindas com a necessidade de preservação de sua arquitetura. A metodologia utilizada é a proposta pelo Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos -RTQ -C (INMETRO, 2009), a partir da classificação e etiquetagem da envoltória do edifício, objeto de estudo, comparando os resultados da metodologia prescritiva e da simulação, a fim de investigar o potencial de melhoria da eficiência energética, a partir dos critérios de classificação propostos pela regulamentação. Para subsidiar estas iniciativas com o estudo de viabilidade financeira foi utilizado o indicador RCB (Relação Custo-Benefício) para a avaliação comparativa de custos relacionados à eficiência da envoltória visando a delimitação da melhor solução em eficiência energética. O resultado deste trabalho apresenta uma comparação de alternativas para melhoria da eficiência energética da envoltória em tipologias de edifícios de escritórios existentes. A análise de sensibilidade dos parâmetros da equação do Índice de Consumo da envoltória (metodologia prescritiva/ RTQ-C) e da calibração do modelo (metodologia da simulação/ RTQ-C) apontam que variações no percentual de abertura das fachadas (PAFt) e no fator solar (FS) dos vidros provocam alterações consideráveis nos resultados, sendo que a redução destes valores repercute em melhores níveis de eficiência energética. Os resultados indicam como possibilidade para a reabilitação do edifício analisado o uso de painéis EPS TI acoplados internamente às fachadas, reduzindo o PAFt, o uso de película de controle solar, reduzindo o fator solar (FS) dos vidros e o isolamento térmico da cobertura.

Abstract

This dissertation presents an analysis of technical and financial feasibility of the proposition retrofit envelope in representative types of public buildings for offices, to optimize its performance and thermal energy. The study was conducted through the evaluation of industrialized building components available on the domestic market that had potentially useful for application in the object of study, one of the buildings of the Ministries, in Brasilia. In this case, the proposals keep the essential characteristics of the envelope because of the need to preserve the building by its representative character, and also by restrictions arising with the need for preservation of its architecture. The methodology used is that proposed by the Technical Regulation for Energy Efficiency for Commercial Buildings, and Public Service-RTQ-C (INMETRO, 2009), based on the classification and labeling of the envelope of the building, object of study, comparing the results of the prescriptive methodology and simulation to investigate the potential for improving energy efficiency, from the classification criteria proposed by the regulations. To complement these initiatives with the financial feasibility study was provided using the RCB (Cost-Benefit) for the comparative assessment of costs related to the efficiency of the envelope to delineate the ultimate in energy efficiency. The result of this work presents a comparison of alternatives for improving the efficiency of the envelope in types of existing office buildings. The sensitivity analysis of parameters of the Index of Consumer envelope (prescriptive methodology / RTQ-C) and calibration of the model (methodology of simulation / RTQ-C) indicate that variations in the percentage of openness of the facades (TFAP) and the solar factor (FS) of glasses cause significant changes in the results, and the reduction of these values reflected in improved levels of efficiency. The results indicate a possibility for rehabilitation of the building analyzed the use of EPS panels IT internally coupled to the facades, reducing the TFAP, the use of solar control film, reducing the solar factor (SF) of glass and thermal insulation of the roof.

Introdução

Frente à crise energética mundial, é preciso repensar a arquitetura e incluir as considerações energéticas e ambientais em nossa sistemática de projeto. Ademais, temos a busca pela racionalização da construção civil, através da integração dos procedimentos da qualidade, da segurança e saúde e das questões ambientais, implicando num maior controle de todas as etapas nos processos da construção, da manutenção e nas alterações pós-ocupação.

As edificações mais antigas são confrontadas aos novos padrões de qualidade, uma vez que foram concebidas e projetadas segundo o seu período na história, levando-nos a concluir que as mesmas devem, na medida do possível, passar por um processo de atualização, tornando-as compatíveis com o desempenho exigido atualmente. Cabe ao arquiteto a função de projetar e gerenciar, levando em conta os conceitos de sustentabilidade, segurança (física e social) e manutenção nas possíveis alterações pós-ocupação.

Segundo Mascaró (2006), a partir da arquitetura moderna houve uma maior homogeneização das formas dos edifícios e maior utilização de elementos transparentes e leves nas fachadas. A tipologia construtiva adotada possui área de janelas excedente em relação à fachada, na maioria das vezes, sem utilização de dispositivos de proteção e controle solar, influenciando no aumento da temperatura interna dos ambientes e conseqüentemente na carga térmica a ser retirada pelo sistema de condicionamento de ar (LIMA, 2007).

Com relação ao consumo de energia elétrica pelas edificações no Brasil, estas são responsáveis por 44,5% do total produzido (BEN, 2007), sendo que a maioria desperdiça considerável parcela de energia para obtenção de conforto ambiental devido à não incorporação em seus projetos dos importantes avanços ocorridos nas áreas da arquitetura bioclimática, materiais e tecnologias construtivas (LAMBERTS, 2004).

Os edifícios de escritórios, dentro deste panorama, representam o maior percentual de consumo de energia no país pelas edificações representando 22,4% (BEN, 2007). O estudo desta tipologia é portanto necessário, sendo facilitado pelo fato de existir uma uniformidade tipológica observada em pesquisas nas principais capitais, cujas características mais comuns encontradas formaram modelos representativos (GOULART et al., 1997).

Como as atividades comerciais tendem possuir certa uniformidade quanto às cargas internas e ocupação, a avaliação comparativa de edificações comerciais ou institucionais de mesma atividade é comum em diversos países.

Edifícios de escritórios requerem qualidade dos ambientes de trabalho, como condições especiais de conforto lumínico, térmico e acústico, que dependem da utilização de sistemas elétricos e mecânicos. Este fato repercute na eficiência energética, se não forem considerados na fase de projeto e em *retrofits*¹, a adequação da envoltória aos fatores externos (radiação solar, ventos, interferência de edificações, entorno e orientação). Essa adequação se dará pela interface entre os fatores externos e a arquitetura. A adaptação ao clima e ao ambiente local envolve o uso de materiais adequados e técnicas construtivas que resultem em construções com espaços internos ambientalmente confortáveis.

A envoltória² tem grande influência no desempenho ambiental e energético dos edifícios. Funciona como proteção e limite interno/externo e é condicionante do conforto térmico, acústico e lumínico. Atua significativamente na possibilidade de ventilação natural e de visão para o exterior e sua função estética é determinante na qualidade dos projetos arquitetônicos. Além disso, Klein et al. (2004) apontam que parte dos problemas de patologia dos edifícios, que comprometem seu desempenho, podem ser provenientes de falhas na envoltória.

O consumo de energia em edificações está relacionado aos ganhos e perdas de calor pela envoltória, que associados à carga interna gerada pela ocupação, pelo uso de equipamentos e pela iluminação artificial, resultam no consumo dos sistemas de condicionamento de ar, além do consumo dos próprios sistemas de iluminação e equipamentos (CARLO, 2008).

Diversas normas³ foram elaboradas em alguns países, como EUA, Portugal, Austrália e México, considerando o impacto nos custos de construção de edificações perante a alteração do padrão construtivo. Estes impactos podem ser avaliados através do benefício que estas medidas construtivas mais eficientes do ponto de vista energético, proporcionam ao reduzir o custo da energia consumida.

¹ A Norma de Desempenho Brasileira (NBR 2008:11) define *retrofit* como remodelação ou atualização do edifício ou de sistemas, pela incorporação de novas tecnologias e conceitos, o qual, normalmente visa a valorização do imóvel, mudança de uso, aumento da vida útil e melhoria da eficiência operacional e energética.

² Segundo o PROCEL (2008:11), envoltória são os “planos externos da edificação, compostos por fachadas, empenas, cobertura, brises, marquises e aberturas, assim como quaisquer elementos que os compõem”.

³ Diversos países lançaram programas de incentivo à redução do consumo de energia, resultando posteriormente na criação de normas de eficiência energética, como a Standard 90 – Energy Conservation in New Building Design e a norma californiana Title 24 de 1978, no EUA, a norma mexicana para edifícios não-residenciais NOM 008, de 2001, as normas técnicas de desempenho térmico e de eficiência energética de edificações (RCCTE e RSECE), em Portugal e o Building Code of Austrália, na Austrália (CARLO, 2008).

No Brasil, a primeira lei referente à eficiência energética surgiu após o racionamento de energia de 2001: a Lei n.º 10.295 dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, regulamentada pelo Decreto n.º 4.059 (BRASIL, 2001a). Estabeleceu-se que deveriam ser criados parâmetros referenciais para a eficiência energética em edificações, com “indicadores técnicos e regulamentação específica” para estabelecer a obrigatoriedade dos níveis de eficiência no país.

Desta maneira, para atender a esta exigência, o Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas – RTQ-C foi elaborado pelo LabEEE, da Universidade Federal de Santa Catarina, através de convênio com o Procel Edifica/Eletronbras (2004), sendo recentemente aprovado pelo INMETRO pela Portaria MDIC nº 163 de 08/06/2009.

Este regulamento especifica requisitos técnicos, bem como os métodos para classificação de edifícios comerciais, de serviços e públicos quanto à eficiência energética. É de caráter voluntário para edificações novas e existentes e passará a ter caráter obrigatório para edificações novas em prazo a definir. A concessão da Etiqueta de Eficiência Energética será realizada nas diferentes fases do edifício: projeto de nova edificação e edificação existente, através da determinação da eficiência da envoltória, do sistema de iluminação e do sistema de condicionamento de ar .

Com relação à envoltória, as inovações tecnológicas de materiais e componentes construtivos permitem, com mais segurança, a proposição de *retrofits* em edificações, de modo a atualizá-las, garantindo condições mais favoráveis de conforto, menor dependência dos sistemas mecânicos de condicionamento de ar, maior eficiência energética e preservação da arquitetura original.

A crescente busca do conforto ambiental associado à eficiência energética impõe o desafio de preservar e reabilitar, criteriosamente, os edifícios de Brasília, cidade que apresenta os fundamentos da arquitetura moderna (GRILLO, 2005). Além disso, de acordo com o novo Regulamento, os edifícios públicos, em sua maioria de caráter modernista, necessitam de reabilitação para atingir melhores padrões de eficiência energética.

Nesse contexto, este trabalho visa investigar as alternativas de *retrofit* da envoltória de um Ministério da Esplanada, em Brasília, otimizando o seu desempenho térmico e energético, preservando a arquitetura original e o valor cultural do edifício.

Os edifícios dos Ministérios (sede do Poder Executivo) inserem-se no grupo cuja tipologia principal é uma fachada envidraçada e a outra, a oposta, com elementos de proteção

solar, caracterizada como representativa pelo levantamento de tipologias construtivas de edifícios de escritórios na cidade (LIMA, 2007).

Para análise do desempenho da envoltória são utilizadas as metodologias prescritiva e a da simulação, do Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética dos Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C (INMETRO, 2009). A simulação do desempenho termo-energético da envoltória é avaliado através do programa de simulação EnergyPlus e de sua interface gráfica, o programa DesignBuilder, sendo testadas, parametricamente, as variáveis arquitetônicas que se apresentarem potencialmente viáveis para o objeto de estudo, tendo como premissa a busca da qualidade ambiental, a eficiência energética da edificação e o custo de implantação.

O resultado deste trabalho apresenta uma comparação entre alternativas para a melhoria da eficiência da envoltória aplicado em tipologias de edifícios de escritórios existentes, para a zona climática da cidade de Brasília. Investiga-se, também, a viabilidade financeira através da Relação Custo-benefício (RCB) das propostas de *retrofits*, visando melhorias em qualidade ambiental e eficiência energética.

As soluções propostas preservam as características essenciais da envoltória, devido à necessidade de preservação do edifício pelo seu caráter representativo e também pelas restrições advindas com a necessidade de preservação de sua arquitetura, visto a Esplanada dos Ministérios ser tombada provisoriamente, através do processo IPHAN nº 1550-T- 2007.

Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral a investigação de alternativas para o *retrofit* da envoltória de um Ministério da Esplanada (tipologia representativa da cidade de Brasília), considerando a melhoria do desempenho térmico e energético, com foco na preservação das características originais da arquitetura moderna.

Os objetivos específicos são:

1. Analisar variáveis relacionadas à envoltória de edificações e suas consequências na qualidade ambiental e eficiência energética em edificações de escritórios;
2. Apresentar e discutir conceitos relacionados à atualização das edificações de escritórios, segundo as técnicas e processos de *retrofit*, bem como analisar aspectos de preservação e manutenção da arquitetura moderna;
3. Aplicar e comparar as metodologias prescritiva e de simulação do Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética dos Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos - RTQ-C (INMETRO, 2009) em estudo de caso;
4. Analisar os resultados com relação às melhorias do conforto térmico e eficiência energética, através da etiquetagem e simulação computacional das propostas de *retrofit* da envoltória do edifício estudo de caso;
5. Investigar a viabilidade técnica e financeira para a proposição de *retrofits* de envoltória em edifícios de escritórios, visando melhorias em qualidade ambiental e eficiência energética.

Organização do trabalho

Após a Introdução apresentada, o trabalho é estruturado em duas partes principais, quais sejam:

Parte I: Fundamentação teórica e metodológica - Eficiência energética em edificações, sendo apresentadas as metodologias do RTQ-C, *retrofit* energético em edifícios de escritórios. Desempenho térmico e variáveis da envoltória, conforto ambiental, estratégias de conforto térmico para Brasília e preservação da arquitetura moderna. Simulação computacional e viabilidade financeira para *retrofits* energéticos.

Aborda as principais ações em andamento no contexto mundial e brasileiro relacionadas à eficiência energética das edificações e os parâmetros de interesse utilizados na análise do desempenho energético em função do RTQ-C e da reabilitação de edificações. Apresenta a metodologia do RTQ-C, a ser seguida no estudo de caso. Apresenta também, um referencial teórico sobre conforto ambiental e as variáveis que interferem no desempenho térmico de uma edificação. Da mesma maneira, sobre os programas de simulação computacional termo-energética e a metodologia da análise de viabilidade financeira a serem aplicados no trabalho. E por fim, caracteriza os edifícios públicos de Brasília, localizados no eixo monumental, e destaca a importância da sua preservação e reabilitação.

Parte II: Estudo de Caso - Caracterização do objeto de estudo, metodologia prescritiva e de simulação do RTQ-C utilizando o programa DesignBuilder, calibração do modelo, viabilidade financeira das alternativas de *retrofit* da envoltória, resultados e conclusões.

Caracterização do edifício, objeto de estudo, suas cargas internas e sistemas mecânicos. Aplicação da metodologia prescritiva do RTQ-C para avaliação termo-energética da envoltória e posterior aplicação da metodologia da simulação para comparação dos resultados e proposição de alternativas de *retrofit* visando melhorias na classificação e etiquetagem energética da envoltória da edificação, através da utilização do programa de simulação computacional DesignBuider para simulação do modelo real e dos modelos propostos, utilizando também o método de calibração e finalmente, aplicação da metodologia da ANEEL, utilizada pelo RTQ-C, para avaliar o custo-benefício das propostas de *retrofit* da envoltória.

São apresentados os resultados referentes à aplicação da metodologia prescritiva e da simulação do RTQ-C para avaliação da eficiência da envoltória do edifício real, dos modelos de referência e posterior classificação e etiquetagem dos modelos propostos, sendo analisados,

conjuntamente, o conforto térmico e o desempenho térmico de componentes construtivos existentes e dos avaliados parametricamente.

E finalmente são expostas as considerações finais e as recomendações para trabalhos futuros.

Parte I

Fundamentação teórica e metodológica

Capítulo 1. Eficiência energética em edificações

Neste capítulo serão abordados os conceitos e as principais ações referentes à eficiência energética das edificações no contexto mundial e brasileiro e os parâmetros de interesse utilizados na análise do desempenho energético em função do RTQ-C (INMETRO, 2009).

Utilizam-se como referência ao estudo de eficiência energética em edificações, principalmente, os autores: Lamberts et al. (2007), Carlo (2008), Westphal (2005) e Pedrini (2003).

1.1. Eficiência energética em edificações: conceituação

Uma forma de evitar um grande impacto ao meio ambiente mantendo o suprimento de energia é a racionalização do uso da energia através da eficiência energética. É pensamento corrente que eficiência energética ocorre quando há redução na energia consumida para realização de um serviço ou quando há aumento ou melhoria dos serviços para uma mesma quantidade de energia gasta (ABEE, 2008). Este conceito também pode ser usado em edificações.

A eficiência energética é adotada em projetos de edificações a fim de racionalizar o consumo evitando desperdícios sem comprometer os serviços necessários à saúde, segurança, conforto e produtividade do usuário de uma edificação (CARLO, 2008).

A edificação contribui para o consumo através das trocas térmicas entre os ambientes interno e o externo: em climas quentes os ganhos térmicos são maiores e, juntamente com os ganhos internos de ocupação e de equipamentos e da iluminação, produzem uma carga térmica que deve ser compensada pelo sistema de condicionamento de ar (CARLO, 2008).

A eficiência energética em edificações é obtida através de um conjunto de ações que intervenham na envoltória, atuando na fase projetual ou em *retrofits* da edificação, na eficiência dos sistemas de condicionamento de ar e sistemas de iluminação e no uso da edificação. Estas medidas podem ser executadas através de leis, normas e códigos para edificações eficientes

voltadas à prática profissional e pela educação ambiental com o enfoque na conscientização dos profissionais da construção civil e usuários da edificação.

As características da envoltória são, em geral, comuns em todas as análises sobre eficiência energética de edificações, com pequenas variações de um estudo para outro. Signor et al. (2001) elaboraram equações de regressão linear com 8 variáveis intervenientes no consumo de energia, a fim de criar uma ferramenta para a rápida estimativa do consumo de energia elétrica em edificações comerciais para 14 cidades brasileiras. A maior parte das variáveis utilizadas nas equações são relacionadas à envoltória da edificação, e baseiam-se em componentes presentes na construção civil brasileira. As variáveis são:

- Acob/Atotal (razão de área do telhado pela área total);
- Afachada/Atotal (razão da área da fachada pela área total);
- WWR (ou PJF, percentual de janela na fachada);
- FP (fator de projeção de brises horizontais ou estruturas horizontais de sombreamento);
- CS (coeficiente de sombreamento dos vidros);
- Ucob (transmitância térmica da cobertura);
- α_{cob} (absortância do telhado à radiação solar) e
- ILD (densidade de carga interna: iluminação, equipamentos e ocupação).

Carlo (2008) conclui que, a eficiência energética pode ser avaliada comparando edificações com características primárias⁴ semelhantes, pertencentes a um mesmo agrupamento definido pela forma, dimensões da edificação, tipo de condicionamento de ar, cargas internas e padrão de uso, através da comparação dos resultados das combinações das características secundárias, como percentual de área de janela na fachada ou absortância solar, características interdependentes como transmitância térmica e capacidade térmica e aquelas que descrevem fenômenos semelhantes, como coeficiente de sombreamento e fator solar, dentre edificações pertencentes a uma mesma atividade comercial ou institucional.

⁴ Características primárias se referem as características comuns de diferentes edificações pertencentes a um mesmo agrupamento. Os grandes agrupamentos podem ser identificados através da atividade exercida na edificação, principalmente no caso de edificações comerciais e institucionais. Nestas, a edificação destinada a certa atividade costuma seguir uma tipologia e a atividade em si já induz ao uso e ao tipo e quantidade de equipamentos necessários ao seu funcionamento.

1.2. Eficiência energética em edificações: contexto internacional

As primeiras regulamentações do desempenho energético das edificações surgiram na Europa, a partir da França e da Inglaterra, após a primeira grande crise do petróleo, de 1973. O objetivo, então, era melhorar o isolamento térmico das residências, para diminuir o consumo de energia para aquecimento. Alguns anos depois, novas regras passaram a regular também a perda de calor de dentro para fora, as dimensões de aberturas, a eficiência dos equipamentos, etc., tornando as regulamentações de eficiência energética obrigatórias por leis federais.

Diversos países lançaram programas de incentivo à redução do consumo de energia, resultando posteriormente na criação de normas de eficiência energética, como a Standard 90 –Energy Conservation in New Building Design e a norma californiana Title 24 de 1978 (USA) (CARRIÈRES, 2007). A Standard 90.1 (ASHRAE, 1999) utiliza para avaliações de eficiência energética os métodos prescritivo, sistema de permutação (trade off) e o Energy Cost Budget (método de simulação). Assim como a versão de 1989, aborda a envoltória da edificação, sistemas de ar condicionado, iluminação artificial e aquecimento de água, incluindo ainda motores e equipamentos.

Atualmente, Canadá, México, Reino Unido, Portugal, Espanha, Austrália, Nova Zelândia, Singapura, Hong Kong, Filipinas, Chile, entre outros países, possuem algum tipo de norma ou lei em eficiência energética de edificações. Diversos destes países revisaram ou estão em processo de revisão de suas regulamentações a fim de atender ao Protocolo de Quioto, que regula a emissão de gases na atmosfera, como o CO₂, responsável pelo efeito estufa (GOULART & LAMBERTS, 2005).

No Brasil, em 1984, foi estabelecido o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) com a finalidade de conservação de energia, atuando através de etiquetas informativas que fornecem informações sobre o consumo de energia de aparelhos classificando-os em níveis de acordo ao seu consumo que vão da letra “A” (menor consumo, maior eficiência) até a letra “E” (maior consumo, menor eficiência) através de etiquetas informativas. Mais adiante, o racionamento de energia elétrica de 2001, repercutiu em ações mais eficazes do governo federal, sendo publicada a primeira lei brasileira relativa à eficiência energética, inclusive para edificações.

Sobre o resultado da pesquisa internacional em 57 países sobre o conteúdo das normas de desempenho para edificações, JANDA & BUSCH (1994) apud Lamberts (1997)

revelaram “a maioria dos países combinam exigências prescritivas e desempenho no projeto de suas normas. Conservação de energia é o objetivo principal na maioria dos países. Quase todos indicaram que suas normas de energia incorporavam prescrições para a envoltória da construção que influenciavam as escolhas de projeto para a cobertura, paredes e janelas”.

1.3. Eficiência energética em edificações: contexto brasileiro

No Brasil, a geração de energia elétrica baseia-se em fontes renováveis, representadas principalmente pelas usinas hidrelétricas, cujo potencial é estimado em 260 GW com, até o momento, uma capacidade instalada de 97 GW. Apesar da capacidade instalada representar somente 37% do potencial estimado, a maior parte do potencial hidrelétrico economicamente viável já foi utilizado devido aos fatores como o alto custo da construção de novas usinas, ou ampliação das existentes, com o custo ambiental atrelado a isso (CARLO, 2008).

Levantamentos preliminares realizados nos primeiros meses de 2009 permitiram compor uma idéia concisa da Oferta Interna de Energia. Segundo dados do Balanço Energético Nacional - BEN (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2009), nos últimos anos houve um aumento da participação da energia elétrica no consumo final de energia no Brasil, chegando a 13,8% da oferta interna de energia em 2008, o que representa 496,4 TWh/ano.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2005) o consumo final de energia elétrica em 2004 teve um aumento de 3,1 vezes em relação ao de 1970. Em edificações comerciais e públicas, entre 1970 e 2004, houve um crescimento de 700%, como mostra a Figura 1.1.

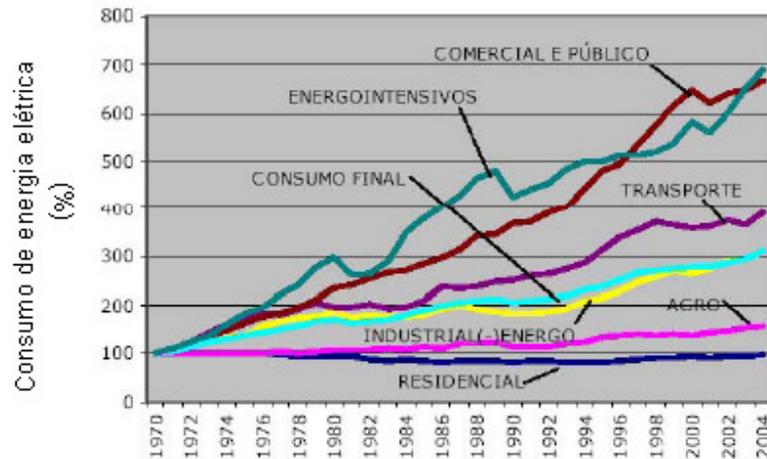


Figura 1.1- Consumo Final de Energia Elétrica no Brasil (MME, 2005).

As edificações têm lugar de destaque no consumo total de energia elétrica. Segundo dados do Balanço Energético Brasileiro – Eletrobrás (2007), as edificações são responsáveis por aproximadamente 44,5% do consumo de energia elétrica do país, sendo que 22,4% desse total correspondem a edificações de escritórios.

Em edifícios comerciais e públicos com sistemas de condicionamento de ar, 64% do consumo de energia elétrica deve-se aos usos finais de iluminação e de condicionamento, chegando a 86% em bancos e escritórios (GELLER, 1991). Levantamentos feitos em edifícios com o mesmo uso, Lamberts (1996) verificou que os principais consumos finais de energia seriam o ar condicionado (35%) e a iluminação artificial (49%). A pesquisa de mercado de edifícios comerciais atendidos por alta tensão identificou um uso final médio de 47% devido ao sistema de condicionamento de ar, 22% de iluminação e 31% pelas demais cargas do edifício (CORREIA, 2007a).

O Brasil apresenta significativa diversidade climática e cada região exige soluções construtivas específicas, ainda insuficientemente estudadas. O desconhecimento sobre essas especificidades vem sendo responsável pela proliferação de edifícios com baixo desempenho térmico e, por consequência, elevado consumo de energia, pois a adoção de soluções idênticas ou semelhantes para todo o país provoca consumo desnecessário de energia elétrica. Estima-se que edifícios com projetos adequados possam consumir em torno de 30% menos energia que outros que ofereçam níveis de conforto e utilização similares (LAMBERTS, 2005).

1.3.1. Legislação Brasileira sobre o uso e conservação racional de energia em edificações

A primeira iniciativa no âmbito de legislações efetivamente instituídas para promover a eficiência energética no país surgiu como consequência da crise de energia de 2001, quando foi sancionada a Lei n.º 10.295, de 17 de outubro de 2001, que “dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia” (BRASIL, 2001a). O artigo 4º desta lei afirma que “o Poder Executivo desenvolverá mecanismos que promovam a eficiência energética nas edificações construídas no País”. Dois meses depois, a regulamentação foi publicada sob forma do Decreto 4.059 de 19 de dezembro de 2001, indicando, no artigo 1º, que “os níveis máximos de consumo de energia, ou mínimos de eficiência energética, (...), bem como as edificações construídas, serão estabelecidos com base em indicadores técnicos e regulamentação específica (...)” (BRASIL, 2001b). No decreto ficou instituído o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética - CGIEE e a criação do Grupo Técnico para Eficientização de Energia no País (GT-MME), vinculado ao CGIEE, com as seguintes competências:

- I - Adoção de procedimentos para avaliação da eficiência energética das edificações;
- II - Proposição de indicadores técnicos referenciais do consumo de energia das edificações para certificação de sua conformidade em relação à eficiência energética;
- III - Proposição de requisitos técnicos para que os projetos de edificações a serem construídas no país atendam os indicadores mencionados no item anterior.

A Lei n.º 10.295 alavancou uma série de iniciativas que visam implementar parâmetros de eficiência energética em edificações. Salvador e Recife são exemplos disso, pois foram as primeiras cidades brasileiras a avaliar e propor parâmetros de eficiência energética em seus Códigos de Obras (CARLO et al., 2003). Além disso, essa lei alavancou o processo de uso da regulamentação específica para estabelecer parâmetros de eficiência para equipamentos consumidores de energia.

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, Procel – Eletrobrás organizou a estrutura necessária para viabilizar as exigências do decreto. O Procel lançou, no ano de 2003, o Procel – Edifica: Plano de Ação para Eficiência Energética em Edificações, estabelecendo 6 vertentes de ação: arquitetura bioclimática, indicadores referenciais para edificações, certificação de materiais e equipamentos, regulamentação e legislação, remoção

de barreiras à conservação da energia e, por fim, educação. Cada vertente apresenta uma série de projetos que visam implementar a eficiência energética na cultura construtiva nacional, desde a fase anterior ao projeto, através da educação e certificação de materiais, até a revisão de leis de eficiência energética para constante atualização tecnológica.

1.3.1.1. Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C.

Visando o estabelecimento de índices mínimos de eficiência energética e parâmetros referenciais para a envoltória de edificações e para o desenvolvimento da base técnica para regulamentação das edificações no país quanto à eficiência energética (referentes a linha de ação dos projetos 1 e 5, da vertente Regulamentação e Legislação), o Procel Edifica/Eletronbras firmou, em 2004, convênio com o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - LabEEE, da Universidade Federal de Santa Catarina. Dentre as atividades desenvolvidas no âmbito desse convênio uma delas foi a elaboração do Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C, aprovado em 2007, através de Consulta Pública.

Este regulamento foi criado para estabelecer as condições para a classificação do nível de eficiência energética para obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) emitida pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial (INMETRO), o qual aprovou sua revisão pela Portaria MDIC nº 163 de 08/06/2009, considerando a necessidade de estabelecer regras equânimes e de conhecimento público para os segmentos de projeto e construção de edifícios comerciais, de serviços e públicos.

Este regulamento especifica os requisitos técnicos, bem como os métodos para classificação de edifícios comerciais, de serviços e públicos quanto à eficiência energética. É de caráter voluntário mas passará a ter caráter obrigatório para edificações novas em prazo a definir. Os edifícios submetidos a esta regulamentação devem atender a todas as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT - vigentes e aplicáveis. A concessão da etiqueta será realizada nas diferentes fases do edifício:

- Projeto de nova edificação;
- Edificação pronta, após o Habite-se;
- Edificação existente, após reforma.

O RTQ-C aplica-se para edifícios com área total útil mínima de 500 m² e/ou com tensão de abastecimento superior ou igual a 2,3 kV, incluindo edifícios condicionados, parcialmente condicionados e não condicionados. Edifícios de uso misto, tanto de uso residencial e comercial, como de uso residencial e de serviços ou de uso residencial e público, devem ter suas parcelas não residenciais avaliadas separadamente caso estas, exclusivamente, ultrapassem 500 m². Há dois métodos de classificação do nível de eficiência energética (RTQ-C, 2009):

1. Método prescritivo: através da aplicação de uma equação fornecida, válida para edifícios condicionados;
2. Método de simulação: usando o método prescritivo e a simulação do desempenho termo-energético de edifícios condicionados e não condicionados.

O presente regulamento especifica a classificação do nível de eficiência de edificações, dividida em três requisitos, conforme as metodologias descritas acima:

1. Envoltória
2. Sistema de Iluminação
3. Sistema de Condicionamento de Ar

Todos os requisitos têm níveis de eficiência que variam de A (mais eficiente) a E (menos eficiente). Para obter a classificação geral do edifício, as classificações por requisitos devem ser avaliadas, resultando numa classificação final. Para isso, pesos são atribuídos para cada requisito e, de acordo com a pontuação final, é obtida uma classificação que também varia de A (mais eficiente) a E (menos eficiente) apresentada na ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (RTQ-C, 2009). Os pesos estão distribuídos da seguinte forma:

1. Envoltória = 30%
2. Sistema de Iluminação = 30%
3. Sistema de Condicionamento de Ar = 40%

O nível de classificação de cada requisito equivale a um número de pontos correspondentes, conforme a Tabela 1.1:

Tabela 1.1- Equivalente numérico para cada nível de eficiência(RTQ-C, 2009)

A	5
B	4
C	3
D	2
E	1

O formato da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), contendo os níveis finais e parciais do edifício, é mostrado na Figura 1.2(a). As classificações final e parciais são apresentadas na ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia. Um edifício com classificações A nos três requisitos parciais: envoltória, iluminação e condicionamento de ar – está em condições de obter o Selo Procel (Figura 1.2 - b).

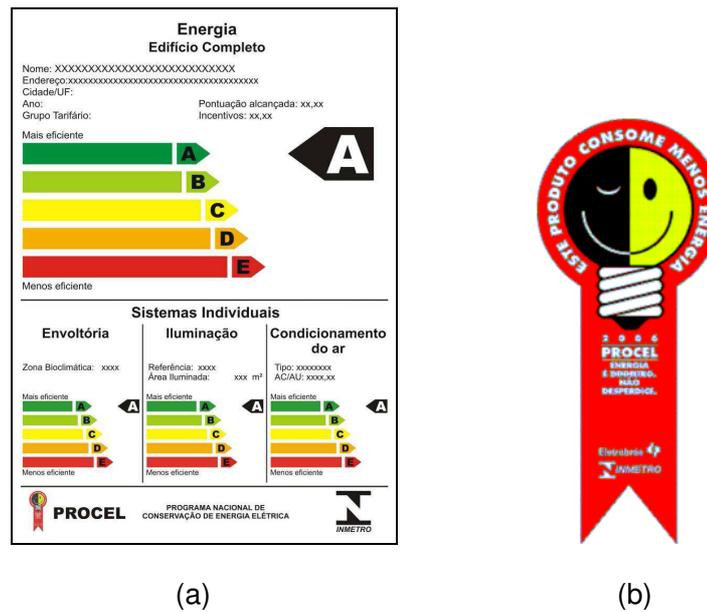


Figura 1.2- (a) Modelo da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) para edificações, (b) Selo PROCEL de economia de energia. Fonte: PROCEL.

1.3.1.1.1. Metodologia Prescritiva

Pela Metodologia Prescritiva, a classificação geral do edifício é calculada de acordo com a distribuição dos pesos através da Equação 1 abaixo:

$$PT = 0,30 \cdot \left\{ \left(EqNumEnv \cdot \frac{AC}{AU} \right) + \left(\frac{APT}{AU} \cdot 0,5 + \frac{ANC}{AU} \cdot EqNumV \right) \right\} + 0,30 \cdot (EqNumDPI) + 0,40 \cdot \left\{ \left(EqNumCA \cdot \frac{AC}{AU} \right) + \left(\frac{APT}{AU} \cdot 0,5 + \frac{ANC}{AU} \cdot EqNumV \right) \right\} + b_0^1$$

Equação 1

Onde,

EqNumEnv é o equivalente numérico da envoltória;

EqNumDPI é o equivalente numérico do sistema de iluminação, identificado pela sigla DPI, de Densidade de Potência de Iluminação;

EqNumCA é o equivalente numérico do sistema de condicionamento de ar;

EqNumV é o equivalente numérico de ambientes não condicionados e/ou ventilados naturalmente ;

APT é a área de piso dos ambientes de permanência transitória, desde que não condicionados;

ANC é a área de piso dos ambientes não condicionados de permanência prolongada;

AC é a área de piso dos ambientes condicionados;

AU é a área útil;

b é a pontuação obtida pelas bonificações, que varia de zero a 1.

De acordo com essa regulamentação, a classificação da eficiência da envoltória poderá variar de A (mais eficiente) a E (menos eficiente) e deverá ser estabelecida para a edificação como um todo, ao contrário dos outros sistemas que poderão ter analisados um conjunto de salas, um pavimento ou a edificação completa. Poderá ser obtida a classificação de apenas um sistema, deixando os demais em aberto. Neste caso, não é fornecida uma classificação geral do edifício, mas somente a do sistema analisado, sendo sempre obrigatório, em todos os casos, a classificação da envoltória.

Para classificação do nível de eficiência da envoltória, variáveis são inseridas numa equação denominada Indicador de Consumo, considerando áreas de janelas, proteções solares, tipos de vidro, dimensões da edificação e zoneamento bioclimático brasileiro. A escala numérica da classificação de eficiência é variável, e deve ser determinada para cada volumetria do edifício através dos parâmetros Fator Altura e Fator de Forma. Também deverão ser atendidos os pré-requisitos de transmitância térmica e absorvância solar de coberturas e paredes de acordo com a Zona Bioclimática e o nível de eficiência pretendido.

1.3.1.1.2. Metodologia da Simulação

O método da simulação compara o desempenho do edifício proposto (real) com um edifício similar (de referência), cujas características devem estar de acordo com o nível de

eficiência pretendido. Portanto, dois modelos devem ser construídos (simulados): o modelo representando o edifício real (de acordo com o projeto proposto) e o modelo de referência (de acordo com o nível de eficiência pretendido).

Através da simulação, compara-se o consumo do projeto proposto (real) com o consumo do projeto de referência. Deve ser demonstrado que o consumo de energia do projeto proposto deve ser igual ou menor do que o consumo do edifício de referência.

Características em comum para o Modelo do Edifício Real e de Referência:

- programa de simulação;
- arquivo climático;
- geometria;
- orientação com relação ao Norte Geográfico;
- padrão de uso e operação dos sistemas; o padrão de uso deve ser de acordo com o uso e ocupação real do edifício;
- valor de DCI em equipamentos;
- padrão de uso de pessoas, com o mesmo valor de calor dissipado;
- sistema de condicionamento de ar, entretanto deve-se utilizar o COP estabelecido no modelo de referência de acordo com o nível de eficiência pretendido.

O programa computacional de simulação termo-energética deve possuir, no mínimo, as seguintes características:

- ser um programa para a análise do consumo de energia em edifícios;
- ser validado pela ASHRAE Standard 140;
- modelar 8760 horas por ano;
- modelar variações horárias de ocupação, potência de iluminação e equipamentos e sistemas de ar condicionado, definidos separadamente para cada dia da semana e feriados;
- modelar efeitos de inércia térmica;
- permitir a modelagem de multi-zonas térmicas;
- deve ter capacidade de simular as estratégias bioclimáticas adotadas no projeto;
- caso o edifício proposto utilize sistema de condicionamento de ar, o programa deve permitir modelar todos os sistemas de condicionamento de ar listados no Apêndice G da ASHRAE 90.1;
- determinar a capacidade solicitada pelo Sistema de Condicionamento de Ar;
- produzir relatórios horários do uso final de energia.

O arquivo climático utilizado deve possuir, no mínimo, as seguintes características:

- fornecer valores horários para todos os parâmetros relevantes requeridos pelo programa de simulação, tais como temperatura e umidade, direção e velocidade do vento e radiação solar;
- os dados climáticos devem ser representativos da Zona Bioclimática onde o projeto proposto será locado e, caso o local do projeto não possuir arquivo climático, deve-se utilizar dados climáticos de uma região próxima que possua características climáticas semelhantes;
- devem ser utilizados arquivos climáticos e formatos publicados no www.eere.energy.gov (TRY, TMY, SWEC, CTZ2...). Caso contrário, o arquivo climático deve ser aprovado pelo laboratório de referência.

Capítulo 2. Conforto térmico e eficiência energética em edifícios de escritórios

Este capítulo apresenta um referencial teórico sobre conforto ambiental, caracteriza o clima de Brasília, as estratégias para projeto de *retrofits* energéticos em edifícios de escritórios e as variáveis arquitetônicas que interferem no desempenho térmico de uma edificação.

Utilizam-se como referência ao estudo de conforto térmico, principalmente, os autores Olgay (1998), Givoni (1998), Frota e Schiffer (2001), Maciel (2002) e Amorim (1998). Referente ao estudo de edifícios de escritórios: Silva (2003), Lima e Amorim (2007) e Veronezi (2006). Referente ao estudo do desempenho térmico da envoltória: Frota e Schiffer (2001), Lamberts et al. (2004), Carlo (2008), Silva (2006), Castro (2006).

2.1. Conforto térmico

Segundo ASHRAE (1997), o conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Se o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nulo e a temperatura da pele e o suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o ser humano está em conforto térmico. Entende-se a não satisfação pela sensação de desconforto pelo calor ou pelo frio, quando o balanço térmico não é estável, ou seja, quando há diferenças entre o calor produzido pelo corpo e o calor perdido para o ambiente.

Para Frota e Shiffer (2001) “o organismo experimenta sensação de conforto térmico quando perde para o ambiente, sem recorrer a nenhum mecanismo de termorregulação⁵, o calor produzido pelo metabolismo compatível com sua atividade”.

Uma das funções da Arquitetura é oferecer condições favoráveis ao ambiente interno, independente das condições climáticas externas (FROTA; SCHIFFER, 2001). A área da Arquitetura que engloba todos conhecimentos para obtenção destes benefícios é denominada

⁵A termorregulação é um conjunto de sistemas que definem a regulação da temperatura do corpo do homem com o fim de promover a homeostasia, isto é a manutenção da temperatura interna constante, ou seja, variando entre 36,1 e 37,2°C.

Conforto Ambiental e este se divide em conforto térmico, luminoso e acústico. Neste trabalho será abordado as repercussões do desempenho térmico das propostas de *retrofit* da envoltória de um edifício de escritórios no conforto térmico dos ocupantes.

As principais variáveis que afetam o conforto térmico são as ambientais, que provocam as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente, e as humanas. Olgay (1998) destaca as principais variáveis ambientais que interferem na sensação de conforto: temperatura do ar, temperatura radiante média, movimento do ar e umidade. Lamberts et al (1997), Frota & Schiffer (2001) acrescentam as variáveis humanas como a resistência térmica do vestuário⁶ e a taxa metabólica⁷ causada pela atividade física.

Ao longo das últimas décadas foram desenvolvidas pesquisas sobre conforto térmico através das respostas fisiológicas e psicológicas dos indivíduos na ocupação de ambientes construídos, fixando um tipo de atividade e a vestimenta do indivíduo para a partir daí, relacionar as variáveis do ambiente e reunir, em formas de cartas ou onogramas, as diversas condições ambientais que proporcionam respostas iguais por parte dos indivíduos (LAMBERTS et al., 2005).

Para avaliar a sensação térmica e o grau de desconforto em ambientes é utilizado o Voto Médio Estimado, PMV (Predicted Mean Vote), elaborado por Fanger, em 1970. É considerado um índice confiável, sendo por isso utilizado como base da norma ISO 7730 (AMORIM, 1998) .

Este índice expressa a satisfação ou não de um grupo de pessoas em um ambiente térmico, segundo uma escala de sensações de 7 pontos. Os valores variam entre -3 e +3 (Tabela 2.1). O valor zero se refere ao ambiente neutro, valores negativos, à sensação de frio, e os valores positivos à sensação de calor. Porém, o índice deve ser utilizado para valores entre -2 e +2, pois acima destes teríamos mais de 80% das pessoas insatisfeitas (ISO 7730, 1984).

⁶ A vestimenta equivale a uma resistência térmica interposta entre o meio e o corpo, representando uma barreira para as trocas de calor por convecção. O efeito térmico se mede em Clo, unidade arbitrária que determina o grau de isolamento da roupa.

⁷ Pode ser descrito pelo calor dissipado pelo corpo em função da atividade do indivíduo. Pode ser medido em W/m^2 de pele ou em MET, unidade metabólica cujo valor unitário corresponde a uma pessoa relaxada.

Tabela 2.1- Escala térmica de Fanger

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

Fonte: Apostila da disciplina Desempenho Térmico de Edificações – LabEEE (2005).

Entretanto, mesmo quando o PMV de um ambiente for neutro, pode não ser satisfatório para todas as pessoas. Para avaliar a insatisfação é adotado o índice PPD - Predicted Percentage of Dissatisfied. Devido a diferenças individuais⁸ é difícil especificar um ambiente térmico que satisfaça a todos, sempre haverá uma percentagem de insatisfeitos. Segundo a ISO 7730, um ambiente é considerado termicamente aceitável quando PPD <10%, ou seja, $-0,5 < PMV < +0,5$. São toleráveis, porém, os ambientes com PMV entre -1 e +1 e 20% de pessoas insatisfeitas.

Conforme a NBR 16401-2, a fim de se obter um percentual de 80% ou mais de aceitação de conforto térmico pelos usuários, em ambientes condicionados, deve-se seguir os seguintes parâmetros (ABNT/CB-55, Projeto 55:002.03-001/20 – Revisão da ABNT NBR 6401):

Verão

Vestimenta - 0,5 clo

Temperatura operativa⁹ e umidade relativa dentro da zona delimitada por :

- 22,5 °C a 25,5 °C e umidade relativa de 65 %;
- 23,0 °C a 26,0 °C e umidade relativa de 35 %;

A velocidade média do ar (não direcional) na zona de ocupação não deve ultrapassar:

- 0,20 m/s para distribuição de ar convencional (grau de turbulência 30 % a 50 %);
- 0,25 m/s para distribuição de ar por sistema de fluxo de deslocamento (grau de turbulência inferior a 10 %);

⁸ Variáveis como idade, sexo, raça, hábitos alimentares, peso, altura, etc., também exercem influência nas condições de conforto de cada pessoa

⁹ Temperatura operativa é a temperatura uniforme de um ambiente negro imaginário no qual o ocupante poderia trocar a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que no ambiente real não uniforme. Fonte: ABNT NBR 15220-1.

Inverno

Vestimenta - 0,9 clo

Temperatura operativa e umidade relativa dentro da zona delimitada por :

- 21,0 °C a 23,5 °C e umidade relativa de 60 %;
- 21,5 °C a 24,0 °C e umidade relativa de 30 %;

A velocidade média do ar (não direcional) na zona de ocupação não deve ultrapassar:

- 0,15 m/s para distribuição de ar convencional (grau de turbulência 30 % a 50 %);
- 0,20 m/s para distribuição de ar por sistema de fluxo de deslocamento (grau de turbulência inferior a 10 %).

Os parâmetros PMV (Predicted Mean Vote) e temperatura operativa serão usados neste trabalho como instrumentos de avaliação do conforto térmico, visto ser possível proceder suas análises pelo programa de simulação computacional DesignBuilder.

2.1.1. Estratégias de conforto térmico e eficiência energética para edifícios de escritórios em Brasília

Em relação às Coordenadas Geográficas, Brasília está localizada na região Centro-Oeste, na latitude 15°32' Sul em relação ao Equador Terrestre, com uma longitude de aproximadamente 47°30' Oeste do meridiano de Greenwich e situada a 1.159m de altitude em relação ao nível do mar. Os dados climáticos podem ser resumidos na Figura 2.1.

O clima da região de Brasília é classificado como “Tropical de Altitude”(Ferreira apud Amorim , 1998), caracterizados por duas estações: um período quente e úmido (outubro a abril) e um período seco (de maio a setembro). Maciel (2002) sugere a distinção de um terceiro período, dentro do período seco, classificado como quente-seco, que abrangeria os meses de agosto e setembro.

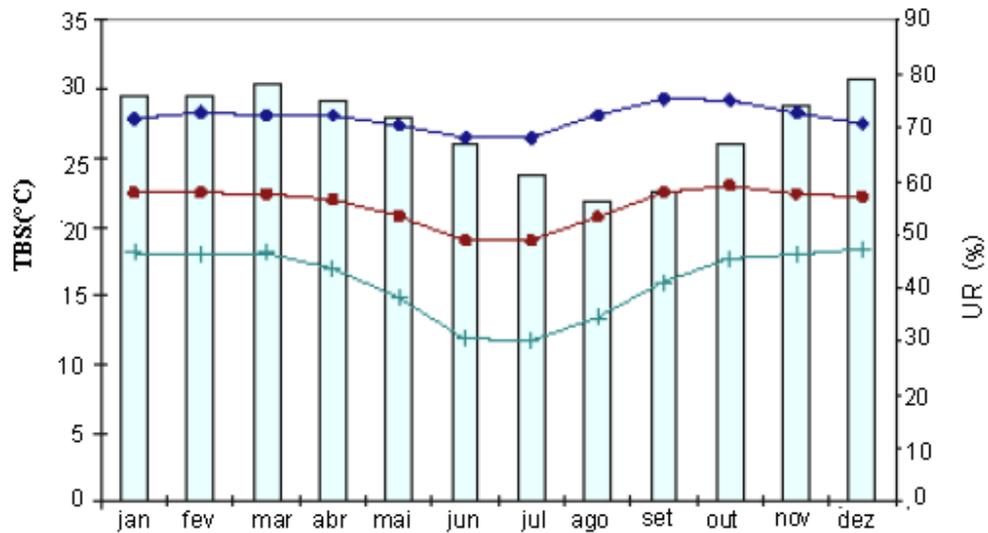


Figura 2.1-Valores médios das temperaturas de bulbo seco (TBS) e da umidade relativa (UR) para Brasília (1982 a 1997).

Fonte: Adaptado de Maciel (2002).

A adoção de estratégias bioclimáticas¹⁰ podem influenciar significativamente o desempenho térmico e energético de edificações. Como o consumo energético depende das condições de conforto que os ocupantes querem atingir, se a edificação estiver pouco adaptada ao clima será maior o consumo de energia para atingir as condições de conforto térmico pretendido, e da mesma forma, a correta aplicação de estratégias bioclimáticas conduzirá a uma edificação com maior qualidade ambiental¹¹.

As principais estratégias bioclimáticas para atingir o condicionamento térmico passivo, em Brasília, são (ABNT NBR 15220-3): o uso de resfriamento evaporativo, massa térmica para resfriamento e ventilação seletiva no verão; e aquecimento solar passivo e vedações internas pesadas no inverno.

No entanto, em edifícios de escritórios, as recomendações para a utilização de vedações com massa térmica devem ser contextualizadas, pois não há ocupação noturna e as horas de desconforto por frio acontecem à noite. Nestes edifícios, as altas cargas térmicas originadas pela ocupação, equipamentos e pelas necessidades especiais de iluminação (AMORIM, 2004), repercutem normalmente na necessidade do uso de ar condicionado. Nestes

¹⁰Os processos de interação do clima com a edificação podem ser explorados pelo projetista, através de uma série de estratégias de projeto ou estratégias bioclimáticas, proporcionando melhores condições de conforto térmico nos ambientes e menores gastos energéticos (fonte:www.eletrosul.gov.br.).

¹¹ Qualidade ambiental é o conjunto das variáveis ambientais de um determinado local, relacionadas com o conforto térmico e luminoso e a eficiência energética, tanto do ponto de vista objetivo quanto subjetivo (LIMA, 2007).

casos, a incorporação do isolamento térmico pode minimizar os ganhos e as perdas térmicas (LAMBERTS, 2004).

Para que em um ambiente de escritório existam condições de conforto térmico é necessário que as características climáticas locais sejam o ponto de partida para a concepção do edifício determinando a orientação, volumetria, o posicionamento e as dimensões das aberturas nas fachadas. Mas quando se trata de edifícios de escritórios existentes, com características arquitetônicas já definidas, outras variáveis devem ser também consideradas, como a substituição ou complementação dos acabamentos (cores superficiais) e dos materiais construtivos dos fechamentos opacos (isolamento térmico) e transparentes¹²(fator solar) da envoltória, as alterações nas dimensões das aberturas, a eficiência do sistema de ar condicionado ou a quantidade de equipamentos que dissipam calor (computadores, luminárias, copiadoras, etc), entre outras, podem restringir as cargas de calor do exterior e minimizar as cargas internas.

2.2. Retrofit energético como ferramenta para reabilitação de edificações

A busca pela racionalização da construção civil, através da integração dos procedimentos da qualidade, da segurança e saúde e das questões ambientais, implica num maior controle de todas as etapas nos processos da construção, da manutenção e nas alterações pós-ocupação.

Em razão disso, invariavelmente, temos nos deparado com o *retrofit* arquitetônico como referência em intervenções nacionais e internacionais, para revitalização de áreas urbanas e atualização das edificações. Com a tradução liberal de “colocar o antigo em boa forma”, o termo *retrofit* tem sido amplamente empregado com o sentido de renovação, de atualização, com preservação das características intrínsecas do bem “retrofitado” (VALE, 2006).

Qualharini (2000), descreve *retrofit* como o processo de interferir em uma benfeitoria, que foi executada em padrões inadequados às necessidades atuais. O processo de *retrofit* constitui-se num conjunto de ações realizadas para o beneficiamento e a recuperação de um

¹²A principal diferença entre fechamentos opacos e transparentes é justamente sua capacidade (transparentes) ou incapacidade (opacos) de transmitir a radiação solar para o ambiente interno.

bem, objetivando a melhoria do seu desempenho, com qualidade ou a um custo operacional viável da utilização da benfeitoria no espaço urbano.

Entre os profissionais e pesquisadores envolvidos com eficiência energética o termo é utilizado para definir alterações ou reformas nos sistemas consumidores de energia elétrica visando sua conservação (GHISI, 1997). Verifica-se ainda o emprego corrente de várias definições como “recuperação”, “renovação”, “revitalização”, “restauro”, “requalificação” e, sobretudo “reabilitação”, que muitas vezes são utilizadas de forma equivocada¹³.

Dentre eles, o termo mais abrangente é o de reabilitação. Para o Royal Institution of Chartered Surveyors (2008)¹⁴, “Rehabilitation”, é definido como ato ou processo de possibilitar um uso eficiente e compatível de uma propriedade, através de reparações, alterações e acréscimos, preservando ao mesmo tempo, as partes ou características que transmitem os seus valores histórico, cultural e arquitetônico.

Analisando-se o conceito de “reabilitação” no âmbito do edifício, podem-se seguir duas linhas de raciocínio diferentes: uma relativa a conservação do patrimônio histórico e a outra referente aos edifícios de uso corrente. Para a primeira linha, o conceito conduz, quando em um edifício predomina a sua natureza de bem cultural, ao conceito de conservação, definido pelo ICOMOS como “todo o processo de cuidar de um lugar com o fim de manter a sua importância cultural”. Para a segunda linha estão relacionados os serviços que dizem respeito à “reforma”, ao “*retrofit*” e à “manutenção”(MARQUES, 2008).

Por sua vez, Aguiar et al. (2002) definem “reabilitação” como o “o conjunto de ações que visam solucionar as deficiências físicas e anomalias construtivas, ambientais e funcionais de um edifício, acumuladas ao longo dos anos, ou alterar o seu uso original, procurando, ao mesmo tempo, uma modernização e uma melhoria geral do imóvel – atualizando as suas instalações, equipamentos e a organização dos espaços existentes, melhorando o seu desempenho funcional e tornando-o apto para o seu completo e atualizado reuso”.

Para um projeto de *retrofit* ou reabilitação é importante a previsão antecipada dos resultados a serem evidenciados: o desempenho quanto à competitividade do produto (diferenciais competitivos, comercialização, inovação, preço, imagem, outros), quanto à técnica (racionalização, tecnologia, eficiência energética, integração /compatibilidade, construtibilidade,

¹³ As definições apresentadas, são o resultado de pesquisas realizadas nas seguintes fontes: Dicionário Aurélio Buarque de Holanda; Kutter (1999) e em normas sobre áreas históricas protegidas.

¹⁴ Informação obtida em:

http://www.ratingreviewni.gov.uk/eh_the_royal_institution_of_chartered_surveyors.pdf

linguagem / desenhos, custo benefício das soluções); e quanto à satisfação (retorno sobre investimento, assistência técnica, conforto térmico, luminoso ou acústico, custo de manutenção, outros).

Cabe ao arquiteto a função de projetar e gerenciar, levando em conta os conceitos de sustentabilidade, segurança (física e social) e manutenção nas possíveis alterações pós-ocupação. Para tanto, quanto menos for necessário interferir nas fundações e na estrutura do edifício, maior a probabilidade de que essas operações sejam viáveis. Assim sendo, o emprego de componentes leves e industrializados (fachadas leves) nesse tipo de operação é recomendável.

Entretanto, para a reabilitação de edifícios existentes deverá ser observado como primeira conduta, a solicitação da devida autorização “escrita” do autor do projeto de arquitetura original sendo, em todos os casos, respeitados os seus direitos autorais, como regulamenta a Lei do Direito Autoral, Lei 9610/1998, no seu artigo 24, incisos IV e V, que prescrevem os direitos morais do autor¹⁵:

IV - o de assegurar a integridade da obra, opondo-se a quaisquer modificações ou à prática de atos que, de qualquer forma, possam prejudicá-la ou atingi-lo, como autor, em sua reputação ou honra;

V - o de modificar a obra, antes ou depois de utilizada.

A lei prevê, ainda, a possibilidade de repúdio pelo autor do projeto, casos de alteração de projetos na execução, como podemos ler o texto legal abaixo:

Art. 26. O autor poderá repudiar a autoria de projeto arquitetônico alterado sem o seu consentimento durante a execução ou após a conclusão da construção.

Alguns estudos apontam alternativas para o *retrofit* da envoltória de edifícios de escritórios existentes, testando as variáveis arquitetônicas passíveis de modificação. Foram investigadas, nestes casos, a viabilidade técnica e financeira para a proposição destas alterações, tendo em vista as melhorias em qualidade ambiental e eficiência energética:

Lee et al. (2001) verificaram a eficiência energética de 2 edifícios de escritórios do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), localizado na cidade de Florianópolis. Foram testados os seguintes parâmetros: instalação de um sistema central de condicionamento de ar, proteções solares nas janelas, aproveitamento

¹⁵ Direitos autorais dos engenheiros e arquitetos em <<http://www.jurisdoctor.adv.br/artigos/da-eng.htm>>. Acessado em 05/03/2008.

de iluminação natural através de prateleiras de luz e sistema de iluminação artificial composto por lâmpadas T8 de 32W, luminárias com refletor de alumínio de alta pureza e reatores com alto fator de potência. Estas medidas foram simuladas através da ferramenta computacional, o VisualDOE, e comparadas com as alternativas de projeto, menos eficientes, adotadas em obras típicas da UFSC, para analisar a influência destas no consumo de energia. Observou-se que as medidas adotadas interferiram e contribuíram para a redução no consumo de energia elétrica dos edifícios analisados.

Grillo (2005) propõe recomendações projetuais arquitetônicas em edifício público moderno, por meio da instalação de sistemas de luz natural, como proposta para reabilitação do Palácio Itamaraty, em Brasília. Os resultados favoráveis alcançados aos níveis de conforto do edifício e no consumo de energia, demonstraram a viabilidade do *retrofit*, causando mínima interferência na fachada.

Cótica (2003) no seu trabalho demonstrou, através de simulação termo-energética, que a alteração de parâmetros construtivos, substituição da proteção de concreto por brise metálico na fachada do prédio da GEREL - Banco do Brasil, acarretou um aumento da carga térmica e do consumo elétrico da edificação em virtude do ganho de calor pelas janelas da edificação.

Nesta pesquisa, o termo *retrofit* é utilizado para definir a reabilitação de um dos edifícios da Esplanada dos Ministérios, em Brasília, considerando o impacto nos custos da alteração das propriedades térmicas dos componentes construtivos da envoltória, através do benefício que estas medidas construtivas mais eficientes, do ponto de vista do conforto térmico dos usuários e da eficiência energética, proporcionam ao reduzir o custo da energia consumida.

Partindo do pressuposto que a forma, a orientação, as características da envoltória e as condicionantes climáticas interferem diretamente no desempenho ambiental dos edifícios, propõe-se neste trabalho o estudo de materiais e componentes construtivos que sejam passíveis de execução em *retrofits* de envoltória de edifícios de escritórios.

Para minimizar os ganhos solares sem descaracterizar as fachadas dos edifícios dos Ministérios, é proposta a intervenção interna às fachadas envidraçadas ou a substituição de elementos construtivos (vidros, películas, etc) pelos que preservem as características estéticas existentes, por causa do tombamento dos edifícios (processo IPHAN nº1550-T-2007). As propostas de *retrofit* visam manter as condições de conforto térmico (mantido pelo setpoint de 24°C do ar condicionado) e diminuir os gastos com energia elétrica pela utilização do sistema de climatização.

2.3. Edifícios de escritórios no Brasil: possibilidades em *retrofit* da envoltória

A cidade é ambiente propício ao consumo e a atividade de serviços, ligadas às inovações tecnológicas que geram novas necessidades. Os serviços são um segmento da economia que juntamente com o comércio compreendem o setor terciário. Edifícios de escritórios têm como finalidade abrigar as atividades terciárias (administrativas, financeiras, comerciais, de marketing e de serviços) de diversos setores da economia, como por exemplo, financeiro, industrial, público, de saúde, entre outros.

A visão inicial de edifício de escritórios como sendo apenas a estrutura física de suporte foi substituída pelo conceito de edifício de escritórios como ambiente adequado ao desenvolvimento dos negócios e parte integrante destes. Sob esse enfoque é necessário que tais edifícios acompanhem as evoluções tecnológicas de materiais e componentes construtivos, de conceitos arquitetônicos e de estruturas organizacionais do trabalho, bem como os movimentos dos centros de negócio dentro da malha urbana, para que possam atender da melhor forma seus ocupantes (VERONEZI, 2004).

Nesta pesquisa o foco é direcionado a edifícios de escritórios existentes, pela carência de projetos de reformas e *retrofits* energéticos com critérios de sustentabilidade e aplicação de técnicas construtivas que proporcionem o melhor desempenho ambiental e energético. Um edifício de escritórios do setor público foi selecionado como objeto de pesquisa em função:

- 1)** da considerável participação desta tipologia no consumo de energia elétrica do país;
- 2)** uniformidade tipológica observada em pesquisas em diversas cidades brasileiras;
- 3)** importância do setor público como formador de opinião.

Segundo Lima (2007), edifícios que utilizam estratégias bioclimáticas para melhorar a eficiência energética, tais como o uso de novas tecnologias para aproveitamento da iluminação e ventilação natural, estudos de melhor orientação dos edifícios, tipos de fachadas e materiais utilizados, sistemas mais eficientes para iluminação artificial, aquecimento e resfriamento dos ambientes podem ser classificados como mais ambientalmente sustentáveis.

Neste contexto, a introdução de mecanismos para a gestão dos requisitos de sustentabilidade ao longo do processo da construção, da manutenção e nas alterações pós-ocupação representam importantes oportunidades de desenvolvimento para o setor da

construção de edifícios. Segundo Fossatti (2008), entre as principais ações neste sentido, pode-se destacar:

- adoção de um novo paradigma de projeto, no qual as soluções são avaliadas considerando o ciclo de vida do ambiente construído - incluindo custos e impactos de manutenção e operação das edificações e não apenas seus custos iniciais;

- utilização de conceitos de racionalização, padronização, modulação e planta livre e de métodos construtivos com componentes leves e desmontáveis, para facilitar a flexibilidade e adaptação da edificação para futuras reformas, proporcionando uma obra limpa, a diminuição da quantidade de resíduos e perdas de materiais, diminuição do nível de ruído, dos riscos ao operário, tornando a demolição mais produtiva e possibilitando a reutilização dos materiais;e

- o uso de componentes construtivos e estruturais que possibilitem a manutenção do edifício, levando em consideração o acesso à componentes que exijam limpeza ou manutenção periódica (reservatórios de água, janelas, esquadrias, vidraças, divisórias internas, forros, telhados, calhas, domos de iluminação e proteções solares).

Dentre as inovações interessantes para *retrofits* de envoltória, pode-se citar a fachada leve ou dupla. A norma francesa NF P28-001 (Façade Légère - Définitions - Classifications - Terminologie), 1990, e a UEATC (Union Européenne pour l'Agrément Technique dans la Construction) definem fachada leve como “um elemento construtivo constituído por componentes pré-fabricados, com função de vedação vertical externa, constituído de várias camadas, sendo que pelo menos a camada mais externa tem massa inferior a 100 kg/m²”. As fachadas leves são geralmente constituídas pelos seguintes componentes, conforme ilustrado na Figura 2.2 (MELHADO et al., 2009).

- componentes de fechamento e/ou revestimento: placas de vidro, placas cimentícias, placas metálicas, placas de rocha, placas cerâmicas, painéis de materiais sintéticos etc. (componentes pré-fabricados cujo peso é menor que 100 kgf/m²);
- isolantes térmicos: placas de poliestireno expandido ou extrudado, placas em lã mineral etc.;
- estrutura secundária: na Europa utiliza-se estrutura secundária em madeira ou metálica. No Brasil, esse tipo de estrutura é mais comumente encontrado em perfis metálicos, que têm a função de apoiar os componentes de fechamento, revestimentos e materiais isolantes, suportar cargas laterais, como a ação do vento, e absorver deformações provenientes da estrutura principal e também da própria fachada;

- dispositivos de fixação: são responsáveis por fixar a estrutura secundária da fachada à estrutura principal do edifício, e/ou fixar os componentes de fechamento ou revestimento à estrutura principal, quando esses são autoportantes.

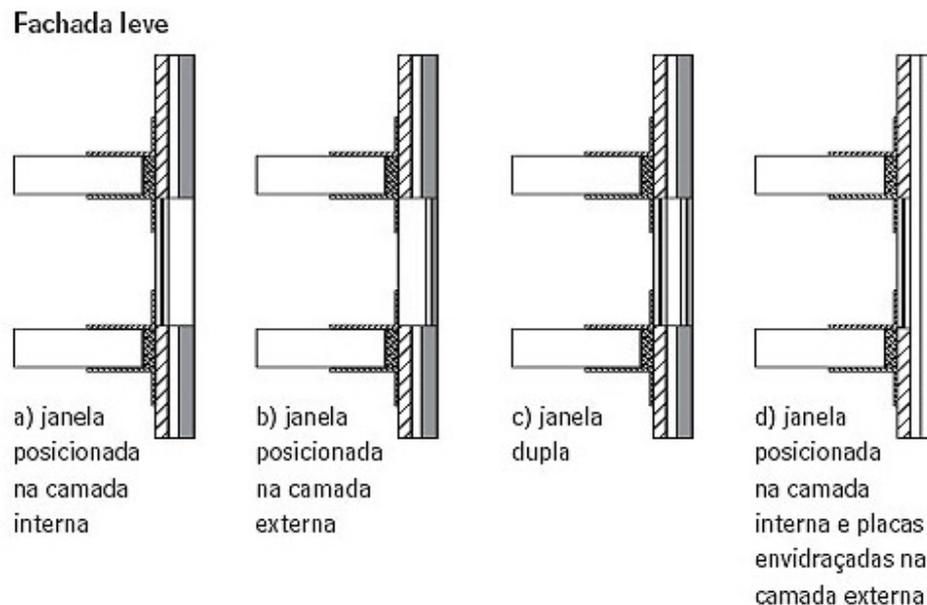


Figura 2.2 - Esquema da seção longitudinal de fachadas leves construídas por várias camadas.
 Fonte: Pesquisado em <http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/136/artigo95951-3.asp>.
 Acessado em 14/06/2009.

As tecnologias de fachadas leves, classificadas como fachada semi-cortina, tendem a ser as mais convenientes para aqueles casos de renovação de fachadas nos quais se pretende aproveitar a parede (vedo) existente que, em função de diversos problemas, já não atende integralmente sua função como vedação vertical externa. Dessa forma, adicionam-se à parede existente outras camadas, gerando uma parte adicional, cujo conjunto deve atender aos requisitos de desempenho de uma fachada. (MELHADO et al., 2009).

Como se trata de uma construção que se enquadra no processo construtivo racionalizado, podendo ser desmontada e montada facilmente em outro local, a fachada leve vem sendo largamente usada em obras de *retrofit* na Europa.

Os sistemas construtivos industrializados apresentam vantagens relativas à racionalização dos processos, podendo-se citar, entre outras, as seguintes (PAMPLONA, 2005):

- Execução da obra em menor prazo e com maior eficiência, proporcionando ganhos pela rapidez de sua conclusão e do retorno do capital investido;
- Racionalização de materiais e mão-de-obra, reduzindo o desperdício;
- A estrutura pode ser desmontada e reaproveitada;

- Redução dos custos em função da padronização;
- Possibilidade de redução do fator “U”, variando proporcionalmente com o aumento da espessura da câmara de ar entre as duas paredes;
- Com a utilização de materiais de enchimento isolantes nesses painéis, pode haver uma redução na transmissão de calor e ruído, proporcionando assim um melhor conforto térmico e acústico dentro da edificação.

Hernandez Neto (2008), no Laboratório de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP (Universidade de São Paulo), a pedido da empresa KeraGail, comparou a eficiência termoenergética do sistema fachadas leves com cerâmica extrudada, em relação à uma fachada em pele de vidro, através do programa de simulação Energyplus. O estudo de caso tomou como exemplo um centro empresarial, composto por duas torres de 28 pavimentos, cada uma delas com uma área de total de 22 mil m² de fachadas, com envoltória de pele de vidro duplo translúcido e serigrafado branco. A envoltória proposta era de pele de vidro duplo translúcido, e 4.410 m² de sistema KeraGail de fachada ventilada. Na análise dos resultados, observou-se uma sensível redução na temperatura superficial interna e, por consequência, da temperatura média do ar. O consumo do sistema de climatização do pavimento-tipo foi reduzido em 8,5%.

Considerando, especificamente, o mercado para reabilitação de edificações existentes no Brasil é necessário investir-se principalmente na racionalização e adequação do sistema de vedações verticais existentes. Esse é um dos principais gargalos tecnológicos do *retrofit* de envoltória de edifícios, uma vez que a utilização da alvenaria tradicional não é a solução mais apropriada, tendo em vista que o prazo para o término da obra, a organização e a limpeza da execução são fatores significativos em obras desta natureza, tendo em vista a não paralisação das atividades rotineiras nos ambientes de trabalho.

Novas tecnologias de construção permitem que edifícios sejam reformados com maior rapidez, economia e com utilização de mão-de-obra especializada. Entre as novas opções se destacam a utilização do concreto de alta resistência injetado em moldes para fabricação de componentes estruturais pré-fabricados, as peças pré-fabricadas de vedação externa, composta por duas lâminas de 10mm, ligadas por uma lâmina de fibra de vidro, com o objetivo de aumentar o isolamento acústico e os fechamentos em painéis isolantes térmicos em EPS ou painel Wall, correspondendo a um quarto do peso da alvenaria comum. As novas esquadrias são constituídas de vidros com câmara de ar entre as lâminas, objetivando melhorias nas características acústica e térmica e por caixilhos prontos, que podem ser introduzidos, por guindastes, na estrutura ainda em execução.

As características construtivas de uma edificação são de extrema importância para que esta seja energeticamente eficiente. O desempenho térmico dos materiais, o levantamento das características técnicas e o custo das tecnologias subsidiam a viabilidade dos projetos de *retrofit* de envoltória em edificações. Os critérios de sustentabilidade envolvem a consideração de todo o ciclo de vida do edifício, levando em consideração a qualidade ambiental, funcional e futuros valores, além dos custos de longo prazo: ambientais, econômicos e humanos.

2.3.1. Estratégias e critérios para elaboração de projetos de *retrofit* de envoltória visando a eficiência energética

A questão específica a que se se pretende problematizar é: quais as diretrizes para projetos de *retrofit* de envoltória poderão ser especificadas para edifícios de escritórios, que considerem as questões relacionadas às condicionantes climáticas, ao conforto térmico, eficiência energética e viabilidade técnica e financeira de execução. Podemos admitir as seguintes hipóteses:

1. A definição do percentual de aberturas nas fachadas (PAF), do fator solar e transmitância dos vidros estão diretamente ligados à quantidade de luz e calor recebida pelo ambiente e conseqüentemente o consumo de energia com os sistemas de resfriamento e iluminação artificial (LAMBERTS et al., 2004);
2. A especificação correta de materiais para os fechamentos opacos das fachadas e da cobertura através da minimização da transmitância térmica, da aplicação do isolamento térmico e da adequação das cores superficiais podem melhorar as condições de conforto nos ambientes de trabalho e conseqüentemente a performance energética (CARLO, 2008), mas deve ser realizada de maneira criteriosa. Neste estudo, estas modificações deverão acontecer internamente ao edifício para não comprometer a estética da fachada, por questões do tombamento da edificação sob estudo.

Uma edificação é considerada eficiente termicamente quando o consumo desta é mínimo, mas o ambiente é ainda confortável para os usuários. A eficiência energética de uma edificação depende das trocas térmicas entre esta e o ambiente externo. Meier et al. (2002) propuseram três critérios para avaliar edificações:

1. A edificação deve conter equipamentos e materiais eficientes que estejam de acordo com o local e condições do ambiente;

2. A edificação deve proporcionar conforto aos usuários;
3. A edificação deve consumir menos energia quando comparada a uma outra semelhante.

Neste trabalho, para verificação da eficiência energética do edifício analisado e das propostas de *retrofit* serão testadas parametricamente algumas variáveis da equação do Indicador de Consumo (IC) da envoltória do RTQ-C (INMETRO, 2009), através de alterações nos componentes construtivos. A seguir, serão apresentados alguns conceitos importantes relacionados ao tema e as variáveis e componentes construtivos avaliados neste trabalho.

2.4. Variáveis da envoltória e suas influências no desempenho térmico e eficiência energética

No desempenho térmico de edificações levam-se em conta as características climáticas da região e a classificação do clima (ABNT NBR 15220-3) para a escolha da envoltória (paredes, aberturas e cobertura), uma vez que esta atua como reguladora das cargas térmicas e da iluminação natural. Isto se deve ao fato de cada material possuir reações distintas a fenômenos que nele ocorrem, como a inércia térmica¹⁶, trocas de calor por condução¹⁷, convecção¹⁸ e radiação¹⁹. As propriedades térmicas dos materiais utilizados nos fechamentos externos e a ação dos raios solares influenciam nas cargas térmicas da edificação.

As cargas térmicas resultantes da interação das fontes internas de calor com a envoltória e desta com o meio externo são variáveis com o tempo. Isso ocorre devido ao caráter dinâmico das trocas de calor, em função dos mecanismos de transferência de calor e da variação das condições climáticas. Desta forma, a única maneira de intervir no comportamento térmico do edifício é através da alteração das características dos elementos de vedação da envoltória (SILVA, 2007).

¹⁶ Inércia térmica se refere a propriedade térmica de controlar as variações de temperatura diurna utilizando-se da massa térmica dos componentes construtivos. Quanto maior a massa térmica, maior o calor retido pelo material, retardando a troca de calor para o interior. A transmissão de calor se dará quando a temperatura do ar interna estiver menor que a da superfície (LAMBERTS et al., 2004).

¹⁷ Condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido às interações entre as partículas. (INCROPERA et al., 2008).

¹⁸ Convecção pode ser considerada a forma de transferência de calor entre superfícies sólidas e fluidas (gás ou líquido)(FROTA e SCHIFFER, 2001).

¹⁹ Radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não-nula. A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas (INCROPERA et al., 2008).

A norma ABNT NBR15575 - Parte 4 estabelece os requisitos para avaliação do desempenho de sistemas de vedações verticais internas e externas, podendo ser aplicado para edifícios habitacionais ou sistemas com mais de cinco pavimentos. Esclarece que estes sistemas de vedações externas, além de fixar os valores de volumetria e compartimentação dos espaços internos, integram-se de forma muito estreita aos demais elementos da construção, recebendo influências e influenciando o desempenho do edifício.

Esta norma cita que as vedações, mesmo sem função estrutural, podem atuar como contraventamento de estruturas reticuladas ou sofrer ações decorrentes das estruturas, requerendo assim uma análise conjunta do desempenho do edifício, e que exercem ainda importantíssimas funções de estanqueidade à água, isolamento térmica e acústica, capacidade de fixação de peças suspensas e compartimentação em caso de incêndio. Como premissas de projeto para revestimento das vedações verticais internas aplicadas em fachadas multicamadas estabelece que os materiais de revestimentos empregados sejam de fácil reposição e que o revestimento interno não seja integrante da estrutura da parede, nem considerado no contraventamento, desde que não haja comprometimento à segurança e a estanqueidade.

Os fechamentos externos ou envoltória são compostos pelos fechamentos opacos e transparentes. Estes elementos atuam de maneira distinta na transmissão da radiação solar para os ambientes: os primeiros bloqueiam e os segundos permitem a passagem da radiação solar (LAMBERTS, 2005).

2.4.1. Fechamentos opacos

Nos fechamentos opacos, a transmissão de calor acontece quando há uma diferença de temperatura entre as superfícies interna e externa. O sentido do fluxo de calor será sempre da superfície mais quente para a mais fria, sendo este processo dividido conforme a sequência abaixo (LAMBERTS et al., 2004):

- 1º. A superfície externa de um fechamento exposto a radiação solar receberá calor por meio de convecção e radiação, tendo sua temperatura aumentada numa proporção que depende da resistência superficial externa (R_{se})²⁰, sendo parte da radiação incidente refletida ou absorvida, dependendo da cor superficial. Cores

²⁰ O valor de R_{se} é uma função, basicamente, da velocidade do vento, e de forma simplificada, é adotado $0,04(m^2K/W)$. (ABNT 15220-3).

claras possuem uma absorvidade menor do que as escuras, portanto refletem mais, pois temos reflexão (ρ)+absorção (α) =1.

- 2°. Numa segunda fase, a elevação da temperatura da superfície externa do fechamento provoca um diferencial de temperatura em relação à superfície interna, provocando a troca de calor. Neste caso, a troca térmica será por condução e a intensidade do fluxo de calor dependerá da condutividade térmica (λ), propriedade dependente da natureza, da umidade e da densidade(ρ) do material.
- 3°. Na terceira fase do processo, a elevação da superfície interna do fechamento provocará o deslocamento do calor no sentido do ambiente interno, se este estiver com uma temperatura mais baixa. As trocas de calor serão por convecção, dependendo da resistência superficial interna do fechamento (R_{si}), e por radiação, a qual depende da emissividade(ϵ)²¹ superficial do material.

Lamberts et al. (2005) esclarecem que o emprego de materiais com baixa condutibilidade ou construídos com múltiplas camadas, sendo uma delas câmara de ar, podem reduzir sensivelmente as trocas de calor em fechamentos opacos. As trocas térmicas dentro da câmara de ar são por convecção e radiação, sendo que a convecção depende da inclinação do fluxo de calor e a radiação, da emissividade da superfície do material em contato com a camada de ar. Frota e Schiffer (2001) acrescentam que a resistência térmica é função também da espessura da lâmina de ar.

Cada material construtivo de um fechamento tem um valor de resistência térmica distinto. O inverso do valor da resistência total do fechamento, incluindo R_{se} e R_{si} , corresponde ao Coeficiente Global de Transferência de Calor (U). De acordo com as estratégias bioclimáticas para cada localidade, o cálculo da transmitância térmica e da absorvância dos fechamentos oferecerão subsídios para a avaliação das diferentes opções de materiais construtivos a serem aplicados na cobertura e nas paredes externas e internas.

A seguir serão abordados quatro aspectos importantes referente aos fechamentos opacos avaliados neste trabalho: Percentual de abertura na fachada (PAF), transmitância térmica, isolamento térmico e absorvância solar.

²¹ A emissividade é uma propriedade física dos materiais que diz qual a quantidade de energia térmica é emitida por unidade de tempo. Esta propriedade se refere a camada superficial do material emissor. Os materiais metálicos tem emissividade entre 0,05 e 0,30 e os não metálicos entre 0,85 e 0,90 (LAMBERTS et al., 2005).

2.4.1.1. Percentual de abertura na fachada (PAF)

Segundo o RTQ-C, PAF se refere a área de aberturas em uma fachada da edificação. No RTQ-C (INMETRO, 2009), instrumento utilizado para análise neste trabalho, refere-se somente a aberturas em paredes verticais com inclinação superior a 60° em relação ao plano horizontal. Refere-se às partes com materiais transparentes ou translúcidos, tais como janelas ou paredes de vidro, tijolo de vidro, policarbonato ou acrílico, sheds e mansardas (RTQ-C²², 2009).

Vários estudos são realizados para determinar o PAF ideal de cada localidade baseados nas condições climáticas de cada região: Melo (2005), em Florianópolis, utilizou a metodologia da análise de sensibilidade e a equação de Signor et al. (2001) para analisar a influência na mudança dos parâmetros de ganhos de calor pela janela e sistema de iluminação. Para as variáveis da janela, o parâmetro mais representativo foi a relação da área de janela/área de fachada. Através da análise de sensibilidade, com a utilização do programa EnergyPlus, este parâmetro resultou em uma diferença de 1,63% (29,83kWh) da carga térmica do modelo em um dia típico. Pelo programa Avalcon, a diferença foi de 9,79% (11,97kWh/m²) do consumo final de energia elétrica.

Carlo (2008) conclui na sua pesquisa que as características da envoltória, chamadas neste estudo de características secundárias, induzem a uma determinada intensidade energética e são responsáveis pela eficiência energética do edifício dentro de grupos com tipologias semelhantes. As principais seriam: percentual de área de janela na fachada (PAF), absorvância solar, características interdependentes como transmitância térmica e capacidade térmica e aquelas que descrevem fenômenos semelhantes, como coeficiente de sombreamento e fator solar.

A partir de uma pesquisa de campo sobre as características arquitetônicas, construtivas e de uso dos ambientes em 12 edifícios de escritórios da cidade de Florianópolis, foram analisadas as correlações entre variáveis arquitetônicas e o consumo de energia elétrica. Isto se deu a partir de regressão simples destas em relação aos consumos médios mensais dos edifícios nos períodos de inverno e verão. As principais características de projeto que influenciaram consideravelmente no desempenho energético da edificação são o PAFt e o fator solar dos vidros (TOLEDO et al., 1995).

²² RTQ-C - Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de edificações comerciais, públicas e de serviços. Especifica requisitos técnicos, bem como os métodos para classificação de edifícios comerciais, de serviços e públicos quanto à eficiência energética (INMETRO, 2009).

Ghisi & Tinker (2001) evidenciam o quanto as características da envoltória influenciam no consumo de energia dos edifícios. Os autores desenvolveram uma metodologia para a determinação da área ideal de janela em 8 cidades dentre as quais, Brasília. Utilizaram para isso simulações no programa VisualDoe, testando alternativas com vidros simples transparentes e sem proteção solar, de modo a avaliar a relação entre o consumo de energia e o percentual de abertura nas fachadas (window wall ratio – WWR). Em Brasília, a pesquisa apontou como ideais as aberturas com WWR entre 18% e 39%, dependendo da orientação da fachada.

Neste trabalho, será avaliado o PAft do edifício (INMETRO, 2009) para verificação de seu impacto na eficiência energética.

2.4.1.2. Transmitância térmica

Segundo o RTQ-C (INMETRO, 2009), a transmitância térmica (W/m^2K) é a transmissão de calor em unidade de tempo e através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo, neste caso, de componentes opacos das fachadas ou coberturas, induzida pela diferença de temperatura entre ambientes.

Carlo et al. (2003) mostraram que a influência da transmitância térmica de paredes externas no consumo anual de energia elétrica pode ser variável de acordo com a capacidade térmica. Para um modelo teórico de edificação condicionada artificialmente simulado no DOE 2.1-E com o arquivo climático da cidade de Salvador, o consumo de energia elétrica de uma edificação com paredes externas leves é crescente com o aumento da transmitância térmica enquanto o consumo de uma edificação com paredes pesadas decresce quando U está entre $1,50 W/m^2K$ e $1,70 W/m^2K$ e entre $2,20 W/m^2K$ e $3,00 W/m^2K$. Nos demais intervalos, o consumo de energia elétrica para a edificação de paredes pesadas é crescente. E ainda, uma mesma transmitância nos dois modelos implica em consumos de energia elétrica maiores no modelo com paredes leves, devido à ausência dos efeitos da inércia térmica.

O RTQ-C (INMETRO, 2009) estabelece como pré-requisitos específicos para cada nível de eficiência da envoltória os valores de transmitância térmica para paredes e coberturas. Quanto mais elevado o nível, mais restritivos são os requisitos a serem atendidos. Para Brasília (zona bioclimática 4), os limites são:

- **Nível A**

Transmitância Térmica da Cobertura - Para ambientes condicionados artificialmente não deve ultrapassar $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ e para ambientes não condicionados, não deve ultrapassar $2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$. Transmitância térmica das paredes externas máxima deve ser de $3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$.

- **Nível B**

Transmitância Térmica da Cobertura - Para ambientes condicionados artificialmente não deve ultrapassar $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ e para ambientes não condicionados, não deve ultrapassar $2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$. Transmitância térmica das paredes externas – idem Nível A.

- **Nível C e D**

Transmitância Térmica da Cobertura - Para ambientes condicionados artificialmente não deve ultrapassar $2 \text{ W/m}^2\text{K}$. Transmitância térmica das paredes externas – idem Nível A.

Em razão dos pré-requisitos do RTQ-C, optou-se neste trabalho por testar a utilização de materiais construtivos com baixa condutividade térmica como o painel Wall, descrito a seguir.

2.4.1.2.1. Painel Wall - Wall Systems

Os painéis Wall, estruturais ou não, são constituídos de miolo de madeira sarrafeada e em lâminas, recobertos com chapas lisas prensadas de fibrocimento CCFS (Cimento, Celulose e Fio Sintético), em ambas as faces. As juntas entre os painéis é feita por perfis aparentes ou junta seca (malhetes embutidos). A Figura 2.3 demonstra a composição do painel Wall e as Figuras 2.4 (a) e (b) ilustram o uso de painéis Wall Systems.



Figura 2.3- Composição do painel Wall



Figura 2.4- (a) Fechamentos externos em painéis Wall Systems, (b) Edificação em painéis Wall Systems. Fonte: HABITAR (2004).

Os painéis de vedação com função estrutural apresentam dimensão padrão de 120 cm de largura, podendo ter 210 cm, 250 cm ou 275 cm de altura, sendo fixados no piso e no teto por meio de perfis-guia metálicos, podendo também ser utilizados como laje. As instalações hidráulicas são embutidas em uma parede hidráulica dupla removível, tipo shaft, ou poderão ser aparentes. As instalações elétricas podem ser aparentes ou embutidas nos painéis que possuem canaletas para essa finalidade. Após a montagem, os painéis podem receber diversos tipos de acabamento. A Tabela 2.2 apresenta algumas características e as dimensões dos painéis Wall disponíveis no mercado.

Tabela 2.2- Características e dimensões de painéis Wall (ETERNIT, 2009)

Largura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Área (m ²)	Peso (kg/m ²)	Densidade (kg/m ³)
1200	2750	40 ou 55	3.30	33,50 - 37,50	≅ 800
1200	2500	40 ou 55	3.00		
1200	2100	40 ou 55	2.52		

O IPT realizou alguns testes para verificação das propriedades térmicas do painel Wall (Certificado IPT nº 508.308, 1983), sendo encontrado os seguintes resultados:

- Resistência Térmica ($R = 0,27 \text{ m}^2\text{K/W}$).
- Condutividade Térmica ($\lambda = 3,71 \text{ W/m.K}$).
- Transmitância térmica ($U = 2,54 \text{ W/m}^2\text{K}$).

As Figuras 2.5 (a) e (b) demonstram os detalhes do sistema construtivo:

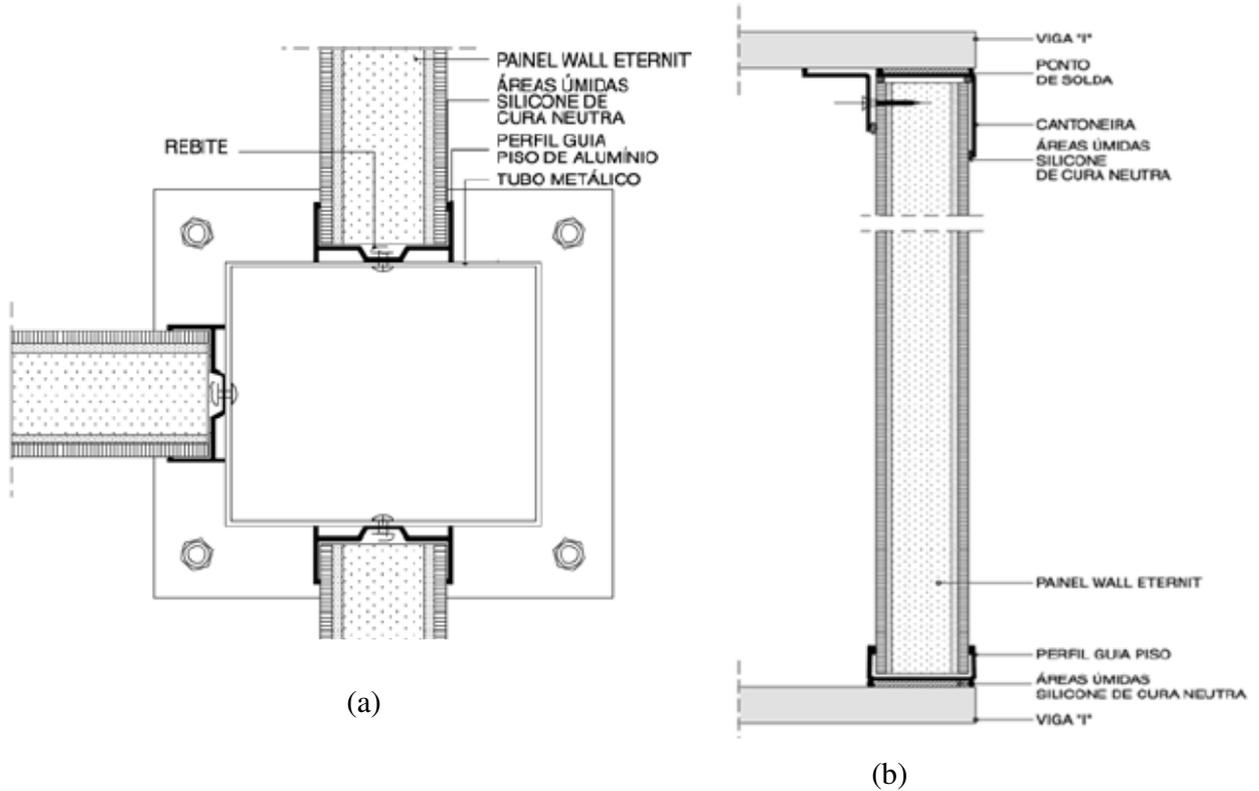


Figura 2.5- (a) Fixação de paredes em painéis *Wall Systems*, (b) Corte vertical da fixação de painéis *Wall Systems*.

2.4.1.3. Isolamento térmico

Conforme Bejan (1996), o isolamento térmico consiste na escolha criteriosa dos constituintes do isolamento (materiais, tamanho, forma, estrutura e escoamento) de modo que a taxa de transferência de calor diminua enquanto as temperaturas extremas permanecem constantes. Esta capacidade é função da resistência térmica que materiais isolantes proporcionam.

Os isolantes térmicos são constituídos por materiais de baixa condutividade térmica combinados para obter uma condutividade térmica do sistema ainda menor. Tais sistemas são caracterizados por uma condutividade térmica efetiva, que depende também das propriedades radiantes da superfície do material sólido, bem como da natureza e da fração volumétrica de ar ou espaços vazios (INCROPERA et al., 2008).

Os isolantes térmicos apresentam uma baixa condutividade térmica quando comparados a outros materiais, como pode ser observado através da Tabela 2.3.

Tabela 2.3-Condutividade térmica de alguns materiais de construção

Materiais		Condutividade térmica (W/mK)
Isolantes térmicos	Lã de rocha	0,045
	Lã de vidro	0,045
	Poliestireno	0,035
	Poliuretano	0,026
Madeiras	Compensado	0,12
Impermeabilizante	Betume asfáltico	0,17
Plásticos	Borracha sintética	0,40
Tijolos e telhas de barro	-	1,05 - 0,70
Concreto	-	1,75
Pedras	Mármore	2,90
	Granito	3,00
Metais	Aço	55,00
	Zinco	112,00
	Alumínio	230,00

Fonte: Lamberts et al. (2004).

Ao reduzir o fluxo de calor pela envoltória do edifício, os isolantes térmicos possuem várias funções em edifícios condicionados (ASHRAE, 1997):

- Conservam a energia devida à redução das perdas de calor;
- Controlam a temperatura superficial de equipamentos e estruturas;
- Previnem as condensações em superfícies com a temperatura inferior ao ponto de orvalho;
- Reduzem as flutuações térmicas dos espaços, aumentando o conforto térmico.

Ainda sobre o uso de isolantes térmicos, Melo (2007), baseada em estudos de caso, concluiu que a utilização do isolamento térmico pode melhorar a eficiência energética das edificações, da seguinte forma:

- Economia no consumo de energia elétrica; pelo fato do isolamento térmico restringir a entrada de calor;
- Redução do uso do sistema de condicionamento de ar;
- Diminuição da emissão de poluentes para o meio ambiente devido a redução de utilização de sistemas elétricos e mecânicos;

- Aumento do período onde a temperatura interna do ambiente fica mais confortável aos usuários;
- Redução do ruído procedente de ambientes vizinhos e externos;
- Redução da flutuação da temperatura interna.

Os isolantes térmicos podem ser classificados quanto à: natureza - mineral, vegetal ou sintética; estrutura - fibrosa, celular ou mista; modo de produção - pré-fabricados ou formados “in-situ”; apresentação - rígidos, semi-rígidos ou granulares (SILVA, 2006).

Al-Homoud (2005) relata que muitos parâmetros devem ser considerados na escolha de um isolante térmico para a utilização em edificações, como: custo, facilidade de manuseio, segurança, durabilidade, absorção acústica, impacto ao meio ambiente e disponibilidade do material. Os materiais mais utilizados para isolar termicamente a envoltória de edificações são: mantas e painéis constituídos de fibras minerais ou orgânicas flexíveis, espumas plásticas rígidas de poliuretano ou poliestireno expandido, vermiculita expandida ou perlita em grânulos e flocos de lãs minerais

A instalação dos isolantes térmicos vai depender do tipo de edificação, do tipo de isolante empregado e da sua localização na estrutura da edificação. O efeito do isolamento vai depender de como e em que local da parede ou da cobertura este foi instalado (AL-HOMOUD, 2005). O isolante térmico pode ser colocado tanto na parte externa como na parte interna das paredes, ou até mesmo no interior (tipo parede sanduíche). Em coberturas, pode-se colocar sobre a laje, no interior da laje, abaixo do forro ou sobre o telhado.

Quando colocado na parte interna da parede protege o ambiente interno em relação ao externo, fazendo com que a temperatura da estrutura se aproxime da temperatura externa. Caso o isolante térmico seja instalado na parte externa da parede vai oferecer um armazenamento de calor interno, se a parede tiver uma boa inércia térmica, devido à incidência de radiação solar e dos ganhos internos. A instalação do isolamento no meio da parede vai ocasionar ambos os efeitos mencionados anteriormente (MELO, 2007).

Melo (2007) analisou o comportamento térmico e energético de um edifício de escritórios, utilizando-se os dados do arquivo climático da cidade de São Paulo, com diferentes alternativas de percentual de abertura nas fachadas, densidade de cargas internas, e condições de isolamento térmico das paredes e coberturas opacas. Constatou-se que a aplicação de isolamento térmico nas paredes do edifício de escritórios pode provocar uma redução de até 10% no consumo de energia elétrica em condicionamento de ar e até 15% na capacidade instalada do sistema, sendo, entretanto, dependente da geração de calor interno na edificação. Prédios com alta densidade de carga interna necessitam de um envelope com resistência

térmica mais baixa para permitir maior dissipação de calor. Prédios mais eficientes, com carga interna mais baixa, teriam maior necessidade de isolamento térmico em suas paredes.

A análise da influência da envoltória na carga térmica de um edifício comercial de ocupação mista em três condições climáticas (São Paulo, Recife e Curitiba), através do programa computacional BLAST foi avaliada por Hernandez Neto et al. (1999). Na simulação foram utilizadas paredes com materiais de baixo, médio e alto isolamento térmico. Observou-se que as paredes com um maior isolamento térmico podem ocasionar um achatamento no perfil da carga térmica, fazendo com que o sistema de condicionamento de ar opere com uma maior eficiência, diminuindo o consumo de energia elétrica.

Em razão dos pré-requisitos do RTQ-C, optou-se neste trabalho por testar a utilização de isolantes térmicos (painéis modulares de EPS TI) instalados internamente às fachadas envidraçadas.

2.4.1.3.1. Paineis EPS TI

EPS é a sigla internacional do Poliestireno Expandido, de acordo com a Norma DIN ISO-1043/78. É um plástico celular rígido, resultante da polimerização do estireno em água. Em seu processo produtivo não se utiliza CFC ou qualquer um de seus substitutos. Como agente expander para a transformação do EPS, emprega-se o pentano, um hidrocarboneto que se deteriora rapidamente pela reação fotoquímica gerada pelos raios solares, sem comprometer o meio ambiente.

A densidade do material está entre 13 e 25 kg/m³, tem resistência à compressão de 1 a 2 kg/cm², características favoráveis para utilização como enchimento de lajes. É leve e por isso pode ser usado até com 10 kg/m³. Resistente apesar de muito leve, chega a 50 kPa nos materiais produzidos dentro das normas da ABNT, classificação PI (NBR 11752). Os produtos finais de EPS são inodoros, não contaminam o solo, água e ar, são 100% reaproveitáveis e recicláveis e podem voltar à condição de matéria-prima. O poliestireno expandido (EPS) é um material plástico, derivado do petróleo e uma das preocupações quanto ao seu uso na construção civil era a propagação de fogo. Porém, os avanços tecnológicos permitiram a fabricação do EPS de classe F, que não gera combustão.

O Painel EPS TI é um produto desenvolvido para o mercado da construção civil, composto de miolo em EPS (Poliestireno Expandido) e contraplacado por placas lisas cimentícias CCFS (Cimento, Celulose e Fio Sintético) de 4mm coladas a placa de EPS (Figura

2.6). É um sistema construtivo modular a seco, sendo utilizado em divisórias, paredes, forros, beirais, sanitários, cozinhas, câmara frigoríficas, em paredes internas e externas.



Figura 2.6 - Paineis em EPS TI com 70 mm

Pode ser utilizado em obras de *retrofit* da envoltória pela facilidade de aplicação (montagem e desmontagem), pela facilidade de composição com outros materiais, tanto de acabamento quanto de reforço para isolamento sonoro, pelo baixo peso e pela baixa condutividade térmica e alta resistência térmica (isolamento térmico).

Na Tabela 2.4 são apresentadas as dimensões e propriedades térmicas do EPS TI.

Tabela 2.4- Dimensões e propriedades térmicas de painéis em EPS TI

Largura(mm)	Comprimento(mm)	Espessura(mm)	Peso(kg)	Condutividade Térmica(W/mK)	Resistência Térmica(m ² K/W)
1.200	2.500	35 mm	46,0	0,059	0,52
1.200	2.500	75 mm	47,5	0,059	1,25
1.200	2.500	90 mm	48,0	0,059	1,52
1.200	2.500	120 mm	48,5	0,059	2,11

Fonte: http://correio.piniweb.com/userfiles/manual_eps.pdf?mace2_cod=6222

O sistema construtivo consiste na montagem das guias inferiores e superiores formadas por perfis “U” de aço galvanizado dimensionado para a espessura do Painel EPS TI adotado. Os painéis são unidos através de perfis “H” ou por perfis tubulares posicionados junto as bordas do painel devidamente colado ou aparafusado. Para um acabamento sem juntas visíveis, os perfis “U” devem ser embutidos no Painel EPS TI e estar separados por uma junta igual ou superior a 3 mm. A face externa dos painéis deve ser impermeabilizada com 2 demãos de impermeabilizante e as juntas tratadas com massa para junta e fita de fibra de vidro. As

instalações elétricas e hidráulicas são embutidas nos painéis e após a conclusão da montagem podem receber acabamento em pintura, textura, pastilhas, cerâmica, etc²³.

Amorim & Sposto (2008) estudaram o desempenho das envoltórias de um edifício residencial e de um edifício comercial, em Brasília. Para tanto, fizeram uma análise comparativa das Normas Brasileiras de Desempenho 15575-4 e 15220-3 e da metodologia prescritiva do RTQ-C (2009). Concluíram ser imprescindível o estudo de novos materiais e componentes para envoltória, visto a necessidade de atendimento às exigências normativas. Como proposta para melhoria do desempenho da envoltória, reduzindo a transmitância térmica, sugeriram o acoplamento de placa de EPS TI na parte interna dos fechamentos externos, com uso de tela e posterior acabamento com argamassa ou gesso acartonado. Portanto, esta será uma das alternativas testadas.

2.4.1.4. Absortância solar

Segundo a NBR 15.220 -1²⁴, a absortância solar é o “quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície”. Quanto maior a absortância, maior a parcela da energia incidente que se transforma em calor (radiação de ondas longas) após incidir sobre um material opaco.

Analisando a absortividade pode-se dizer que os materiais de construção são seletivos à radiação de onda curta e a principal determinante desta característica é a cor superficial. A cor é utilizada como indicação da absortância quando não há possibilidade de medição: cores mais claras têm absortâncias mais baixas, e portanto, transferem menos calor para o interior, ocorrendo o contrário com cores escuras.

Para garantir envoltórias mais eficientes, o RTQ-C determina uma absortância máxima de 0,4 para os materiais de revestimento externo das paredes (onde incide a radiação solar) para as Zonas Bioclimáticas de 2 a 8.

Para coberturas não aparentes, a absortância solar máxima também é de 0,4, exceto para coberturas de teto-jardim ou de telhas cerâmicas não esmaltadas. As coberturas aparentes podem possuir absortâncias maiores que esta, uma vez que fazem parte da composição da fachada do edifício. No cálculo da absortância solar da envoltória de edificações

²³ Estas informações foram retiradas do site do fabricante: <http://www.construpor.com/01.htm>.

²⁴ ABNT NBR 15.220 -1 -Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades.

pelo RTQ-C é feita a média ponderada das absorptâncias das fachadas e cobertura pela área que as mesmas ocupam.

A NBR 15220-2 apresenta uma lista de absorptâncias para algumas cores e materiais, listada a seguir.

Tabela 2.5. Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas) (ABNT, 2005).

Tipo de superfície	α
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,15
Chapa de aço galvanizada	0,25
Caiação nova	0,12/ 0,15
Concreto aparente	0,65/ 0,80
Telha de barro	0,75/ 0,80
Tijolo aparente	0,65/ 0,80
Reboco claro	0,30/ 0,50
Revestimento asfático	0,85/ 0,98
Vidro incolor	0,06/ 0,25
Vidro colorido	0,40/ 0,80
Vidro metalizado	0,35/ 0,80
Pintura:	
Branca	0,20
Amarela	0,30
Verde clara	0,40
"Alumínio"	0,40
Verde escura	0,70
Vermelha	0,74
Preta	0,97

2.4.2. Fechamentos transparentes

A função de fechamentos transparentes é permitir a iluminação natural dos ambientes internos, controlar as trocas de ar entre interior e exterior e possibilitar a conexão visual com o exterior. Entretanto, as trocas térmicas mais consideráveis acontecem nestes componentes ou seja, em todas as áreas da envoltória com fechamentos que permitem a entrada da luz, incluindo janelas, painéis plásticos, clarabóias, portas de vidro e paredes de

bloco de vidro (LAMBERTS et al., 2004).

Nos fechamentos transparentes podem ocorrer três tipos de trocas térmicas: condução, convecção e radiação, sendo que a radiação os diferencia dos fechamentos opacos, devido à propriedade desses materiais de transmitir parcela do fluxo térmico (q), diretamente para o interior dos edifícios. Essa parcela vai depender da transmissividade do vidro (τ).

A consequente transformação em calor é causada por um efeito térmico conhecido por efeito estufa: os vidros são transparentes à radiação solar de onda curta e opacos à radiação de onda longa provocada pelo aquecimento das superfícies internas e objetos (CASTRO, 2005). As principais variáveis que podem alterar o aporte de calor pelas aberturas são: a orientação e tamanho da abertura, o tipo de vidro e o uso de proteções solares internas e externas.

A seguir apresenta-se um panorama de alguns trabalhos existentes sobre materiais transparentes e o controle energético em edificações, enfocando o ganho de calor solar pela envoltória:

Winkelmann (2001) apud Pereira (2003), através de simulação computacional utilizando o EnergyPlus, demonstrou que a transferência de calor pelas janelas é 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. Já em edificações residenciais, esses números são 34% e 23%, respectivamente. Esses dados demonstram a importância dos estudos relacionados à influência dos vidros no desempenho térmico de uma edificação.

Castro (2006) estudou o comportamento de superfícies transparentes em fachadas, em situação real, através de medições em seis células-teste, em Campinas. Concluiu que a maior contribuição para a atenuação do ganho de calor solar foi dos vidros metalizados a vácuo. Dentre os três metalizados a vácuo analisados, o prata neutro foi o de menor contribuição para o aumento das temperaturas de bulbo seco internas, além de registrar as menores temperaturas superficiais internas, sugerindo ser o mais indicado na atenuação do ganho de calor.

Realizando simulação computacional através do programa EnergyPlus, Pereira (2003) analisou a influência do ganho de calor, para dias típicos de projeto, através de fachadas de vidro de acordo com sua orientação, área e ainda o tipo de película utilizada sobre vidro simples. Os resultados obtidos mostram que tanto a orientação como a utilização da película transmissiva 33 (película refletiva) utilizada na edificação alteram sensivelmente a potência instalada necessária para obtenção de conforto térmico.

2.4.2.1. Vidros

A escolha do vidro para uma edificação deve-se basear na sua capacidade de admitir ou bloquear a luz natural, admitir ou bloquear o calor solar, permitir ou bloquear as perdas de calor do interior e permitir o contato visual entre o interior e exterior (LAMBERTS et al., 2005).

Além disso, há outro aspecto que deve ser observado com relação a especificação de materiais transparentes e que se refere à qualidade da radiação solar transmitida para o ambiente interno. A partir da radiação solar incidente no vidro, uma parcela é absorvida, outra refletida e a restante, maior, transmitida diretamente ao ambiente interno. Da parcela absorvida, uma porcentagem é reirradiada para o interior do ambiente, e o restante para o exterior. Essa porcentagem depende da transmitância térmica total (U), bem como dos coeficientes superficiais interno e externo de transmissão de calor (h_i e h_e). As proporções correspondentes à energia diretamente absorvida (α), refletida (ρ) e transmitida (τ) variam de acordo com o comprimento da onda incidente, além de estarem também relacionadas com a espessura, a cor e o índice de refração do vidro e o ângulo de incidência da radiação (SCHOLZE, 1980). As razões entre cada uma destas três parcelas no fluxo incidente definem a absorptância, refletância e transmitância do vidro. A Figura 2.7 esquematiza o comportamento de energia solar incidente sobre uma superfície transparente.

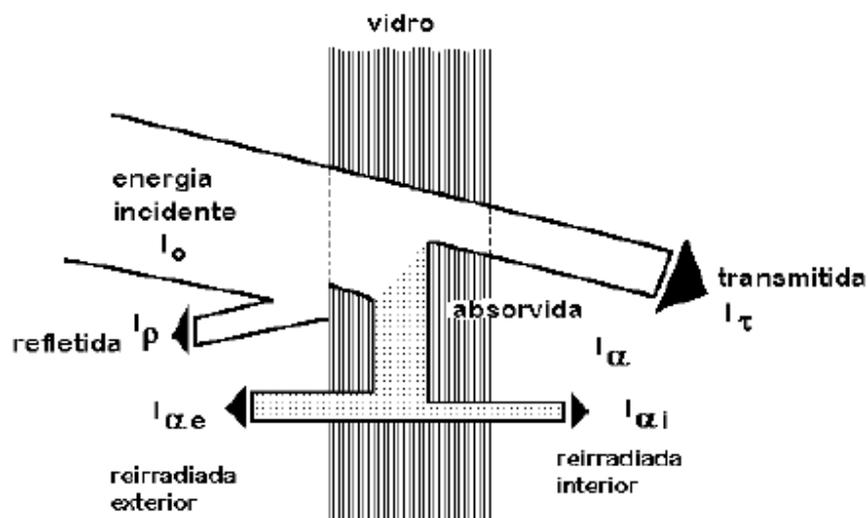


Figura 2.7 - Esquema utilizado para explicar o comportamento da energia solar incidente sobre uma superfície transparente (fonte: CROSET, 1970) (modificada).

Na Figura 2.7 pode-se observar que a radiação solar incidente (I_0) sobre uma superfície envidraçada é decomposta em três parcelas:

- radiação I_t , transmitida diretamente através do vidro para o interior;
- radiação I_p , refletida pela superfície do vidro para o exterior;
- radiação I_a , absorvida pelo vidro, sendo dissipada na forma de ondas longas para o ar exterior (I_{ae}) e interior (I_{ai}), em proporções que dependem das condições ambientais.

Portanto,

$$I_0 = I_t + I_p + I_a$$

ou

$$1 = \tau + \rho + \alpha$$

Um vidro ideal seria, dentro do conceito da eficiência energética e de acordo com os efeitos físicos e biológicos relativos a cada faixa do espectro solar, aquele que tivesse uma alta transmissão da radiação visível, proporcionando conforto visual, e baixa transmissão do ultravioleta e do infravermelho (fonte de calor).

As especificações indicadas pelos fabricantes de vidros referem-se à descrição das parcelas de radiação solar que são transmitidas, refletidas e absorvidas por tais componentes sem no entanto indicar como esses mecanismos ocorrem por faixa do espectro. Em se tratando de adequação de fechamentos transparentes, os principais parâmetros considerados, sob o ponto de vista da eficiência energética, são o Fator Solar, Ganho de Calor Solar, Coeficiente de Sombreamento e Coeficiente de Ganho de Calor Solar. Geralmente, o Fator Solar e o Coeficiente de Sombreamento são encontrados em catálogos técnicos de vidros e películas de controle solar.

O Fator Solar (FS)²⁵ é definido como o quociente da taxa de radiação solar diretamente transmitida através de um componente transparente ou translúcido, sob determinado ângulo de incidência, mais a parcela absorvida e posteriormente retransmitida para o interior (ABNT NBR 15220 -1). A fração da energia solar incidente absorvida e reirradiada para o interior, de forma genérica, corresponde a 50% da parcela da radiação absorvida pelo vidro, resultando em: $FS = \tau + (1/2)\alpha$ (LAMBERTS et al., 2004). Quanto maior o Fator Solar, mais o vidro permite a passagem de energia.

²⁵ Fator Solar (FS) - Sua tradução para o inglês é Solar Heat Gain Coefficient (SHGC).

2.4.2.1.1. Vidro plano (float)

Conforme Cledwyn-Davies (1993), o vidro plano é obtido através do escoamento do vitrificante derretido sobre uma base de estanho líquido, em atmosfera controlada. Nesse processo o vidro forma uma camada contínua que flutua sobre o banho, sendo mantida a alta temperatura, próxima a 1100°C, o tempo suficiente para que as superfícies fiquem perfeitamente planas e paralelas, esfriando ao longo do banho, sendo então retirada, a 600°C.

No Brasil, o mercado oferece vidros incolores com espessuras de 2 a 19mm e coloridos, nas cores cinza, verde, verde escuro e bronze, com espessuras de 2 a 10mm. Os vidros coloridos são produzidos pelo mesmo sistema dos vidros incolores, com a diferença da incorporação de aditivos minerais à mistura vitrificável, de acordo com a coloração desejada.

O processo de fabricação do vidro plano incolor, também chamado vidro liso ou vidro comum, é utilizado como base para a produção de outros tipos de vidros, como os coloridos, laminados e refletivos. As características óticas do vidro plano incolor de 3mm são geralmente adotadas como padrão de comparação com os demais tipos de elementos transparentes (Figura 2.8). O vidro plano incolor é ideal para aplicações que exijam perfeita visibilidade e alta transmissão de luz.

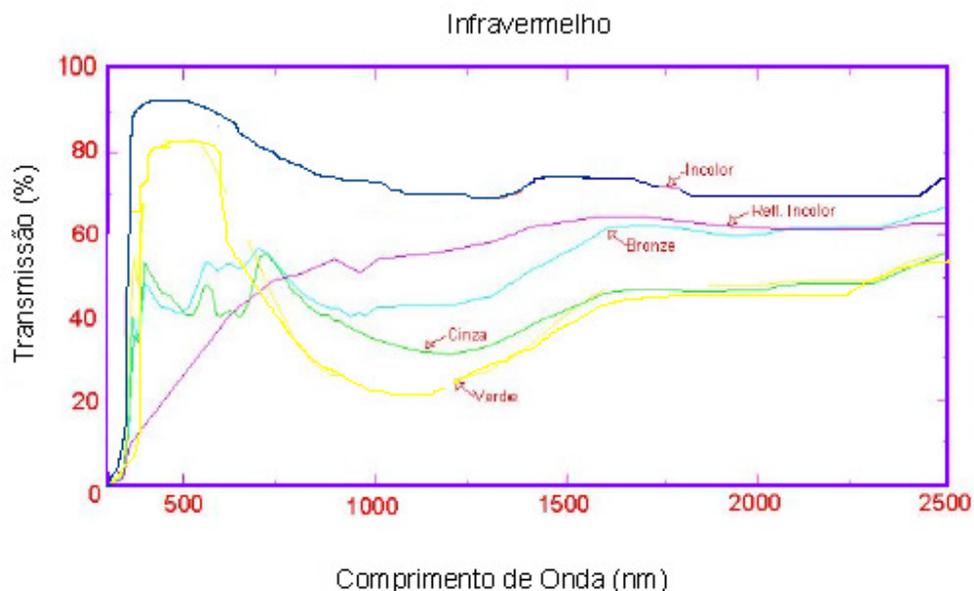


Figura 2.8. Transmissão da radiação solar nas regiões do ultravioleta, visível e infravermelho, para o vidro incolor, verde, bronze, cinza e refletivo incolor (fonte: Caram et al., 2001).

A maioria dos vidros incolores transmitem praticamente todas as radiações presentes no espectro solar, desde a região do infravermelho até o ultravioleta, passando pela visível. Essas radiações ao penetrarem nos ambientes, são absorvidas pelas superfícies internas, provocando uma elevação de sua temperatura e a consequente emissão de onda longa (até 10.000 nm) ao qual o vidro é opaco. Essa característica é a principal causa dos problemas do uso de grandes superfícies envidraçadas (CARAM, 2001).

2.4.2.1.2. Vidros e películas refletivos

Os vidros refletivos e os vidros com películas refletivas tem função de filtrar os raios solares através da reflexão da radiação em todas as suas frequências, de forma seletiva. Entretanto, devem ter suas suas características de desempenho térmico e óticas analisadas nas especificações de projetos de *retrofit* de envoltória, considerando, além destas propriedades, a refletância (ofuscamento), a cor do vidro (estética), os ganhos e perdas de calor, a orientação da fachada e finalidade da edificação.

Vidros refletivos

Vidros refletivos são vidros floats que recebem uma camada metálica, em uma de suas superfícies, on line ou off line, conferindo aos mesmos propriedades de controle térmico e de luminosidade. Dois processos são utilizados para a deposição da camada metálica: o processo de metalização a vácuo por sputtering (fora da linha de produção) e o pirolítico (dentro da linha de produção).

No processo de metalização a vácuo, a camada refletiva é depositada em câmaras de alto vácuo, por bombardeio iônico e em atmosfera de plasma, depois do vidro sair da linha de produção e ser resfriado (CASTRO, 2006). O resultado desse processo é a obtenção de vidros refletivos com bom desempenho de proteção solar, porém, com uma camada refletiva superficial, de baixa resistência. Sua utilização é recomendada pelos fabricantes somente na forma laminada, com a face metalizada em contato com a película de PVB ou em duplo envidraçamento, com a face metalizada no interior da composição insulada. Entretanto, este conjunto reduz consideravelmente a transmissão da luz visível.

A camada refletiva, aplicada pelo processo pirolítico, é depositada na face superior do vidro enquanto a placa ainda não esfriou, ou após sofrer novo aquecimento. Como a chapa de vidro está quente e com sua superfície em estado plástico, os óxidos penetram um pouco na superfície. Esse processo garante maior resistência à camada, sendo recomendado para aplicações que exijam maior resistência à camada refletiva. Estes vidros podem ser usados monolíticos, laminados, serigrafados ou temperados.

Neste trabalho, serão testadas alternativas com vidros da biblioteca do programa de simulação DesingBuilder, com características similares ao vidro Reflecta Float incolor, com 6mm, que se trata de um vidro monolítico, refletivo pelo processo pirolítico. A Tabela 2.6 apresenta o comportamento térmico do vidro frente a radiação solar.

Tabela 2.6 - Propriedades térmicas do vidro Reflect Float incolor, com 6mm (CEBRACE, 2009).

Transmissão Luminosa (%)		Transmissão energética (%)			FS* (%)	U* W/m ² K	CS*
Transmissão	Reflexão	Transmissão	Reflexão	Absorção			
29	54	37	38	24	44,3	5,94	0,509

FS* - Fator Solar

U* - Transmitância Solar

CS* - Coeficiente de sombreamento

Vidro com películas refletivas

No mercado existem três tipos de películas: transparentes, pigmentada não refletiva e pigmentada refletiva. As que garantem segurança ou proteção dos raios UV são as transparentes e quando se deseja o controle da luminosidade e privacidade pode-se usar as pigmentadas não refletivas (CARAM, 1998). As pigmentadas refletivas à onda curta reduzem o ingresso de calor no interior dos ambientes e as refletivas à onda longa reduzem as perdas de calor para o exterior.

As películas refletivas para proteção solar aplicadas diretamente sobre uma das faces do vidro podem ser pigmentadas na própria trama de poliéster (filme plástico transparente), metalizadas a vácuo, com alumínio, ou metalizadas por bombeamento iônico, conferindo uma aparência espelhada ao conjunto. As metalizadas a vácuo têm cor prata e associadas a outras camadas de poliéster pigmentado, originam cores do azul ao bronze refletivo e do cinza ao verde. As coloridas por bombeamento iônico oferecem, tons neutros

(GRILLO, 2005). Podem ser aplicadas em qualquer superfície de vidro, exceto em vidros impressos, devido a sua superfície rugosa.

As películas de controle solar têm sido utilizadas em obras já existentes, onde há necessidade de controle de transmissão luminosa e radiação solar. Nestes casos, é de se supor que a substituição dos vidros existentes por vidros de controle solar inviabilise o *retrofit* energético. A Tabela 2.7 apresenta as propriedades térmicas da película de controle solar avaliadas neste trabalho.

Tabela 2.7- Propriedades térmicas do conjunto: película refletiva prata e vidro 6mm, incolor (Intercontrol, 2009).

Transmissão Luminosa (%)		Transmissão energética (%)			FS (%)	U W/m ² K	CS
Transmissão	Reflexão	Transmissão	Reflexão	Absorção			
15	60	12	58	30	27	6,12	0,24

De acordo com Caram e Gilio (2001), as películas refletivas de controle solar apresentam reflexão superior a dos vidros metalizados a vácuo. Esta confirmação foi resultado de um trabalho experimental onde se comparou a reflexão dos dois materiais com ângulos de incidência variados (Figura 2.9).

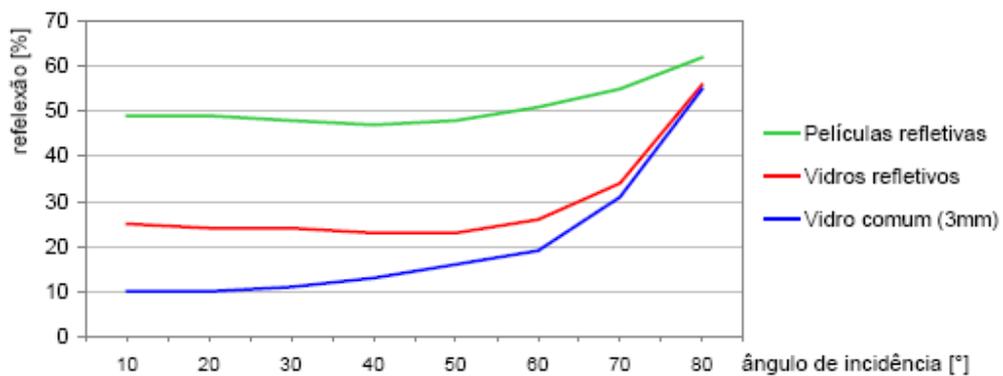


Figura 2.9- Reflexão nos vidros incolor, refletivos e películas (Caram e Gilio, 2001).

Vidro com películas de baixa emissividade (low-e)

A introdução de películas low-e com cores neutras para janelas se deu no início dos anos 80. Em 1987, janelas com este tipo de película representavam 17% das vendas no EUA, por se tratar de uma película de baixa emissividade (low-e), que reduz a transferência de calor (infravermelho longo) através das janelas, aumentando sua resistência térmica. A razão preço/desempenho do produto era melhor do que os envidraçados triplos, sendo rapidamente introduzido no mercado de escritórios e residências em climas quentes²⁶.

São chamados de envidraçados de baixa emissividade, ou na literatura internacional, de *low-e glazings*, tanto as películas para aplicação em janelas de edifícios existentes, quanto os vidros vendidos com a película já aplicada.

Segundo Caram (1998), sua eficiência vem de uma fina camada de óxido metálico aplicada em uma das faces do vidro. A deposição dessa camada de óxido pode ser feita utilizando-se dois processos. O mais conhecido é o pirolítico (hard-coat): a camada de óxido é pulverizada de forma contínua sobre o vidro durante o processo de fabricação float. A tecnologia a vácuo também pode ser utilizada, nesse caso, a deposição do óxido é feita em câmara hermeticamente fechada, por meio de bombardeio iônico.

São avaliadas pelo total de calor que emitem, quanto menor for a emissividade melhor o comportamento da película, pois menos ela absorverá. Qualquer superfície com uma emissividade (absorção) igual ou menor do que 20% é considerada uma superfície low-e (baixa emissividade). Uma emissividade mais baixa, aumenta a reflexão de calor que por sua vez aumenta a capacidade de isolamento térmica da janela por um fator de dois. A película apresenta reflexão seletiva para diferentes partes do espectro solar, refletindo a radiação de ondas longas e a maior parte da radiação infravermelha de onda curta da radiação solar incidente (ALUCCI et al., 2001).

Essencialmente a radiação visível é transmitida através das superfícies low-e (entre 70% e 80%), resultando em uma iluminação “fria” para interiores. As mais recentes, para uso comercial e residencial, rejeitam tanto calor quanto os vidros refletivos, embora os vidros de baixa emissividade pareçam vidros incolores comuns. Sua refletividade luminosa externa corresponde entre 8% e 10% (ALUCCI et al., 2001).

Neste trabalho, testou-se o desempenho da película low-e em uma das alternativas propostas de retrofit da envoltória para análise de sua performance térmica e energética em edifícios condicionados localizados na zona bioclimática 4. A Tabela 2.8 abaixo apresenta as

²⁶ Fonte: <http://www.usp.br/fau/deptecnologia/docs/bancovidros/low.htm>

propriedades térmicas do conjunto analisado: vidro 6mm, incolor + câmara de ar, com 10cm + vidro com película low-e.

Tabela 2.8- Propriedades térmicas do componente testado : vidro 6mm, incolor + câmara de ar, com 10cm + vidro com película low-e.

Transmissão Luminosa (%)*		Transmissão energética (%)*			FS (%)	U W/m ² K
Transmissão	Reflexão	Transmissão	Reflexão	Absorção		
74	5,5	6	84	10	56	1,76

* As informações se referem ao vidro com película low-e.

Fonte: Biblioteca do programa DesignBuilder. Acessado em 16/05/2009.

2.4.2.1.3. Vidro duplos ou insulados

O vidro duplo, também chamado de insulado, dependendo de sua composição pode proporcionar isolamento térmico e acústico. O sistema de envidraçamento duplo alia as vantagens técnicas e estéticas de pelo menos dois tipos de vidro. Entre os dois vidros há uma camada interna de ar ou de gás desidratado isolada com dupla selagem. A primeira selagem evita a troca gasosa, enquanto a segunda garante a estabilidade do conjunto (ALUCCI et al., 2001).

O sistema de envidraçamento duplo pode ser composto por qualquer tipo de vidro (temperado, laminado, colorido, incolor, metalizado e baixo emissor), destacando as qualidades entre eles, ou seja, é possível combinar vidros de propriedades diferentes, como a resistência (externa) dos temperados com a proteção térmica (interna) dos laminados. O vidro duplo também pode conter uma persiana interna (entre vidros). Esse sistema reúne todas as vantagens resultantes do vidro duplo, como o controle de luminosidade e privacidade.

Caram (1998) concluiu que a aplicação de películas *low-e* nas faces dos vidros melhorava a eficiência do sistema pelo aumento da resistência térmica do caixilho. Um vidro duplo, com a superfície *low-e* selada dentro da janela, bloqueia quase todo o tráfego do infravermelho, podendo ainda ter sua performance energética melhorada em 15% se o lado do vidro voltado para o interior for revestido com uma película pirolítica (resistente à abrasão, *thick coat*).

Em janelas duplas, um espaçador metálico é utilizado para juntar os dois painéis de vidro e as juntas são preenchidas com um desidratante para remover qualquer vapor d'água

aprisionado na unidade durante a fabricação. Os selantes orgânicos garantem uma vida útil de 20 anos, mas degradam em contato prolongado com a água, portanto o lado inferior da janela deve ser suspenso acima do caixilho com borracha para evitar contato com água acumulada. Os efeitos da ponte térmica são notados nos espaçadores metálicos quando a resistência térmica (R) se aproxima de 0,88 m².k/W (ALUCCI et al., 2001).

As grandes diferenças de temperatura, entre os painéis interiores e exteriores, em janelas de grande resistência térmica podem levar ao trincamento das bordas do vidro, problema que as janelas duplas tradicionais não desenvolviam pois não isolavam o suficiente para acarretar grandes diferenças de temperaturas entre os vidros.

Neste trabalho, serão testados em duas propostas de *retrofit* da envoltória a utilização de vidros duplos, intercalados por câmara de ar. A Tabela 2.9 abaixo apresenta as propriedades térmicas de uma das combinações analisadas: vidro incolor 6mm, com película refletiva + câmara de ar, com 5 cm + vidro reflecta float incolor, com 6mm (CEBRACE).

Tabela 2.9 - Propriedades térmicas do conjunto: vidro Reflect Float incolor, com 6mm (CEBRACE) + câmara de ar, com 5cm + vidro incolor, com 6mm, com película prata refletiva.

Transmissão Luminosa (%)	Transmissão Energética (%)	FS (%)	U W/m ² K
7	6	17	2,8

Fonte: Biblioteca do programa DesignBuilder. Acessado em 16/05/2009. Alternativa analisada:

Tabela 2.10 – Propriedades térmicas do conjunto: vidro laminado Cool lite, com 10mm (CEBRACE) + câmara de ar, com 5cm + vidro incolor, com 6mm, com película prata refletiva.

Transmissão Luminosa (%)	Transmissão Energética (%)	FS (%)	U W/m ² K
7	6	12	2,65

Fonte: Biblioteca do programa DesignBuilder. Acessado em 16/05/2009.

2.4.2.1.4. Vidro laminado

São constituídos por duas ou mais lâminas de vidro fortemente unidas através de calor e pressão a uma ou mais películas de Polivinil Butiral (PVB). Em caso de rompimento ou quebra acidental, a principal função da película de PVB é a de reter os fragmentos, fazendo com que a lâmina permaneça intacta, assegurando integridade às pessoas e/ou patrimônio. Além disso, o polímero apresenta também a propriedade elástica, podendo resistir a ações intencionais de quebra ou perfuração do vidro (CEBRACE, 2009).

Quando combinados vidros metalizados de diferentes performances e alternativas de vidros coloridos, têm-se diferentes resultados de controle solar como transmissão e reflexão luminosa e de calor. As espessuras podem variar de 6mm (dois vidros de 3mm) à 10mm (dois vidros de 5mm), de acordo com o tamanho da esquadria. Os vidros laminados também tem a propriedade de amortecer frequências sonoras permitindo isolamento acústico. A Figura 2.10 demonstra algumas configurações possíveis para um vidro laminado.

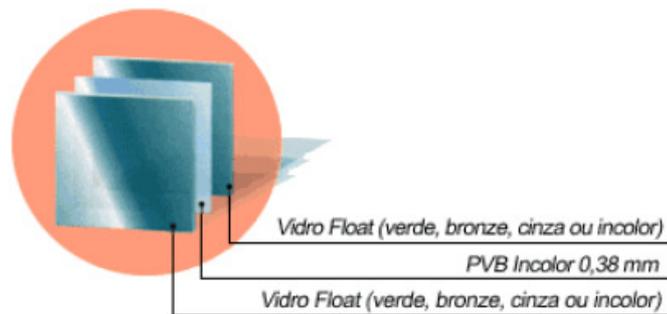


Figura 2.10 – Camadas do vidro laminado com PVB incolor (CEBRACE, 2009).

Neste trabalho, serão testadas duas alternativas com vidros da biblioteca do programa de simulação DesingBuilder com características similares ao do vidro Cool Lite Prata 120 PR- 5.5.1, que se trata de um vidro laminado composto de dois vidros com 5mm, refletivos pelo processo de metalização à vácuo, unidos por uma película de PVB, e também às similares ao do vidro laminado Cool Lite Prata 120 PR 4.4.1, composto de dois vidros com 4mm, refletivos pelo processo de metalização à vácuo, unidos por uma película de PVB. A Tabela 2.11 apresenta as propriedades térmicas dos dois tipos de vidros laminados.

Tabela 2.11 - Propriedades térmicas e ópticas do vidro laminado Cool Lite Prata (CEBRACE, 2009).

Código	Transmissão Luminosa (%)		Transmissão energética (%)			FS* (%)	U* W/m ² K	CS*
	Transmissão	Reflexão	Transmissão	Reflexão	Absorção			
PR - 4.4.1	20	30	14	28	58	30,5	6,2	0,35
PR - 5.5.1	19	29	13	28	59	29,9	6,13	0,344

Neste trabalho serão, portanto, testados os tipos de vidros e películas que possam reduzir a transmissão de radiação de onda curta para os ambientes internos com função de escritório e aqueles que apresentem características estéticas idênticas aos vidros existentes, de cor prata espelhado, pela necessidade de preservação do edifício tombado.

Algumas propostas utilizarão os vidros similares ao Reflecta Float prata (CEBRACE), monolítico ou duplo, com câmara de ar e ao laminado Cool Lite prata (CEBRACE), monolítico ou duplo, este último composto também por câmara de ar e vidro incolor, com 6mm com película de controle solar prata espelhada, pela propriedade de reflexão da radiação em todas as suas frequências, de forma seletiva. Será também testada a possibilidade de utilização do vidro duplo Low-e, com câmara de ar, pela resistência térmica apresentada pelo conjunto.

Capítulo 3 - Simulação computacional e análise de viabilidade financeira de *retrofits* energéticos

A vantagem da simulação computacional é a previsão de interações complexas sob uma diversidade de condições, predizendo cargas térmicas, condições do ambiente interno como temperatura e umidade, consumo de energia, demanda de energia e dimensionando equipamentos do sistema de condicionamento de ar (HAVES, 2004). Além disso, a possibilidade de análise de medidas combinadas, cujos resultados são diferentes do somatório dos resultados de medidas isoladas, devido as interações que ocorrem.

Uma parte da avaliação de investimentos para promover a eficiência energética de uma edificação é a avaliação econômica, a fim de mostrar se o investimento traz reais benefícios econômicos, sejam imediatos ou a longo prazo. As avaliações em eficiência energética são geralmente comparativas, focalizam Medidas de Conservação de Energia, MCE, (Energy Conservation Measures, ECM) passíveis de aplicação em um caso base (CARLO,2008).

Utilizam-se como referência no estudo da simulação computacional do desempenho térmico e energético, principalmente, os autores: Crawley et al. (2001), Karashima (2006), Hagel (2005), Lima (2007) e Strand (2000).

3.1. Simulação do desempenho termo-energético de edificações

Os programas para simulação computacional do desempenho termo-energético de edificações passaram a ser mais difundidos a partir da década de 70, após a crise do petróleo, com os problemas advindos pelo racionamento de energia elétrica. A facilidade de manipulação das variáveis de entrada, o baixo custo e o tempo de processamento dos dados contribuíram para a sua difusão entre projetistas.

Muitos programas tem sido desenvolvidos para simulação termo-energética de edificações, cuja finalidade é reproduzir um caso real através de um modelo, permitindo avaliar o comportamento térmico quando submetido a diferentes condições, tais como alterações nos

fatores climáticos, características geométricas, composição dos materiais construtivos da envoltória e cargas internas representadas por pessoas, sistema de iluminação artificial e equipamentos. As novas ferramentas computacionais permitem a análise de fenômenos complexos, como a transferência de calor em regime transiente através de componentes construtivos. Geralmente, problemas deste tipo envolvem cálculos matriciais e interações que dificultam sua resolução manual (WESTPHAL, 2002).

3.1.1. O programa Energyplus

O programa EnergyPlus é um “software” livre, desenvolvido e distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), tendo como precursores o BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) e o DOE-2, também concebidos pelo Departamento de Energia (DOE) dos Estados Unidos, ao fim da década de 70 (STRAND, 2000). A sua primeira versão, Beta, data do final de 1999, permanecendo em contínuo desenvolvimento. Apresentou a sua última versão, 3.1.0, em abril de 2009.

Este programa vem ganhando espaço junto a simuladores pelo fato de ter sido validado através do método BESTEST, da Standard 140 (ASHRAE, 2001). A ASHRAE recomenda o método do balanço de calor para cálculo e análises energéticas e é neste método que se baseia o EnergyPlus para cálculo de cargas térmicas multi-zonas em intervalos de tempo de 15 minutos ou até menos, contendo um código aberto para inclusão de novos módulos (CARLO, 2008).

As necessidades de simulação de edificações foram reunidas para o desenvolvimento conceitual do programa, que envolve o projeto de edificações, as necessidades ambientais atuais, parâmetros econômicos e o conforto dos usuários, criando então um programa com possibilidades de simulação integrada a outros módulos, como o uso de simulação da ventilação natural (CRAWLEY et al., 2001).

Foi criado, além disso, para sanar alguns problemas decorrentes do BLAST e DOE-2. Dentre eles, o código fonte confuso, baseado em versões mais antigas da linguagem de programação FORTRAN, a dificuldade para a alteração de dados de entrada, a impossibilidade de lidar com respostas (feedback) do sistema AVAC-R nas condições das zonas climatizadas e o rápido desenvolvimento das tecnologias de AVC-R (KARASHIMA, 2006). Foram eliminadas

as várias interconexões entre diferentes partes do programa e a necessidade de conhecer todo o código fonte do programa para realizar uma alteração num ponto específico deste.

Segundo Strand (2000), o programa computacional Energyplus apresenta algumas características que o destacam a frente de diversos programas:

- Solução simultânea e integrada em que a resposta do edifício e do sistema primário e secundário estão acoplados;
- Intervalos de tempos definíveis pelo usuário, com fração de hora, para interação entre as zonas térmicas, o ambiente e o sistema HVAC;
- Arquivos de entrada (input), de saída (output) e climáticos, que incluem condições ambientais horárias ou sub-horárias;
- Técnica de solução baseada no balanço de energia para cargas térmicas prediais, permitindo o cálculo simultâneo dos efeitos radiante e convectivo nas superfícies interiores e exteriores;
- Modelo de conforto térmico baseado na atividade, temperatura de bulbo seco interna e umidade (Fanger, Pierce e Ksu);
- Cálculo de balanço de calor da janela que permite o controle eletrônico de persianas, balanço térmico camada por camada;
- Biblioteca versátil com diversos modelos de janela disponíveis comercialmente;
- Controle da luz natural, incluindo cálculos da iluminância interior e do efeito da iluminação artificial;
- Sistemas HVAC configuráveis que permitem aos usuários modelar sistemas típicos comuns e sistemas pouco modificados, sem ter que recompilar o código de fonte do programa.

Segundo Karashima (2006), os modos de entrada e saída do Energyplus foram idealizados de modo que o programa fosse utilizado como um algoritmo para que outros designers de interfaces utilizassem-no em seus programas. Os textos de entrada e de saída são apresentados na forma ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), podendo ser lidos por uma interface gráfica de apresentação amigável.

Os dados para simulação são inseridos através de dois arquivos de entrada manipulados pelo usuário: os dados de entrada IDF, de extensão “.idf” (*input data file*), correspondem a todos os parâmetros de entrada, exceto dados climáticos e o arquivo de dados climáticos, de extensão “.epw” (*energy plus weather file*). Este último pode ser obtido no próprio site do programa. Os dados climáticos de 1100 cidades disponibilizados neste *site* são

organizados pela WMO (Weather Meteorological Organization). De acordo com este órgão, a América do Sul ocupa a região 3. Para Brasília existem duas fontes de dados climáticos: a da IWECC (*International Weather for Energy Calculation*) e a da SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*).

O Departamento de Energia dos EUA (DOE) licenciou o arquivo climático IWECC da ASHRAE e o distribui gratuitamente em sua página da internet (www.eere.energy.gov), em formato compatível com o programa de simulação Energyplus que será adotado nesta pesquisa.

3.1.1.1. Arquivos Climáticos

Há vários arquivos climáticos desenvolvidos para cálculo de consumo de energia elétrica, em geral, registrando dados de hora a hora, até atingir as 8760 horas que formam um ano completo de 365 dias. Os mais utilizados em programas de simulação computacional termo-energética são: “Typical Meteorological Year” (TMY) ou Ano Meteorológico Típico, que foi preparado pelo “Sandia Laboratories”, na cidade de Albuquerque; o “Test Reference Year” (TRY) ou Ano Climático de Referência (ACR), que foi elaborado pelo “US National Climatic Data Center” e o “International Weather for Energy Calculations” (IWECC) ou Clima Internacional para Cálculo de energia, que foi resultado de pesquisa 1015 da ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers) de análise de dados climáticos registrados pelo “US National Climatic Data Center” .

O arquivo TMY é um método empírico de aproximação que seleciona meses individuais de diferentes anos ao longo de um período. O mês julgado mais típico é selecionado para ser incluído no TMY , e, da mesma maneira, são selecionados os demais meses do ano, e portanto 12 meses típicos formam um ano completo de dados climáticos²⁷.

O TRY (Test Reference Year) é um Ano Climático de Referência, resultado de um tratamento de 30 anos de dados climáticos em que são eliminados os anos que apresentam a menor e a maior temperatura da série. Por fim, é selecionado o ano cujas temperaturas não apresentam extremos. Apesar do TRY ser gerado a partir de dados de temperatura apresenta

²⁷ As informações foram coletadas do site: <http://pvcdrom.pveducation.org/SUNLIGHT/TMY.HTM>

ainda dados de umidade, direção e velocidade dos ventos, cobertura de nuvens, pressão atmosférica e, às vezes, radiação solar (LAMBERTS et al., 2005).

O arquivo IWECC apresenta dados climáticos típicos adequados para uso em simulação energética de edifícios. Os dados foram analisados, hora a hora, pelo “US National Climatic Data Center” ao longo de 18 anos. Contém radiação solar estimada de acordo com a geometria da terra e movimentos de rotação e translação, além de dados climáticos de várias cidades do mundo.

Neste trabalho, será utilizado o IWECC, pois os mesmos fornecem dados mais recentes que os apresentados pelo TMY e TRY. Os arquivos TMY e TRY analisam dados de 1961 a 1990, enquanto o IWECC apresenta dados climáticos de 1984 a 1997 (HAGEL, 2005).

3.1.1.1.1. O arquivo IWECC para Brasília

O arquivo IWECC é composto por três arquivos nas extensões “.ddy”, “.epw” e “.stat”. O arquivo em extensão “.ddy” contém dados de localização de Brasília, conforme a Figura 3.1, além dos dados de temperatura de bulbo seco, velocidade do ar, umidade relativa e demais dados climáticos necessários para a descrição dos dias típicos de verão e de inverno.

Location, BRASILIA_BRA IWECC Data,	!- Location Name
-15.87,	!- Latitude {N+ S-}
-47.93,	!- Longitude {W- E+}
-3.00,	!- Time Zone Relative to GMT {GMT+/-}
1061.00;	!- Elevation {m}

Figura 3.1- Dados climáticos da cidade de Brasília apresentado pelo IWECC

O arquivo em extensão “.stat” apresenta:

- Temperaturas de bulbo seco máximas e mínimas de cada mês;
- Temperatura horária média de um dia típico;
- Indicações mensais de precipitação/ umidade;
- Velocidade e direção do vento;
- Valores de irradiação solar direta média, máxima e difusa média, etc.

E o arquivo em extensão “.epw” contém todos os dados climáticos relatados acima, declarados hora a hora, ao longo de um ano completo (365 dias - 8760 horas).

3.1.1.2. Método de cálculo do programa EnergyPlus

O EnergyPlus é uma coleção de vários módulos de programas que trabalham em conjunto para calcular a energia requerida para aquecer ou resfriar um edifício utilizando diferentes sistemas de climatização e fontes de geração de energia. Isto é feito através da simulação do edifício e dos sistemas energéticos associados submetidos a diferentes condições ambientais e de operação. O núcleo da simulação é o modelo do edifício baseado nos princípios fundamentais do balanço de calor.

Baseado no conceito de balanço térmico, o método CTF (*Conduction Transfer Functions*), recomendado pela ASHRAE e utilizado pelo EnergyPlus, é a ferramenta mais moderna disponível atualmente para análise térmica, hora a hora, de edifícios. Este método, por suas características é adequado para simulação computacional, uma vez que é possível descrever o ganho térmico de calor através de paredes utilizando poucos coeficientes e com pouca precisão. O método das CTF's é também conhecido como o método das funções de transferência, TFM (*Transfer Function Method*). Este método baseado em cálculos computacionais se dá em duas etapas, inicialmente determinando o ganho de calor de todas as fontes e depois convertendo esse ganho de calor em carga térmica. A estimativa da carga térmica de um edifício requer o cálculo, superfície a superfície, do balanço de calor condutivo, convectivo e radiativo para cada superfície da zona e o balanço de calor para o ar da zona (KARASHIMA, 2006).

O EnergyPlus realiza uma simulação integrada. Isto significa que três dos grandes componentes – o edifício, o sistema de climatização e a fonte de geração de energia têm de ser solucionados simultaneamente. A implementação de uma estrutura baseada numa filosofia de gerenciamento, que exerce controle sob os diversos subprogramas, tornou mais simples e explícitas as interconexões entre os módulos do programa. A sub-rotina *Manager Simulation*, instalada no final do tronco principal de cálculo, comanda quatro dos cinco principais laços de simulação: ambiente externo, dia do ano, hora e incrementos temporais sub-horários; sendo este último controlado pelo gerenciador de HVAC. O EnergyPlus cria os “links” entre os módulos do programa, utilizando seus algoritmos, e outros ambientes de simulação, tais como WINDOWS 5 (modelagem e simulação térmica de janelas), COMIS (modelagem e simulação do fluxo de ar), TRNSYS (simula o desempenho transiente de sistemas térmicos) e SPARK (solucionador de equações diferenciais e algébricas), que permitem a análise mais detalhada dos componentes do prédio.

Existem cinco gerenciadores que organizam todo o funcionamento do EnergyPlus: o gerenciador da simulação, o gerenciador da solução integrada, o gerenciador de balanço de calor de superfície, o gerenciador de balanço de calor do ar e o gerenciador da simulação dos sistemas do edifício. O gerenciador da solução do EnergyPlus está contido em um único módulo separado de todos os outros. O gerenciador da solução integrada comanda os outros três comandos. (Ver Figura 3.2).

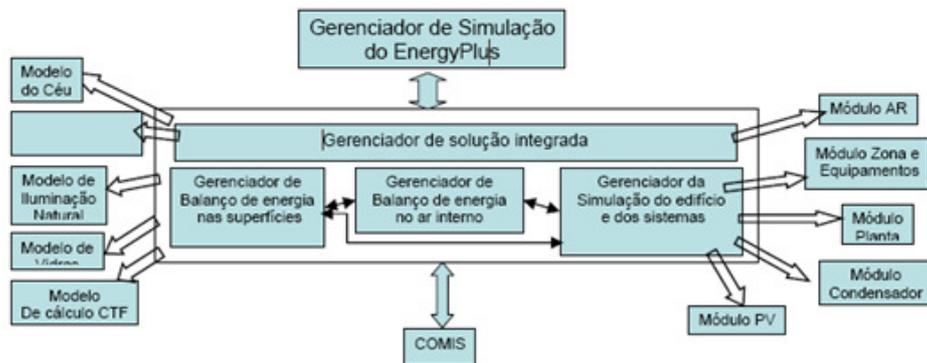


Figura 3.2- Esquema geral do EnergyPlus.
Fonte : Adaptado de Karashima, 2006.

Além disso, apresenta ferramentas que ajudam a criar arquivos de entrada, tais como o EP-Launch, que é a alternativa para realizar simulações através do ajuste de exemplos de arquivos existentes ou pela criação de novos. Esta ferramenta permite, ainda, a seleção do arquivo climático e acesso ao IDF-Editor, que é uma interface amigável para os dados de entrada, permitindo que os dados sejam adicionados nos módulos com informações distintas (sistema de iluminação, HVAC, materiais construtivos, etc.) e impedindo que aqueles que necessitam de complemento de informação sejam declarados, alertando assim, sobre a falta de uma entrada anterior. Os arquivos gerados nesta interface são automaticamente criados como .idf.

Sua principal desvantagem, ou o que torna difícil o seu uso por projetistas, é o fato de não possuir uma interface gráfica amigável com o usuário. Sendo por isso desenvolvido pelo National Renewable Energy Laboratory, a pedido do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), o plugin Openstudio. Este plugin utiliza as ferramentas do Sketchup para a criação e edição da geometria do edifício nos arquivos de entrada do EnergyPlus.

Além disso, a entrada de dados para a simulação são digitados, devendo obedecer aos padrões de sintaxe básica utilizados pelo programa (LIMA, 2007). O programa Energyplus

apresenta a limitação de aceitar qualquer valor para os dados de entrada, salvo os que possuam um valor limite, os quais podem ser visualizados no relatório de erros do programa.

3.1.2. Programa DesignBuilder - A interface gráfica utilizada

O programa de simulação computacional DesignBuilder, é um um “software” privado, criado pela empresa Designbuilder Software Ltd, situada em Stroud, condado de Gloucestershire, Inglaterra. Sua versão 1.0 foi lançada em dezembro de 2005. Consiste numa ferramenta para simulação do desempenho térmico e energético de edificações. Para isso, a interface utiliza os algoritmos do EnergyPlus, corrigindo suas limitações gráficas no processo de modelagem.

Foi especialmente desenvolvido para ser utilizado em qualquer etapa do processo de concepção. Nele é possível a modelagem geométrica detalhada do edifício e de seus componentes construtivos. Sua metodologia permite que os mais complexos edifícios possam ser modelados rapidamente. As variáveis de entrada ou os modelos pré-existentes a serem introduzidos permitem a construção de geometrias, construções, hábitos de consumo, HVAC & sistema de iluminação artificial, facilitando a análise paramétrica para a investigação dos efeitos destas variações²⁸.

O programa combina interface interativa de modelagem em 3D, gerando imagens renderizadas e filmes, com efeitos de sombreamento. A modelagem Open-GL permite a construção de um edifício, com vários pavimentos, através da sobreposição dos blocos. Os blocos podem ser cortados e esticados para ajustes na geometria. Alterações de projeto ou nas características termo-energéticas podem ser feitas ao nível do edifício ou somente a um bloco ou uma zona.

A partir do modelo geométrico e da escolha do arquivo climático é possível fazer a configuração geral ao nível “*Building*” das superfícies que se repetem em todos andares, acionando a aba *Construction*, tais como: lajes intermediárias, partições internas, brises verticais e das paredes (empenas). Outras informações (entrada de dados) também podem ser efetuadas a este nível, como as características do sistema de iluminação (aba *Lighting*) e

²⁸ Fonte: <http://www.designbuilder.co.uk>.

HVAC, uso de ventilação natural e taxas de infiltração²⁹, caso sejam adotados os mesmos parâmetros em todas as zonas.

Uma vez razoavelmente desenvolvido pode ser exportado para o programa EnergyPlus, para que em casos específicos, como para cálculo de ventilação cruzada e iluminação natural, possam ser complementados por dados de entrada específicos, não suficientemente detalhados no programa.

Detalhadamente, o programa possibilita a análise das seguintes variáveis:

- Sítio: localização geográfica e dados climáticos;
- Cargas e modelos dos sistemas de aquecimento e resfriamento;
- Ganhos internos: ganhos de calor de radiação por aberturas e internos devido a rotinas de equipamentos, iluminação e ocupação;
- Ganhos térmicos: fluxo de calor total nos elementos construtivos (paredes, aberturas e coberturas);
- Iluminação: modelos e sistemas de controles e integração de iluminação natural e artificial;
- Cálculo de ventilação: além das perdas térmicas por ventilação mecânica, o programa calcula a taxa de renovação e de infiltração, por hora, de um ambiente.

Podendo gerar os seguintes resultados através de gráficos ou planilhas:

1. Cálculo do consumo de energia. O programa fornece relatórios de consumo de climatização (chiller, fans, pumps), iluminação e equipamentos, além do consumo de outros tipos de combustível;
2. Consumo total: consumos totais dos combustíveis usados;
3. Estimativa de produção de CO₂;
4. Cálculo do desempenho térmico: relatórios de saída sobre as trocas térmicas por paredes externas, paredes internas, pisos, infiltração, ventilação, dentre outros e os ganhos térmicos internos provenientes da ocupação e da incidência de radiação por aberturas;
5. Conforto: análises de conforto térmico pelo método de Fanger, Pierce, etc;
6. Predição de temperatura interna do ar, temperatura radiante média e umidade relativa.

²⁹ Infiltração é a taxa de trocas de ar incontrolada através das aberturas não intencionais que ocorrem sob dadas circunstâncias (ASHRAE, 2001b). A taxa de infiltração de uma construção depende do clima, operação do equipamento de medição, atividades dos ocupantes e da geometria das aberturas (Lamberts et al., 2005).

Optou-se neste trabalho pela utilização do programa DesignBuilder devido à confiabilidade de seu algoritmo baseado no Energyplus e à sua versatilidade de modelagem devido à interface gráfica. Embora o programa apresente limitações na análise energética, devido a caracterização do coeficiente de desempenho do ar condicionado (COP) ser fixa, ou seja, sem acesso ao monitoramento das curvas de desempenho do equipamento utilizado (splits), Lima (2007) verificou que essas limitações, apesar de acarretarem alguma imprecisão nos resultados, não comprometem a validade das simulações realizadas.

3.1.3. Calibração do modelo

A simulação do comportamento térmico de uma edificação se inicia na representação do objeto de estudo por um modelo. O modelo é uma abstração da realidade compilado segundo a linguagem de seu código de programação, e formado por centenas ou milhares de variáveis. Cada variável quantifica ou caracteriza uma característica de edificação, desde propriedades do material empregado na sua construção, à forma de operação do condicionamento de ar (PEDRINI, 1997).

Modelos de edificações que representam uma população são geralmente chamados de protótipos de edificações e são gerados a partir de uma série de dados adquiridos por levantamentos. Quando o modelo a simular não é um protótipo, mas um modelo baseado em uma edificação real, este ainda deve ser calibrado a fim dos resultados reproduzirem o desempenho térmico mais semelhante possível ao caso real (CARLO, 2008).

A calibração é uma etapa necessária e importante, pois consiste em comparar dados de desempenho real com os de simulação, com objetivo de corrigir as variáveis de entrada para melhorar a fidelidade do modelo. Ao utilizar ferramentas de simulação para análises térmicas e energéticas em edificações, é importante que o modelo represente com boa precisão o uso final de energia da edificação real. O consumo mensal e anual pode estar bem representado, mas a composição do uso final de energia (iluminação, equipamentos e ar condicionado) pode estar fora da realidade. Neste caso, as avaliações das propostas de melhorias nos sistemas poderão ser comprometidas.

Durante a modelagem de uma edificação é necessário verificar a confiabilidade dos resultados e se os dados de entrada mais relevantes foram inseridos corretamente. A análise de sensibilidade (WESTPHAL, 2007) é utilizada para indicar quais parâmetros exercem maior

influência nos dados de saída sob estudo. A quantidade de horas que os equipamentos, sistemas de iluminação e condicionamento de ar ficam em funcionamento (*schedules*) é uma informação vital para a calibração do modelo (MENDES,1999).

A calibração é feita para a simulação de um ano completo. A análise poderá ser horária, mensal ou anual, sendo que os resultados devem apresentar variação máxima (em módulo) de 20% mensal e 5% anual. (WESTPHAL, 2007).

A metodologia para calibração de um modelo de edifício definida por Westphal e Lamberts (2002) apresenta uma sequência de etapas para a calibração de um modelo de edifício, no qual o processo de simulação se inicia através da construção de um modelo básico (mínimo de variáveis), que será progressivamente refinado (inclusão de variáveis detalhadas) no decorrer das etapas, até o momento em que se possa estimar o consumo da edificação com o grau de precisão desejado. O procedimento é proposto para minimizar o longo tempo gasto na calibração de um modelo durante a simulação computacional, sendo apresentado em 6 etapas.

- A primeira etapa consiste em representar as cargas constantes, sem dependência do clima externo (iluminação e equipamentos), e seus padrões de uso em uma geometria qualquer.

- A segunda etapa, com a iluminação e equipamentos calibrados, consiste na análise de fluxo de calor nos dias de projeto, onde se caracterizam o envelope (geometria, janelas, proteção solar, orientação solar) e o sistema de condicionamento de ar fictício, o qual o EnergyPlus chama de “purchased air”. Nesta etapa o período de simulação necessário compreende apenas os dias típicos ou de pico de carga, para inverno e verão.

- A terceira etapa é direcionada para análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada com trocas de calor significativas, ou seja, a análise é aplicada para verificar o grau de influência que os dados de entrada (input) provocam no consumo de energia elétrica do condicionamento de ar do modelo (output), para um dia típico.

- Na quarta etapa, as variáveis de maior influência e incertezas são analisadas detalhadamente, ajustando os parâmetros de grande importância no comportamento térmico do modelo.

- Na quinta etapa, substitui-se o sistema de condicionamento de ar fictício pelo real, simulando o modelo para todos os dias do ano. A sexta etapa é reservada para ajustes finais, da qual obtém-se o modelo calibrado.

A necessidade de simular modelos para todos os dias do ano ocorre apenas nas últimas etapas, o que reduz o tempo gasto em modelos preliminares, já que o período de

simulação e o detalhamento do modelo são diretamente proporcionais ao tempo que o programa gasta na simulação.

3.2. Análise da viabilidade financeira de *retrofits* energéticos

Em projetos de *retrofit* energético, a identificação de potencialidades de economia de energia são feitas na etapa de pré-diagnóstico através da determinação dos *retrofits* energéticos (envoltória, iluminação, ar condicionado, etc.) passíveis de execução. Na etapa de diagnóstico é definida a linha de base do projeto, de acordo com o plano de medição e verificação desenhado, e sempre se baseando no Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP). A etapa de execução compreende as atividades de engenharia e obras previstas no projeto e será sucedida pela etapa de verificação, onde os reais ganhos de economia de energia e redução de demanda na ponta serão obtidos, através da comparação das medições e dados da instalação pós-*retrofit* com aquelas estabelecidas na linha de base³⁰.

Segundo Carlo (2008), a avaliação econômica dos investimentos para promover a eficiência é necessária para evidenciar os reais benefícios econômicos, sejam imediatos ou a longo prazo. Diversos são os métodos adotados, desde a análise de retorno do investimento à análise do custo do ciclo de vida, passando pelo custo-benefício e custo da energia conservada.

Para se verificar a viabilidade financeira de um empreendimento na Construção Civil, necessariamente, deve-se determinar, mesmo que de forma estimada, o custo envolvido em sua produção, pois, como bem afirmam Andrade e Souza (2003), este é fator limitante para sua concepção e implementação. Um projeto de *retrofit* de envoltória ideal, do ponto de vista do conforto ambiental e eficiência energética, é aquele que oferece uma boa solução técnica e ainda se mostre viável economicamente para ser aceito.

Nos investimentos de alternativas de *retrofits*, calculados através da viabilidade econômica, deve-se apenas considerar como investimento as reformas da envoltória que vão proporcionar uma melhor eficiência para a edificação em estudo. Na maioria das vezes o custo acaba sendo mais caro que o previsto pela mudança de outros equipamentos que não estejam relacionados à eficiência do prédio (WESTPHAL et al., 2002).

³⁰ Informação retirada do Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética da ANEEL (2008).

Como o Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos se refere a projetos de eficiência energética, os benefícios devem ser considerados como a soma da energia conservada. Desta maneira, será utilizado para avaliação econômica das alternativas de *retrofit* de envoltória neste trabalho, o método da Relação Custo-Benefício (RCB)³¹, utilizado pela ANEEL³² e pelo RTQ-C (INMETRO, 2009) para avaliação de projetos de eficiência energética. Segundo o Manual do Programa de Eficiência Energética da ANEEL, os critérios para avaliação econômica dos projetos devem ser utilizados tanto para os projetos conceituados por segmento e voltados ao uso final, quanto para os projetos pelo lado da oferta, voltados à melhoria do fator de carga.

Define ainda, que todos os projetos de *retrofits* energéticos devem ter sua relação custo-benefício (RCB) calculada sob a ótica da sociedade. Se um projeto tiver mais de um uso final (iluminação, refrigeração, etc.) cada um desses usos finais deverá ter sua RCB calculada através da equação:

$$RCB = \frac{\text{Custos Anualizados}}{\text{Benefícios Anualizados}} = RCB = \frac{(CT \times FRC)}{(EE \times CE)}$$

Onde:

- RCB é a relação custo-benefício;
- CT ou CA_{total} é o custo apropriado do projeto [R\$];
- FRC é o fator de recuperação de capital;
- EE é a energia elétrica conservada [MWh/ano];
- CE é o custo evitado de energia [R\$/MWh]

Sendo o cálculo do fator de recuperação de capital (FRC):

$$FRC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Onde:

- CT - Custo total do projeto (custos diretos + custos indiretos)
- n - vida útil (em anos)
- i - taxa de juros (taxa de desconto)

³¹ Relação custo-benefício ou RCB é um indicador que relaciona os benefícios de um projeto ou proposta, expressos em termos monetários, e o seus custos, também expressos em termos monetários. Tanto os benefícios como os custos devem ser expressos em valores presentes. (Fonte: Wikipédia, 2009).

³² O Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética da ANEEL foi aprovado pela Resolução Normativa nº 300, de 12 de fevereiro de 2008. É um guia determinativo de procedimentos dirigido às empresas, para elaboração e execução de projetos de eficiência energética regulados pela ANEEL.

Deverá, também, ser apresentada a RCB global do projeto por meio da média ponderada das RCBs individuais. Os pesos serão definidos pela participação percentual da energia economizada em cada uso final. O Manual do Programa de Eficiência Energética de 2008, da ANEEL, define uma relação custo-benefício de 0,80 para projetos de eficiência energética.

Segundo o mesmo manual, a taxa de desconto (i) a ser considerada na avaliação financeira é de, no mínimo, 8% a.a. Essa taxa tem por base o Plano Nacional de Energia – PNE 2030, conforme Nota Técnica 1.04.26.07A, da Empresa de Pesquisa Energética – “Taxa de desconto aplicada na avaliação das alternativas de expansão”.

Outra variável aplicada no cálculo do RCB é a vida útil de equipamentos ou materiais construtivos empregados nos *retrofits* energéticos. Conforme a NBR 15575-1:2008, a vida útil é uma indicação do tempo de vida ou da durabilidade de um edifício e suas partes. A vida útil de projeto (VUP) é definida no projeto do edifício e de suas partes como uma aproximação da durabilidade desejada pelo usuário, representando uma expressão de caráter econômico de uma exigência do usuário, contemplando custos iniciais, custos de operação e de manutenção ao longo do tempo.

A Tabela 3.1 detalha a vida útil exigida pela Norma 15575 Parte 1 - 2008 para os componentes construtivos a serem testados nas propostas de *retrofit* da envoltória deste trabalho.

Tabela 3.1- Vida útil de componentes construtivos testados nas propostas de *retrofit*

Componentes construtivos	Exemplos	VUP anos	
		Mínimo	Superior
Cobertura	Telhamento da cobertura, isolamento	≥ 20	≥30
Esquadrias externas (fachadas)	Janelas, peitoris e esquadrias	≥ 20	≥30

Fonte: ABNT /CB-02 - Projeto 02.136.01-001/1- junho/2007

A Norma ABNT 15575-1(2008) adota o período de 40 anos como vida útil de projeto mínima (VUPmínima) e o período de 60 anos como vida útil de projeto superior (VUPsuperior), sendo que a escolha de um ou outro período cabe aos intervenientes no processo de construção. Os elementos, componentes e instalações das edificações habitacionais, submetidos a intervenções periódicas de manutenção e conservação segundo instruções

específicas do fornecedor, devem manter sua capacidade funcional durante toda a vida útil prevista no projeto. Estas recomendações podem se estender a edifícios de escritórios.

Para que a vida útil de projeto seja atingida é necessário o emprego de produtos com qualidade compatível, a adoção de processos e técnicas que possibilitem a obtenção da VUP, o cumprimento, por parte do usuário e do condomínio, dos programas de manutenção e das condições de uso previstas (NBR 15575-1:2008).

Capítulo 4 - Arquitetura moderna, preservação e tombamento

Neste capítulo serão caracterizados os edifícios públicos de Brasília, localizados no eixo monumental, destacando a importância da sua preservação e reabilitação.

4.1. Preservação da arquitetura moderna - O caso do Plano Piloto de Brasília

Capital do Brasil desde 1960, Brasília originou-se de projeto escolhido em concurso público e de autoria de Lúcio Costa. A proposta partia do cruzamento de dois eixos, correspondentes às duas principais vias do Plano Piloto, denominadas Eixo Monumental e Eixo Rodoviário, evocando rituais da posse representada pela nova capital, que possibilitaria a ocupação do interior brasileiro através da região Centro Oeste (KOHLSDORF, 1985).

Segundo Ficher (1982), a hierarquização das funções urbanas possibilitou a Oscar Niemeyer liberdade total na concepção dos principais edifícios institucionais, dos quais podemos destacar a Esplanada dos Ministérios, o Palácio Itamaraty, o Congresso Nacional e os anexos, destinados em grande parte para ambientes de escritórios.

Em 7 de dezembro de 1987, a cidade foi reconhecida como “Patrimônio Cultural da Humanidade”, e incluída na lista dos bens de valor universal pelo Comitê do Patrimônio Mundial, Cultural e Natural da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), por ser a única capital do mundo totalmente projetada e construída dentro dos ideais modernistas. A Lista de Patrimônio Mundial é formada atualmente por 878 localidades de “grande valor universal” em 145 Estados-membros. Do total, 679 são culturais, 174 naturais e 25 mistos.

O conjunto urbanístico do Plano Piloto de Brasília, foi tombado pelo Instituto do Patrimônio Artístico Nacional – IPHAN³³, órgão federal responsável pela preservação dos bens

³³O Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) é uma autarquia do Governo do Brasil, vinculado ao Ministério da Cultura, responsável pela preservação do acervo patrimonial, tangível e intangível, do país. Fonte :Wikipédia. Acessado em 14/07/2009.

de reconhecido valor nacional. A área tombada, definida pelo Decreto nº 10.829/87³⁴ do Governo do Distrito Federal, alcança 112,25 km², sendo considerada a maior área urbana tombada do mundo. A proteção se dará a partir das quatro escalas urbanísticas adotadas: monumental, gregária, residencial e bucólica (Figura 4.1) (GRILLO, 2005).

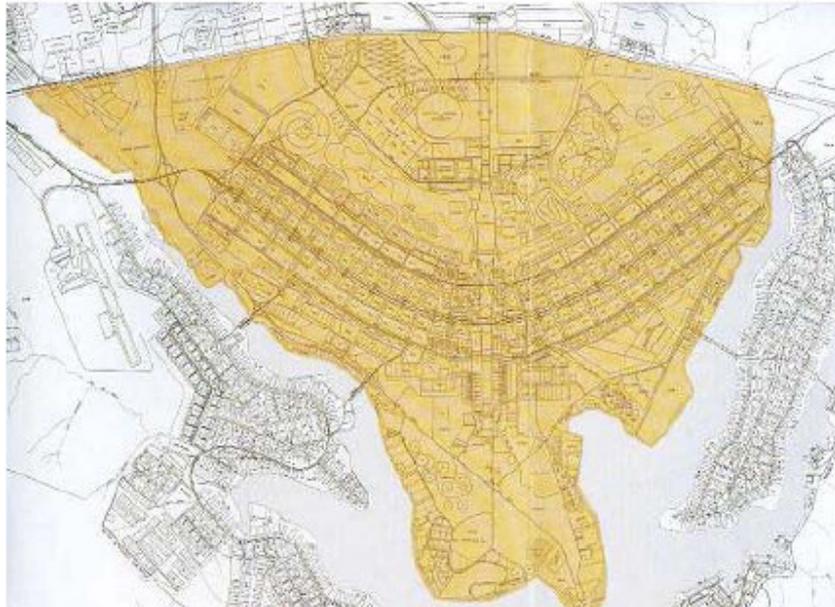


Figura 4.1- Delimitação da área tombada do conjunto urbanístico de Brasília.

Fonte: GOULART, 2006.

O tombamento federal da cidade foi efetivado em 14 de março de 1990, com a inscrição de nº 532 no Livro do Tombo Histórico, e disciplinado por meio da Portaria nº 314, de 14 de outubro de 1992. Também a Lei Orgânica evidenciou, em inúmeros dispositivos de nossa Carta Política, a importância do tombamento, a saber:

Art. 295. As unidades de conservação, os parques, as praças, o conjunto urbanístico de Brasília, objeto de tombamento e Patrimônio Cultural da Humanidade, bem como os demais bens imóveis de valor cultural, são espaços territoriais especialmente protegidos e sua utilização far-se-á na forma da lei.

A arquitetura modernista brasileira passou a ser saudada como símbolo mais visível do progresso, da industrialização, da independência e identidade nacional do Brasil, sendo

³⁴ O Decreto nº 10.829, de 14 de outubro de 1987, que regulamentou o artigo 38 da Lei Santiago Dantas, no que se refere à preservação da concepção urbanística de Brasília, foi baseado no documento Brasília Revisitada, elaborado por Lúcio Costa, nos anos 1985-87, que trata das questões de complementação preservação, adensamento e expansão urbana servindo como base jurídica necessária a inscrição junto à UNESCO. Fonte: GOULART, 2006.

adotada pelos governos nos níveis federal, estadual e municipal. Com Brasília, houve a afirmação plena do movimento modernista (FICHER & ACAYABA, 1982, p.48), inclusive na construção dos edifícios de escritórios que foram posteriormente projetados por arquitetos influenciados pelas idéias modernistas .

Decorrente do crescimento urbano, a década de 1990 trouxe transformações nos setores centrais de Brasília. Neste contexto, são construídas edificações para escritórios caracterizadas por uma linguagem variante do modernismo clássico por sua relação com o espaço público e empobrecimento da linguagem arquitetônica (KOHLSDORF,1985). Ainda hoje, comparando-se com trechos semelhantes e antigos, mostra-se a exacerbação destas tendências nos Setores Comerciais e Bancários Sul e Norte.

4.2. Preservação de bens culturais

Além da legislação nacional específica e de outros instrumentos legais, a preservação de bens culturais é orientada por Cartas, Declarações e Tratados Nacionais e Internacionais. Entre as Cartas Internacionais, destacamos a Carta de Burra (Austrália, 1980). Considerando a Carta Internacional para a Conservação e Restauro dos Monumentos e Sítios (Carta de Veneza, 1964) e as resoluções da 5.ª Assembleia Geral do Conselho Internacional para os Monumentos e Sítios (ICOMOS), Moscovo, em 1978, a Carta de Burra foi adotada pelo ICOMOS da Austrália (The Australian National Committee of ICOMOS) em 19 de Abril de 1979, em Burra, Austrália do Sul, por indicar linhas de orientação geral para a conservação e para a gestão dos sítios com significado cultural, incluindo os sítios naturais, indígenas e históricos.

No seu o Artigo 1º, estabelece que o termo conservação “designará os cuidados a serem dispensados a um bem para preservar-lhe as características que apresentem uma significação cultural”. A Carta de Burra advoga uma abordagem cautelosa às alterações: fazer tão pouco quanto seja necessário para cuidar do sítio e torná-lo utilizável e, por outro lado, alterar tão pouco quanto seja possível, para que o seu significado cultural fique retido, de modo a ser conservado para as gerações futuras³⁵.

³⁵ As informações foram retiradas do site: <http://www.quintacidade.com/wp-content/uploads/2008/03/carta-de-burra.pdf>. Acessado em 14/08/2009.

Cantacuzino apud BRAGA (2007), analisou através de um artigo para o DOCOMOMO³⁶, os princípios de proteção da arquitetura moderna. Para ele, a proteção e preservação devem se encaixar nos mecanismos de conservação do bem tombado. A conservação implica em reformas ou manutenções que dêem continuidade a vida daquela obra ou possibilite novos usos, devendo começar, para isto, com uma extensa avaliação do que realmente deve ser preservado e a partir daí, serem apresentadas recomendações de mudanças quando necessárias para manter a obra em uso.

Neste trabalho, para a proposição de *retrofit* da envoltória de um edifício dos Ministérios, tombado pelo IPHAN, é necessária a avaliação de dois aspectos: o primeiro, da preservação de um bem cultural, com o mérito canônico, visto pertencer à relação das obras arquitetônicas de Oscar Niemeyer projetadas para Brasília; o segundo, envolve o processo de conservação deste bem, de modo a mantê-lo atualizado mediante às atuais exigências; neste caso, o RTQ-C (INMETRO, 2009) impõe aos edifícios comerciais, de serviços e públicos *retrofits* visando a eficiência energética dos sistemas consumidores de energia, através, inclusive, da alteração de sua envoltória, já que esta avaliação é pré-requisito para avaliação dos sistemas de iluminação e condicionamento de ar.

Além desta exigência, neste edifício, a manutenção do conforto térmico de seus ocupantes realizada pelo sistema de condicionamento de ar, provoca alto consumo de energia elétrica, reflexo da sua implantação (as fachadas maiores com orientação solar inadequada) e do partido arquitetônico (as fachadas são totalmente envidraçadas, sem proteção solar adequada). A concepção do projeto também induz ao uso de persianas verticais internas, que frequentemente são encontradas fechadas, ocasionando o escurecimento dos postos de trabalho, tornando imprescindível a utilização do sistema artificial de iluminação, que da mesma maneira provoca o aumento do consumo de energia elétrica.

Dessa maneira, este trabalho para atendimento às premissas da preservação de um bem cultural nacional e de sua necessária reabilitação, propõe que as alterações sejam aplicadas internamente, ou através da substituição de componentes construtivos da envoltória (vidros) que não alterem substancialmente as características estéticas modernistas.

³⁶ DOCOMOMO- Documentation and Conservation of Buildings, Sites and Neighborhoods of the Modern Movement é uma organização não-governamental, com representação em mais de quarenta países. O objetivo do DOCOMOMO é a documentação e a preservação das criações do Movimento Moderno na arquitetura, urbanismo e manifestações afins.

4.3. A Esplanada dos Ministérios

Os edifícios que abrigam os Ministérios do Governo Federal foram dispostos com a mesma conformação³⁷ e regularidade, através de uma implantação em sequência, ao longo do eixo monumental, no trecho compreendido entre a Catedral e o Congresso Nacional. A regularidade é interrompida pelo Palácio Itamaraty, sede representativa do Ministério das Relações Exteriores e pelo Palácio da Justiça, que ocupam a sua extremidade, contíguos ao edifício do Congresso.

O arquiteto Oscar Niemeyer buscou simplicidade e ao mesmo tempo riqueza formal para o conjunto. Os edifícios dos ministérios não poderiam ter uma expressão forte para não desaparecer a escala hierárquica prevista e prejudicar o resultado final. Nesse contexto, o projeto que originalmente previa edifícios sobre pilotis em forma de losango foi substituído por uma forma prismática sem pilotis (BRUAND, 1999), uma vez que aqueles não assumiriam um papel tão claro na delimitação do eixo e não gerariam o contraste necessário com os edifícios mais representativos.

O projeto arquitetônico seguiu os princípios modernistas, na medida em que os edifícios construídos guardavam uma pureza de concepção e senso de proporções dignos do classicismo estrito, utilizado por Le Corbusier, no projeto do Ministério da Educação e Saúde, em 1936. O conjunto possui aspecto discreto, servindo para pontuar o ritmo do eixo Monumental e focar a composição na Praça dos Três Poderes (CAVALCANTI, 2001). São construções com um térreo e nove pavimentos, com as duas fachadas principais, voltadas para as orientações leste e oeste, inteiramente revestidas em vidro. Somente a fachada oeste possui brises metálicos verticais para proteção solar, instalados na década de 70. As empenas laterais são cegas, revestidas de cerâmica na cor gelo.

A Esplanada dos Ministérios foi tombada provisoriamente, através do processo IPHAN nº 1550-T- 2007³⁸, que para todos os efeitos, pelo Art. 10 do Decreto-Lei nº 25, de

³⁷ Somente os Palácios da Justiça e Itamaraty apresentam projetos diferentes.

³⁸ O IPHAN foi consultado informalmente (02/2009) a respeito das modificações da envoltória do edifício dos Ministérios passíveis de autorização. Segundo a Coordenadora Técnica da Superintendência do IPHAN em Brasília, Dra. Daniela Castro, as fachadas não poderão sofrer nenhuma alteração que modifique a composição estética das esquadrias (cores dos vidros e ferragens, modulação e sistema de abertura), dos brises metálicos (cores, modulação e sistema de abertura), dos elementos compositivos de concreto (marquise e platibandas) e das empenas (revestimento em gressites).

30/11/1937, determina-se que o tombamento provisório se equiparará ao definitivo. Este decreto organiza a proteção do patrimônio histórico e artístico nacional:

Capítulo I

Art. 1º Constitui o patrimônio histórico e artístico nacional o conjunto dos bens móveis e imóveis existentes no país e cuja conservação seja de interesse público, quer por sua vinculação a fatos memoráveis da história do Brasil, quer por seu excepcional valor arqueológico ou etnográfico, bibliográfico ou artístico.

Capítulo II

Art. 6º O tombamento de coisa pertencente à pessoa natural ou à pessoa jurídica de direito privado se fará voluntária ou compulsoriamente.

Art. 10. O tombamento dos bens, a que se refere o art. 6º desta lei, será considerado provisório ou definitivo, conforme esteja o respectivo processo iniciado pela notificação ou concluído pela inscrição dos referidos bens no competente Livro do Tombo.

Parágrafo único. Para todas os efeitos, salvo a disposição do art. 13 desta lei, o tombamento provisório se equiparará ao definitivo.

Capítulo III

Art. 13. O tombamento definitivo dos bens de propriedade particular será, por iniciativa do órgão competente do Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, transcrito para os devidos efeitos em livro a cargo dos oficiais do registro de imóveis e averbado ao lado da transcrição do domínio.

Art. 17 - As coisas tombadas não poderão, em caso nenhum, ser destruídas, demolidas ou mutiladas, nem, sem prévia autorização especial do Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, ser reparadas, pintadas ou restauradas, sob pena de multa de cinquenta por cento do dano causado.

4.3.1.1. Estudo de caso : um Ministério da Esplanada

Partindo do princípio que Brasília é a capital do país e concentra a administração do mesmo, este trabalho se desenvolverá na análise do desempenho térmico e energético da envoltória de um dos edifícios dos Ministérios (uma das sedes do Poder Executivo), dada a importância de sua atribuição nacional e localização na cidade: situa-se dentro da escala Monumental, na denominada Esplanada dos Ministérios (Figura 4.2).



Figura 4.2 - Esplanada dos Ministérios em Brasília, vista do Congresso Nacional.



(a)



(b)

Figura 4.3- (a) Edifício dos Ministérios, fachada leste. (b) Edifício dos Ministérios, fachada oeste.

A escolha do estudo de caso se baseou, além disso, em características arquitetônicas e construtivas que o tornam representativo do padrão para edifícios de escritórios públicos, em Brasília, cuja tipologia principal seria uma fachada envidraçada e a outra, a oposta, com elementos de proteção solar (LIMA, 2003) (Figuras 4.3 “a” e “b”).

A reabilitação deste edifício público de Brasília torna-se mais relevante considerando os títulos de “Patrimônio Nacional” e “Patrimônio Cultural da Humanidade”. Além disso, a avaliação do desempenho da envoltória deste edifício servirá de parâmetro para outras avaliações, inclusive podendo ser considerado um modelo, visto ser representativo do complexo formado por 17 (dezessete) prédios que foram dispostos com a mesma conformação, dez de um lado e sete do outro, ao longo do canteiro central da Esplanada dos Ministérios.

Parte II

Estudo de caso: Ministério da Esplanada

Capítulo 5 – Metodologia

Atualmente, estudos visando o *retrofit* da envoltória se baseiam em dados experimentais ou em resultados obtidos através de simulação computacional. Neste estudo, será adotada a metodologia do Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C, visando primeiramente a classificação e a etiquetagem da envoltória do edifício, objeto de estudo, comparando os resultados da metodologia prescritiva e da simulação, a fim de investigar o potencial de melhoria da eficiência energética, a partir dos critérios de classificação propostos pela regulamentação. Posteriormente será proposto o *retrofit* em sua envoltória, através da criação de modelos virtuais (modelos propostos), utilizando a simulação computacional (metodologia da simulação). Os modelos propostos serão submetidos a classificação e etiquetagem da envoltória quanto a eficiência energética e posteriormente serão analisados os custos das reformas dos modelos correspondentes às etiquetas A, B, C e D e os impactos nas tarifas de energia elétrica, para comprovação da viabilidade financeira das propostas.

A metodologia do estudo consiste nos seguintes passos:

1. Caracterização da edificação: Através de levantamentos nos projetos executivos e visitas “in loco” para levantamento do volume e forma do edifício, percentual de aberturas nas fachadas, presença de elementos de proteção solar, especificações dos materiais construtivos e de acabamento;
2. Cálculo da Eficiência da Envoltória: Metodologia Prescritiva do Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas;
3. Cálculo da Eficiência da Envoltória: Metodologia da Simulação do Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas, utilizando o programa DesignBuilder para simulação termo-energética do modelo real e modelos de referência;
4. Calibração do modelo real;
5. Elaboração de propostas de *retrofit* da envoltória, com vistas a melhorias em conforto ambiental e eficiência energética;
6. Avaliação dos resultados da simulação computacional das propostas com etiquetas (ENCE) A , B e C;
7. Avaliação das propostas através da Relação custo-benefício (RCB);

8. Conclusões e recomendações.

5.1. Caracterização da edificação

A Esplanada dos Ministérios, em Brasília (Figura 5.1) localiza-se ao longo do eixo monumental, no trecho compreendido entre a Catedral e o Congresso Nacional. É formada por 17 (dezessete) prédios que foram dispostos em sequência e com a mesma conformação, dez de um lado e sete do outro, ao longo do canteiro central.

O edifício estudado é um dos edifícios dos Ministérios, construído em 1958, juntamente com 11 edifícios de outros ministérios, sendo somente depois concluídos os outros seis.



Figura 5.1 - Imagem de satélite da Esplanada dos Ministérios, com a localização e orientação dos edifícios.

Apresenta volume prismático com formato retangular, com largura e comprimento na proporção de aproximadamente de 1:6, com nove pavimentos, apresentando as fachadas maiores expostas à radiação solar com orientações de $108^{\circ}/288^{\circ}$ (Leste/Oeste) (Figuras 5.2 e 5.3) e $18^{\circ}/198^{\circ}$ (Norte/Sul). No Anexo II é apresentado o projeto de arquitetura do edifício.



Figura 5.2 – Edifício dos Ministérios, fachada leste.

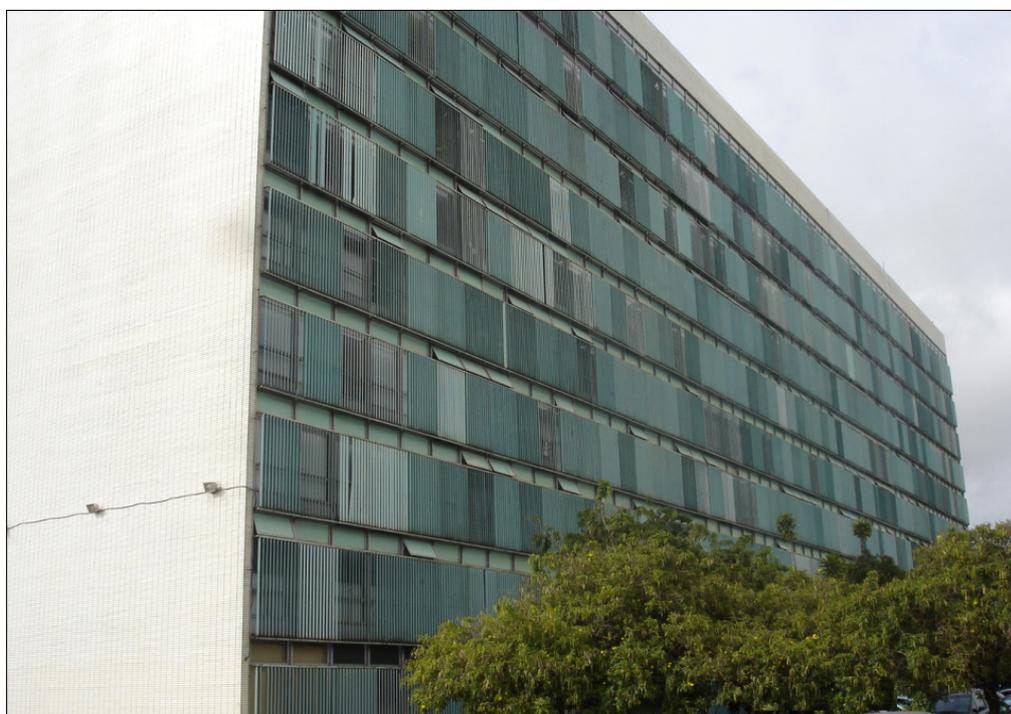


Figura 5.3 – Edifício dos Ministérios, fachada oeste.

Sobrepondo a forma da edificação predominante à carta solar³⁹, conforme a orientação citada (Figura 5.4), verifica-se que a fachada leste (108°) recebe a insolação durante toda a manhã ao longo do ano, sendo mais intensa nos meses de dezembro a fevereiro, onde o sol incide diretamente das 05h30min às 12h, aproximadamente. A fachada oeste (288°) recebe o sol da tarde durante todo o ano, principalmente nos meses mais frios, a partir das 11h.

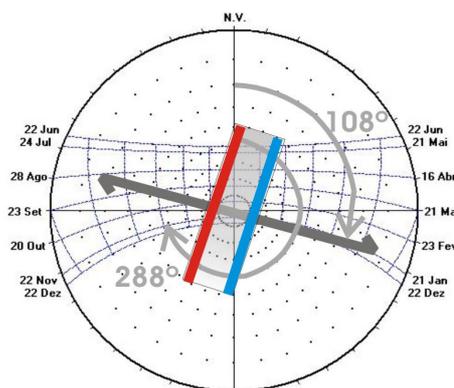


Figura 5.4- Orientação predominante dos edifícios dos Ministérios.

Quanto aos ganhos térmicos devidos à radiação solar, observa-se que no Equinócio de Outono (22/03), no Solstício de Verão (21/12) e no Equinócio de Primavera (22/09), estes edifícios recebem uma alta carga térmica, devido suas fachadas principais estarem expostas à radiação direta (Ver Tabela 5.1).

Tabela 5.1- Radiação solar recebida pelo edifício nas orientações predominantes (RORIZ, 1995).

Orientação das fachadas	Quantidade de radiação solar (Wh/m ²)			
	Equinócio de Outono- 22/03	Solstício de Verão -21/12	Equinócio de Primavera- 22/09	Solstício de Inverno -21/06
108 °	2391	2574	3556	2327
288 °	2899	2085	4338	4360

³⁹ Utilizou-se a carta solar produzida pelo Programa Luz do Sol (RORIZ, 1995).

5.1.1. Obtenção dos dados técnicos do edifício

Foram realizadas visitas ao edifício, sendo levantadas as características físicas, do uso e ocupação de todos os pavimentos da edificação, por meio:

1. De desenhos arquitetônicos originais para a conferência de medidas e especificações.
2. De observações e medidas in-loco dos ambientes e das aberturas, com as quais se procurou caracterizá-los segundo: o dimensionamento dos elementos opacos e transparentes (aberturas), elementos de controle solar, mobiliário e divisões internas e as características dos materiais construtivos e de acabamento.
3. Dos usuários, por entrevistas informais em cada pavimento para avaliação das atividades de escritórios (horários de funcionamento, quantidade de pessoas em um mesmo ambiente, condições de conforto ambiental, existência de alternância de turnos, horários de acionamento da iluminação artificial e de operação dos equipamentos de condicionamento de ar e de escritório, etc), sendo entrevistados 30% da população do edifício, com representação proporcional em cada pavimento.

No Anexo I se encontra detalhado o levantamento de dados efetuado no edifício.

5.1.1.1. Caracterização da envoltória e espaços internos.

O projeto apresenta formato retangular, medindo 17,53 x 102,75 x 39,10m. É composto por nove pavimentos, onde se distribuem os escritórios e gabinetes ao longo de um corredor central (Figura 5.5), dois subsolos com a mesma configuração espacial do pavimento tipo, sendo que o 2º subsolo é composto principalmente por depósitos e salas para arquivamento de processos. Contínuo ao 1º subsolo, mas ultrapassando a projeção do edifício, estão situadas a garagem, a marcenaria, uma pequena área administrativa composta pelo setor de transportes, o depósito do almoxarifado, a casa de máquinas e por outros depósitos com finalidades diversas.

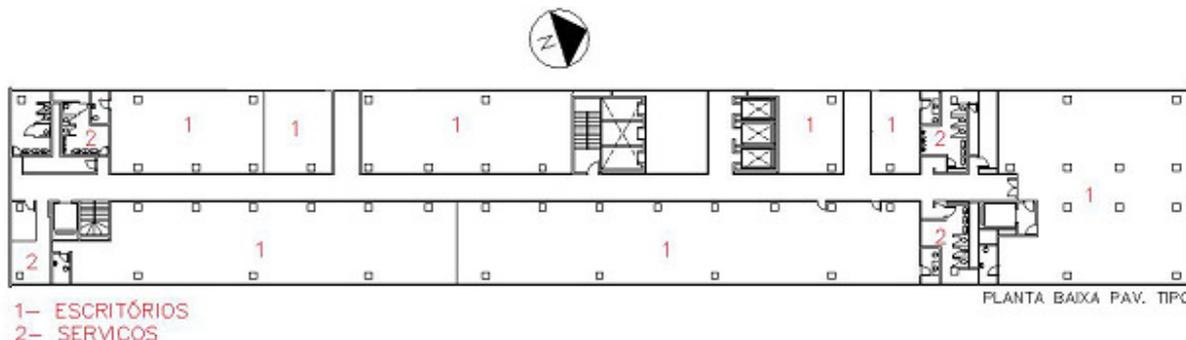


Figura 5.5- Planta baixa de um pavimento tipo.

As empenas cegas, norte e sul, são revestidas com cerâmica na cor gelo e as fachadas maiores, leste e oeste, são vedadas com vidro de 6mm temperado incolor, sendo que na fachada leste foi instalado, recentemente, uma película prata espelhada, da marca Intercontrol.

As janelas são de piso ao teto, executadas seguindo a modulação de 1,70 m, com abertura na parte superior, tipo basculante com 64 cm de altura. As b asculas são em perfil metálico na cor cinza, abrindo para fora da sala (Figura 5.6).

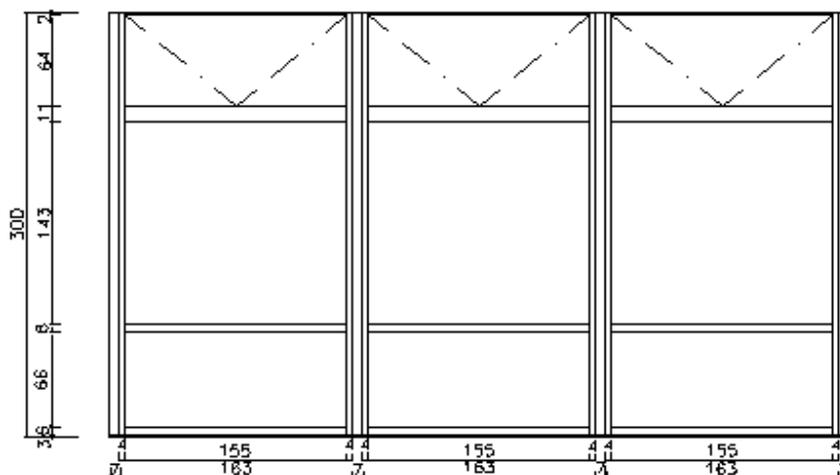


Figura 5.6- Modelo da esquadria modular dos pavimentos tipos.

Na década de 70, foram incorporados na fachada oeste os brises verticais, executados pela empresa Irmãos Gravia, em chapa de aço galvanizada e pintura automotiva na cor verde nilo, onde as lâminas verticais possuem 15 cm de profundidade, 3,5 cm de largura na

parte intermediária do perfil e altura variável de acordo com o pavimento⁴⁰, caracterizando-se como brise finito (SILVA, 2007)(Figuras 5.7 “a” e “b”).

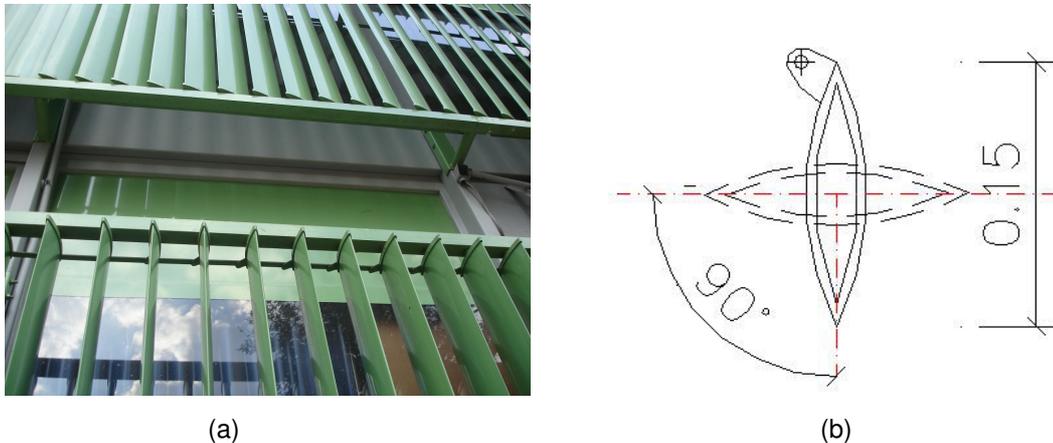


Figura 5.7- (a) Fotografia do brise-soleil da fachada oeste, (b) Angulação do brise-soleil da fachada oeste.

As lâminas verticais são agrupadas de doze em doze em uma longarina metálica horizontal, compondo a modulação possível de movimento, cuja angulação é de até 90 graus (Figura 5.8). Cada modulação da esquadria, com 1,70m, corresponde ao grupo de 12 lâminas, que giram no sentido horário, conforme a necessidade. O movimento é feito através do contato do usuário com uma alavanca interna à esquadria, visto não ser possível o acesso direto aos brises. A distância entre o brise, quando totalmente aberto, ao plano envidraçado é de 20 cm.

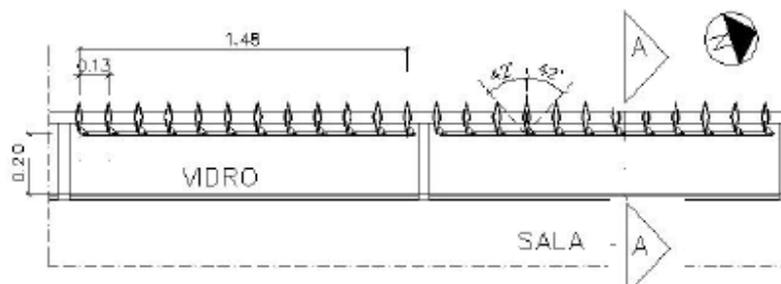


Figura 5.8 - Planta baixa do brise-soleil vertical existente (SILVA, 2007).

Foram levantadas as dimensões e as características dos elementos e componentes construtivos das vedações internas e externas, sendo estas últimas, partes da envoltória do edifício:

⁴⁰ No térreo, as lâminas apresentam 3,00 m de altura, enquanto que nos pavimentos tipos possui 2.90 m e nos demais pavimentos 3.28m, devido à diferença do pé-direito. Fonte - Silva, 2007

1. Divisões internas - Compostas por divisórias piso-teto, de meio painel cego e meio de vidro transparente incolor com 6mm, sendo o painel cego composto por sanduíche de compensado de 1,9mm, revestido em laminado melamínico na cor bege, com manta interna em fibra de vidro, com espessura total de 7cm.
2. Empenas Norte e Sul - Medindo 17,53m x 39,10m - Composta por alvenaria de bloco cerâmico deitado com 20cm, emboço externo e interno com 2,5cm, reboco interno e externo com 1,5cm e revestimento externo em cerâmica, na cor gelo e interno em pintura acrílica, na cor branca. A largura total da parede é de 29 cm.
3. Fachada Leste - Medindo 102,75m x 44,30m (inclue o 1º subsolo, visto este ter contato com o meio exterior) - Composta por esquadrias de ferro modulares, pintadas com tinta esmalte fosca, na cor cinza, com vidro temperado 6mm com película de proteção solar prata espelhada e sistema de abertura: fixa (inferior) e basculante (superior). Platibanda com 1,90m, executada conforme as empenas, revestida em cerâmica, na cor gelo. As áreas de aberturas e de fachada são apresentadas na Tabela 5.2.
4. Fachada Oeste - Medindo 102,75m x 44,30m (incluindo o 1º subsolo, visto este ter contato com o meio exterior) - Composta por esquadrias de ferro modulares, pintadas com tinta esmalte fosca, na cor cinza, com vidro temperado 6mm com película de proteção solar prata espelhada e sistema de abertura: fixa (inferior) e basculante (superior) (Ver Figura 5.6) e brises verticais metálicos de 15cm de profundidade, na cor verde Nilo, afastados 20cm da fachada. Platibanda com 1,90m, executada conforme as empenas, revestida em cerâmica, na cor gelo. As áreas de aberturas e de fachada são apresentadas na Tabela 5.2.
5. Lajes intermediárias - Todos os pavimentos possuem forro em chapa de aço com pintura eletrostática, na cor branco neve, apoiada em perfis de alumínio, com afastamento de 80cm da laje intermediária (Figura 5.9). Esta, por sua vez, é composta por laje maciça de concreto com 15cm, regularização com argamassa de 2cm e piso vinílico.

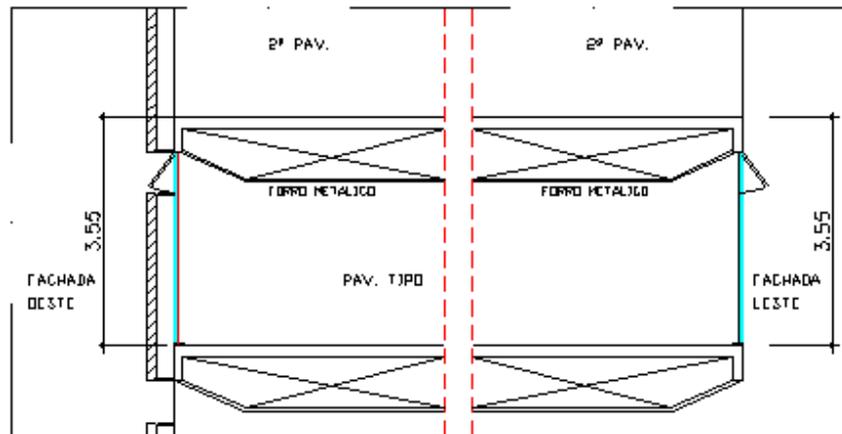


Figura 5.9 - Corte AA do pavimento tipo (1º ao 8º pavimentos).

6. Laje de cobertura - É composta por laje maça de concreto com 20cm, impermeabilização com betume asfáltico e camada sobreposta de placas de concreto pré-moldadas com 2 cm de espessura, na cor cinza claro (concreto natural) (Figuras 5.10 “a” e “b”).



(a)



(b)

Figura 5.10- (a) Fotografia da cobertura do edifício, (b) Detalhe das placas sobrepostas.

A Tabela 5.2 apresenta os valores das áreas (m^2) de aberturas e de fachadas do edifício analisado. Para o levantamento das áreas de aberturas não foram computados as espessuras das ferragens das esquadrias e das lajes de piso, intermediárias e de cobertura. As áreas de fachadas correspondem ao somatório das áreas de aberturas e dos fechamentos opacos das superfícies externas da construção (com inclinação superior à 60° em relação à horizontal) (RTQ-C).

Tabela 5.2 - Áreas de fachadas e de aberturas do edifício analisado

RELAÇÃO DAS ÁREAS DE FACHADA E ABERTURAS DO EDIFÍCIO (m²)							
	Aberturas Fachada Leste	Total Fachada Leste	Aberturas Fachada Oeste	Total Fachada Oeste	Empena Sul	Empena Norte	Fachadas Área Total
Subsolo	85	534	85	534	-	-	-
Térreo	340	426,29	340	426,29	-	-	-
1º Pav.	295	364,66	295	364,66	-	-	-
2º Pav.	295	364,66	295	364,66	-	-	-
3º Pav.	295	364,66	295	364,66	-	-	-
4º Pav.	295	364,66	295	364,66	-	-	-
5º Pav.	295	364,66	295	364,66	-	-	-
6º Pav.	295	364,66	295	364,66	-	-	-
7º Pav.	295	364,66	295	364,66	-	-	-
8º Pav.	295	364,66	295	364,66	-	-	-
9º Pav.	358	477,65	358	477,65	-	-	-
Platibanda		195,17		195,17	-	-	-
Total	3.143	4.550	3.143	4.550	685,42	685,42	10.471

5.2. Cálculo da eficiência da envoltória – Metodologia

Prescritiva

A metodologia prescritiva do Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - RTQ-C classifica a eficiência da envoltória baseado em um indicador de consumo obtido através de uma equação. Há duas equações por Zona Bioclimática: uma representando edifícios com área de projeção da cobertura (Apcob) menor que 500 m² e a segunda para edifícios com área de projeção da cobertura maior que 500 m². No desenvolvimento das equações do indicador de consumo, algumas zonas bioclimáticas foram agrupadas, sendo representadas pela mesma equação. São elas ZB2 e ZB3; ZB4 e ZB5; ZB6 e ZB8. As equações para Apcob>500 m² são válidas para um Fator de Forma mínimo permitido (Aenv/Vtot). As equações para Apcob<500 m² são válidas para um Fator de Forma máximo permitido (Aenv/Vtot). Acima ou abaixo desses, deve-se utilizar os valores limites (Ver Tabela 5.3).

Tabela 5.3. Fator de forma máximo e mínimo por zona bioclimática.

Zona Bioclimática	$A_{pe} < 500m^2$ Fator de forma máximo	$A_{pe} > 500m^2$ Fator de forma mínimo
1	0,60	0,17
2 e 3	0,70	0,15
4 e 5	0,75	Livre
6 e 8	0,48	0,17
7	0,60	0,17

Fonte: RTQ-C. Acessado em 15/06/2009.

5.2.1 Cálculo do indicador de consumo da envoltória (Icenv)

O Indicador de Consumo referente à envoltória do edifício estudado foi calculado com a Equação 2, de acordo com Zona Bioclimática 4 (Brasília), considerando a projeção da cobertura maior que 500m². Neste caso, o fator de forma mínimo será livre, sendo adotado o valor obtido pelo cálculo do $FF=0,16$ ($FF=A_{env}/V_{tot}$) do edifício.

$$IC_{env} = 511,12.FA + 0,92.FF - 95,71.PAFT - 99,79.FS - 0,52.AVS - 0,29.AHS - 380,83.FA.FF + 4,27/FF + 729,20 .PAFT.FS + 77,15 \quad \text{Equação 2}$$

O levantamento do valor das variáveis, referentes às características físicas da edificação, utilizadas na equação do Índice de Consumo da envoltória, corresponde a primeira fase da avaliação:

1. Área total de fachada = 10.471 m², calculado pela soma total das superfícies externas verticais do edifício em contato com meio exterior (foram considerados do 1º subsolo ao 9º pavimento).
2. Área da fachada oeste = 4.550 m², corresponde a área da fachada oeste.
3. Área de envoltória = 12.272 m², calculado pela soma da área total de fachada com a da cobertura.
4. $A_{pcob} = 1.801$ m², corresponde à área de projeção da cobertura do edifício.
5. $A_{tot} = 19.811$ m², calculado pela soma das áreas de piso do 1º subsolo ao 9º pavimento, medida externamente.
6. $V_{tot} = 76.362$ m³, corresponde ao volume total da edificação.

7. Áreas das aberturas = 6.286 m². Nesse cálculo foi considerada a área total de esquadrias, não sendo computada a área correspondentes aos montantes e às seções transversais e longitudinais metálicas da esquadria.
8. PAFt = 0,60, calculado pela razão da área total das aberturas pela área total de fachadas da edificação.
9. PAFo = 0,69, calculado pela razão da área das aberturas pela área da fachada oeste. Como seu valor não é superior ao do PAFt em 20%, será adotado o valor do PAFt.
10. AVS - Ângulo Vertical de sombreamento dos brises = 2°. Como a distância do brise vertical ao plano de vidro (20cm) ultrapassa a distância entre as aletas (15cm) do brise vertical, este elemento é considerado proteção solar e não fachada (RTQ-C). Neste caso, o AVS é calculado pelo ângulo vertical de sombreamento medido entre a extremidade das barras de sustentação dos brises verticais até a base da folha de vidro, do andar inferior. Após determinado este ângulo (4°) (Figura 5.11), procede-se o cálculo da razão da média ponderada do ângulo vertical de sombreamento para todas as aberturas (a fachada leste não possui brises) pela área total de aberturas:

$$4^{\circ} \times 3.143 + (0 \times 3.143) / 6.286 = 2^{\circ}$$

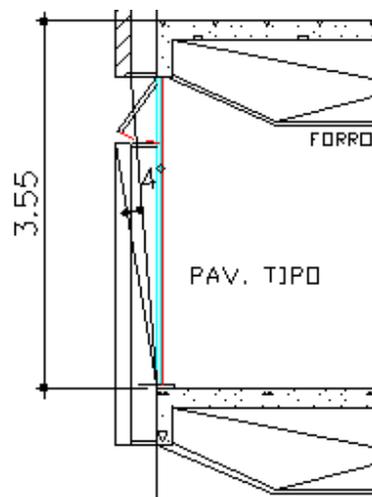
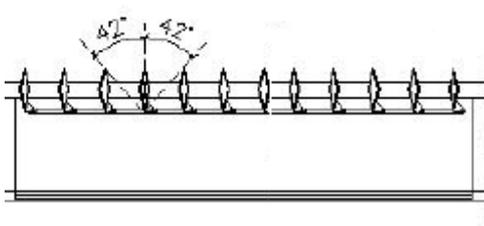


Figura 5.11- Ângulo vertical de sombreamento das barras de sustentação dos brises.

11. AHS - Ângulo Horizontal de sombreamento dos brises = 21°, calculado pelo ângulo do plano formado pela extremidade mais distante da proteção solar vertical e a extremidade oposta da base da folha de vidro (Figura 5.12). Após determinado este ângulo (42°), procedeu-se o cálculo da razão da média ponderada do ângulo horizontal

de sombreamento para todas as aberturas (a fachada leste não possui brises) pela área total de aberturas:



$$42^\circ \times 3.143 + (0 \times 3.143) / 6.286 = 21^\circ$$

Figura 5.12. Ângulo horizontal de sombreamento dos brises verticais.

12. FF - Fator de Forma (A_{env}/V_{tot}) = 0,16, corresponde a razão entre a área da envoltória (12.272 m²) e o volume total (76.362 m³).
13. FA - Fator Altura ($A_{pe}/Á_{tot}$) = 0,09, corresponde a razão entre a área de projeção do edifício (1.801 m²) e a área total (19.811 m²).
14. FS - Fator solar dos vidros = 0,53. Este valor foi calculado pela média ponderada do fator solar da fachada leste, a qual possui fechamentos com vidro transparente 6mm e película prata espelhada de controle solar, marca intercontrol (FS =0,23) e da fachada oeste com fechamentos com vidro transparente 6mm (sem película de controle solar) (FS =0,83).

Tabela 5.4. Propriedades térmicas do vidro com película de controle solar.

Transmissão Luminosa (%)		Transmissão energética (%)			FS (%)	U W/m ² K	CS
Transmissão	Reflexão	Transmissão	Reflexão	Absorção			
15	60	9	63	28	23	0,99	0,24

Fonte: <http://www.intercontrol.com.br/pvarquitetu2.asp>

Portanto, substituindo o valor das variáveis na Equação 1, temos que **IC_{env} = 259**.

5.2.2. Cálculo do IC_{máxD} e IC_{mín} da envoltória e dos limites dos intervalos

O indicador de consumo obtido foi comparado a uma escala numérica dividida em intervalos que descrevem um nível de classificação de desempenho que varia de A a E. Quanto

menor o indicador obtido, mais eficiente será a envoltória da edificação. A escala numérica da classificação de eficiência é variável e foi determinada para a volumetria de edifício através dos parâmetros Fator Altura e Fator de Forma: razão entre a área de projeção do edifício e a área total de piso (A_{pe}/A_{tot}) e razão entre a área da envoltória e o volume total (A_{env}/V_{tot}).

Metodologia adotada para a classificação:

1. Calculou-se o indicador de consumo por meio da equação IC_{env} com os dados do projeto do edifício.
2. Calculou-se o limite máximo do indicador de consumo para aquela volumetria, $IC_{máxD}$, por meio da Equação 1, mas com os parâmetros de entrada fornecidos pela Tabela 5.5. O $IC_{máxD}$ representa o indicador máximo que a edificação deve atingir para obter a classificação D (ver Tabela 5.6), acima deste valor, a edificação passará a ser classificada com o nível E.

Tabela 5.5 - Parâmetros do $IC_{máxD}$

PAF _T	FS	AVS	AHS
0,60	0,61	0	0

Fonte: RTQ-C

Tabela 5.6 - Cálculo do Índice de Consumo Máximo ($IC_{máxD}$)

Área de projeção do edifício (m ²)	Ape	1801
Área total de piso (m ²);	Atot	19811
Área da envoltória (m ²);	Aenv	12272
Ângulo Vertical de Sombreamento (graus);	AVS	0
Ângulo Horizontal de Sombreamento (graus);	AHS	0
Percentual de Abertura na Fachada total (adimensional, para uso na equação);	PAFT	0,6
Volume total da edificação (m ³)	Vtot	76362
Fator solar	FS	0,61
Indicador de consumo para ZB 04 (adimensional)	$IC_{env.máxD}$.	293

3. Analogamente, também se calcula o $IC_{mín}$. Como no cálculo do $IC_{máxD}$, os mesmos quatro parâmetros - PAFT, FS, AVS, AHS - são alterados. AVS e AHS são zero tal como no cálculo do $IC_{máxD}$. Já os parâmetros PAFT e FS são inseridos na equação, conforme a Tabela 5.7, do RTQ-C, apresentada a seguir. O $IC_{mín}$ representa o indicador de consumo mínimo para aquela volumetria (ver Tabela 5.8)

Tabela 5.7 - Parâmetros do Icmín

PAF _T	FS	AVS	AHS
0,05	0,87	0	0

Fonte: RTQ-C

Tabela 5.8 : Cálculo do Índice de Consumo Mínimo (ICmín)

Área de projeção do edifício (m ²)	Ape	1801
Área total de piso (m ²);	Atot	19811
Área da envoltória (m ²);	Aenv	12272
Ângulo Vertical de Sombreamento (graus);	AVS	0
Ângulo Horizontal de Sombreamento (graus);	AHS	0
Percentual de Abertura na Fachada total (adimensional, para uso na equação);	PAFT	0,05
Volume total da edificação (m ³)	Vtot	76362
Fator solar	FS	0,87
Indicador de consumo para ZB 04 (adimensional)	ICmín	85

Na Tabela 5.9 são mostrados os cálculos dos Índices de Consumo Máximo e Mínimo- IC máxD e ICmín, com dados do PAFT, FS, AVS, AHS, estabelecidos pelos itens 2 e 3:

Tabela 5.9 - Índices de Consumo Máximo e Mínimo- IC máxD e ICmín

	PAFT	FS	AVS	AHS	FA	FF	ÍCenv
IC mín	0,05	0,87	0	0	0,09	0,16	85
IC máxD	0,60	0,61	0	0	0,09	0,16	293
IC env	0,6	0,53	2	21	0,09	0,16	259

Fonte: RTQ-C

4. Os limites ICmáxD e ICmín representam o intervalo dentro do qual a edificação proposta se insere. O intervalo foi dividido em 4 partes (i), cada parte se refere a um nível de classificação numa escala e desempenho que varia de A a E. A subdivisão i do intervalo foi calculada com a Equação 3.

$$i = \frac{(ICmáxD - ICmín)}{4} \quad \text{Equação 3}$$

5. Com o valor de i = 52 calculado, preencheu-se a Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Limites dos intervalos dos níveis de eficiência

Eficiência	A	B	C	D	E
Lim Mín	-	$IC_{máxD} - 3i + 0,01$	$IC_{máxD} - 2i + 0,01$	$IC_{máxD} - i + 0,01$	$IC_{máxD} + 0,01$
Lim Máx	$IC_{máxD} - 3i$	$IC_{máxD} - 2i$	$IC_{máxD} - i$	$IC_{máxD}$	-

Fonte - RTQ-C

6. Foi comparado o ICenv (obtido com os limites da tabela acima e foi identificado o nível de eficiência da envoltória do edifício estudado, conforme a Tabela 5.11.

Tabela 5.11- Limites dos intervalos dos níveis de eficiência do projeto

LIMITES DOS INTERVALOS (i=52)	Eficiência	A	B	C	D	E
LIM MÍN	-	-	137,37	189,37	241,37	293,37
LIM MÁX	137,36	189,36	241,36	293,36	-	-

O **icenv = 259**, logo o nível de eficiência da envoltória se situou no intervalo de eficiência **D**.

Como a eficiência da envoltória do edifício se situou no intervalo do limite de eficiência D foram analisados os pré-requisitos para o Nível C ou D.

1. A transmitância térmica da cobertura de ambientes condicionados artificialmente não deve ultrapassar $2 \text{ W/m}^2\text{K}$.
2. A transmitância térmica máxima das paredes externas deve ser no máximo de $3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$.

A transmitância térmica considerada foi a média das transmitâncias de cada parcela da fachada (ou cobertura) ponderadas pela área que ocupavam. A transmitância térmica das paredes externas encontrada foi igual a $1,73 \text{ W/m}^2\text{K}$, considerando que só existem paredes nas empenas, e a transmitância térmica da cobertura encontrada foi de $1,73 \text{ W/m}^2\text{K}$, conforme a Tabela 5.12 abaixo:

Tabela 5.12- Propriedades termofísicas dos materiais construtivos que constituem a envoltória

Localização	Material	Densidade (ρ) kg/m ³	Espessura da camada (e) m	condutividade térmica (λ) W/m.k	Resistência	Transmit.
cobertura	placas de concreto	2100	0,02	1,15	0,04	1,73
	impermeabilizante asfático	1000	0,01	0,17	0,06	
	concreto	2300	0,20	1,75	0,11	
	Camada de ar		0,80		0,16	
	forro de alumínio	2700	0,01	230	0,00	
Parede	ceramica	2000	0,01	0,814	0,01	1,73
	argamassa (emboço + reboco)	1900	0,04	1,15	0,03	
	tijolo	1000	0,2	0,7	0,29	
	argamassa (emboço + reboco)	1900	0,04	1,15	0,03478261	

Como atende os pré-requisitos para os níveis C ou D, a etiqueta da envoltória assume o intervalo de eficiência representado pelo valor do I_{cenv} encontrado, sendo portanto D.

A análise de sensibilidade dos parâmetros da equação do Índice de Consumo da envoltória - RTQ-C demonstra que para Brasília, situada na zona bioclimática 4, tipologias consideradas representativas de edifícios de escritórios, como é o caso do edifício analisado, que possui 10 pavimentos (Fator Altura) com largura bem diferenciada do comprimento (Fator Forma), variações no percentual de abertura das fachadas (PAFt) e no fator solar (FS) dos vidros provocam alterações consideráveis nos resultados, sendo que a redução destes valores repercute em melhores níveis de eficiência energética.

Com base nestes resultados, as propostas de *retrofit* da envoltória analisarão os ganhos e perdas de calor pelos fechamentos opacos e transparentes da edificação, através da análise da influência das alterações dos parâmetros construtivos que se mostrarem tecnicamente viáveis para aplicação em edifícios existentes, e neste caso ainda, considerando as restrições do IPHAN, por causa da preservação do edifício.

5.3. Cálculo da eficiência da envoltória - Metodologia da Simulação Computacional

A metodologia da simulação do Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos- RTQ-C utiliza o método prescritivo e a simulação do desempenho termo-energético da envoltória.

O processo da certificação de edificações pelo método da simulação não descarta o método prescritivo. Ele é utilizado para comprovar que, em certos casos, a utilização de parâmetros diferentes que os determinados pelo RTQ-C geram uma maior economia de energia (RTQ-C, 2009). Neste trabalho, as propostas de *retrofit* da envoltória serão classificadas quanto ao nível de eficiência energética pela metodologia da simulação, haja vista a necessidade da avaliação paramétrica dos materiais e componentes construtivos a serem testados.

A primeira etapa da metodologia da simulação é a construção do modelo virtual real (com todas as características do edifício avaliado). Para isto, é necessário o atendimento aos pré-requisitos estabelecidos quanto ao programa computacional de simulação termo-energética e quanto ao arquivo climático a ser adotado. Estas exigências têm como objetivo principal garantir a obtenção de resultados simulados coerentes (Manual do RTQ, 2009) .

A segunda etapa dos trabalhos corresponde a criação dos modelos de referência A, B, C e D, similares ao modelo real. Para isso, estes modelos deverão ser inicialmente submetidos à avaliação comparativa das envoltórias utilizando a metodologia prescritiva, para a determinação dos parâmetros construtivos que impactarão na eficiência energética, alterando a referência (etiqueta) do modelo.

Na terceira etapa, os modelos de referência deverão ser simulados com o mesmo programa de simulação do modelo real, utilizando o mesmo arquivo climático. A partir dos resultados das simulações (consumo de energia) será possível a construção de propostas de *retrofit* (modelos propostos), modeladas de acordo com o nível de eficiência pretendido, ou seja, com o consumo de energia igual ou menor ao modelo de referência para o nível pretendido.

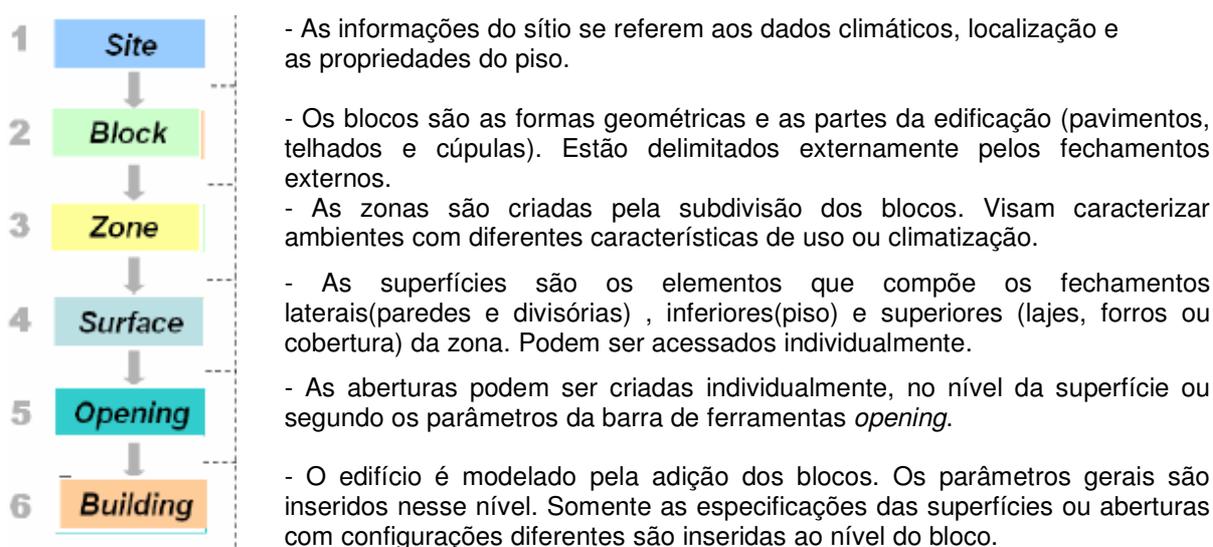
5.3.1. Construção do modelo virtual

Neste trabalho foi utilizado como ferramenta para a modelagem virtual e posterior simulação do desempenho térmico e energético da edificação o programa DesignBuilder, versão 1.6.9.003. Esta interface gráfica utiliza os algoritmos do EnergyPlus, versão 2.2.0.025, corrigindo suas limitações gráficas no processo de modelagem.

5.3.1.1. Entrada de dados no programa DesignBuilder

A metodologia do programa DesignBuilder simplifica o modo de inserção da entrada de dados, visto estes estarem separados pelas abas das variáveis: *layout*, *activity*, *construction*, *opening*, *lighting* e HVAC, podendo-se, simultaneamente, visualizar os resultados das modificações na forma geométrica e nas legendas da barra de ajuda, disposta no campo esquerdo da tela.

No modo layout é realizada a construção virtual do modelo, permitindo sua visualização tridimensional. A ordem dos processos envolvidos da criação do modelo está diretamente associada à hierarquia dos elementos, tanto no que diz respeito ao desenho da geometria da edificação, quanto ao processo de modelagem. A modelagem da edificação normalmente segue a sequência abaixo:



O processo de modelagem implica na entrada de inúmeros dados. Dessa forma, para evitar erros de modelagem que possam comprometer os resultados, recomenda-se que os processos de modelagem, simulação e análise de resultados obedecem a procedimentos metodológicos específicos para cada etapa.

A modelagem do edifício do Ministério (modelo real) foi dividida em 6 etapas até a análise dos resultados do caso base, quando realizou-se um diagnóstico acerca dos principais problemas de desempenho sendo propostas novas soluções e quantificados os seus desempenhos. Adiante, cada uma das etapas que correspondem a metodologia empregada para a modelagem e posterior simulação do desempenho térmico e energético:

5.3.1.1.1. Configuração do sítio

Acessada pelo ícone lateral esquerdo  sítio_, após a inserção do modo *layout* (variável da barra superior) e do acionamento da aba de simulação edit (barra inferior). Compreende os dados de entrada referentes a locação do edifício, dados climáticos e propriedades do chão. A barra de variáveis *location* (Figura 5.13) apresenta algumas propriedades que são automaticamente alteradas pela alteração da locação do edifício. Outras como orientação geográfica, propriedades do chão e exposição ao vento são alteradas conforme a exigência do projeto.

A metodologia da simulação exige que a simulação seja realizada para um período de um ano (8760 horas), e o arquivo climático utilizado será o IWEC para Brasília. Para se definir as temperaturas mensais do chão foi realizada uma simulação prévia, considerando o edifício não adjacente ao chão, desta maneira as temperaturas mensais (*default*) de 14^o do chão não influenciaram as simulações. O valor das temperaturas internas resultantes foi reduzido em 2^o para simular com o chão, visto a edificação modificar as temperaturas do solo abaixo dela (LIMA et al., 2007).



Figura 5.13 - Barra de variáveis da locação do sítio

5.3.1.1.2. Construção geométrica do modelo – 1ª Fase

O desenho foi acionado a partir do ícone  “adicionar novo edifício” (*add new building*), sendo escolhido a opção *draw building + standart data* para que fosse possível liberdade na criação dos blocos, zonas e superfícies. O segundo passo na modelagem geométrica foi a importação do desenho “2D” do programa AUTOCAD e em seguida a configuração dos parâmetros do desenho: pé-direito e a espessura das paredes, através do campo “*Drawing Options*”, localizado no campo inferior esquerdo da tela (Figura 5.14) pelo acionamento do ícone . A partir dos eixos x, y e z foi circundado o desenho em “2D” da planta baixa, referente ao térreo da edificação, para a inserção das paredes externas. Após completado o contorno, o desenho foi construído automaticamente, visto que a opção *Auto-complete block* estava ativada.

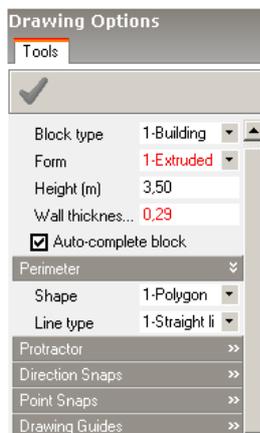


Figura 5.14 -Opções de desenho do programa

Logo após a seleção do bloco, é modificada a barra de ferramentas, aparecendo os ícones referentes às partições internas  . São introduzidas as zonas referentes aos espaços com as mesmas características de ocupação, densidade de carga instalada (W/m^2) e sistema de condicionamento de ar. A Figura 5.15 mostra em perspectiva a composição geométrica das três zonas. As zonas 3 e 4 correspondem aos escritórios voltados para as fachadas leste e oeste, respectivamente.

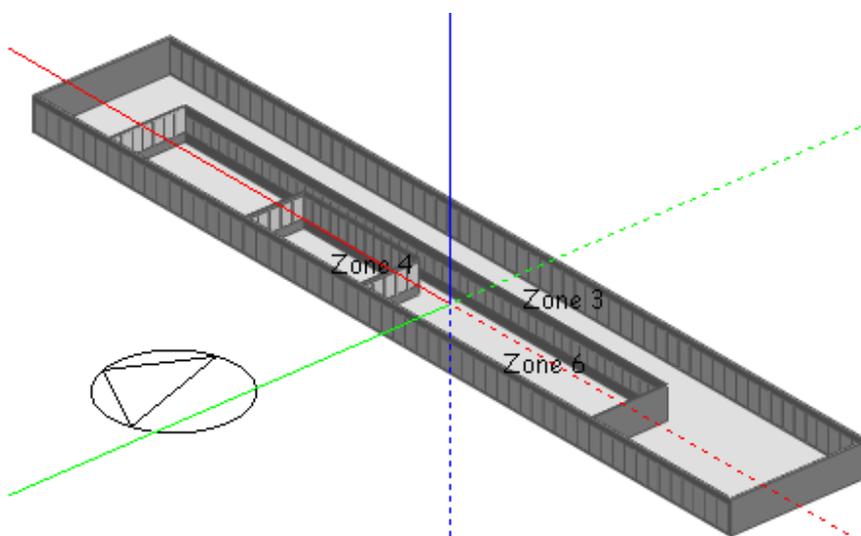


Figura 5.15 - Edição das zonas

A modulação do projeto se repete no mobiliário e conseqüentemente na quantidade de pessoas por sala, facilitando na uniformização das suas características: cada dois módulos de janela, representa uma sala com quatro mesas (portanto quatro pessoas utilizando quatro computadores e duas impressoras). Portanto, a criação de uma zona única para a mesma

orientação solar foi possível, visto que as características térmicas se repetiam, mesmo considerando as diferenças no tamanho dos escritórios. Ademais, houve a necessidade de separação entre as zonas 3 e 4 pela interposição de uma área sem condicionamento de ar (circulação central). As áreas da circulação central, das caixas de escada e dos elevadores, sem condicionamento de ar, correspondem à zona 6. Nesta zona, a carga interna corresponde à 1/3 da taxa de ocupação da zona 3 e 4, não sendo consideradas as cargas provenientes de equipamentos para escritório.

5.3.1.1.3. Definição dos materiais construtivos e das aberturas

A seguir, são definidos as propriedades físicas e a configuração das superfícies externas e internas das zonas: paredes, teto, piso, janelas, etc e inseridas as aberturas nas superfícies externas e nas partições internas.

Primeiramente é selecionado no modelo virtual o componente construtivo a ser definido (Figura 5.16) e em seguida, os materiais utilizados na sua construção são nomeados e especificados, configurando-se as camadas e as espessuras, acionando-se a aba *Construction*.

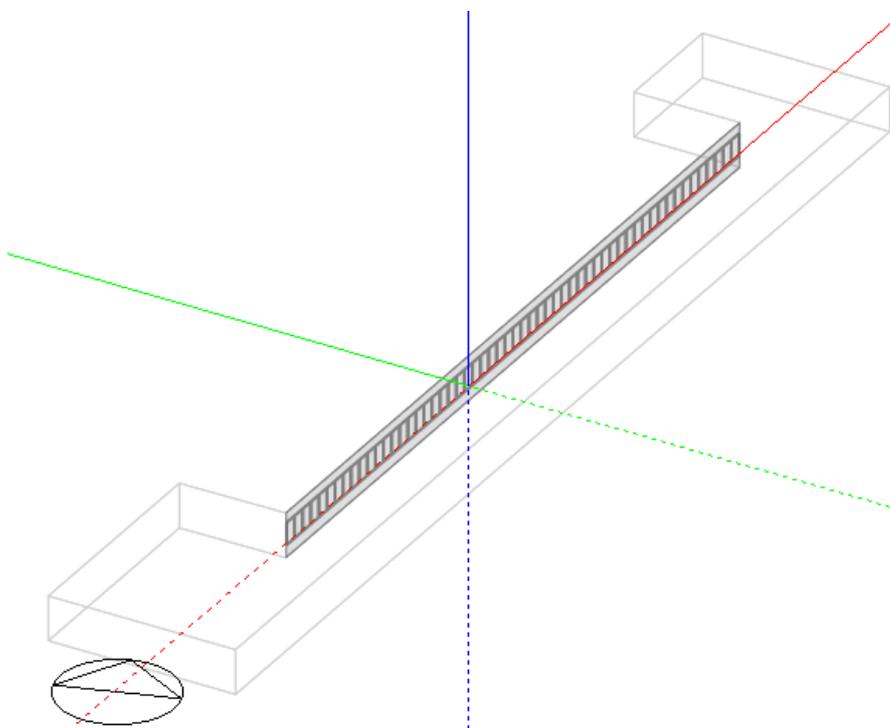
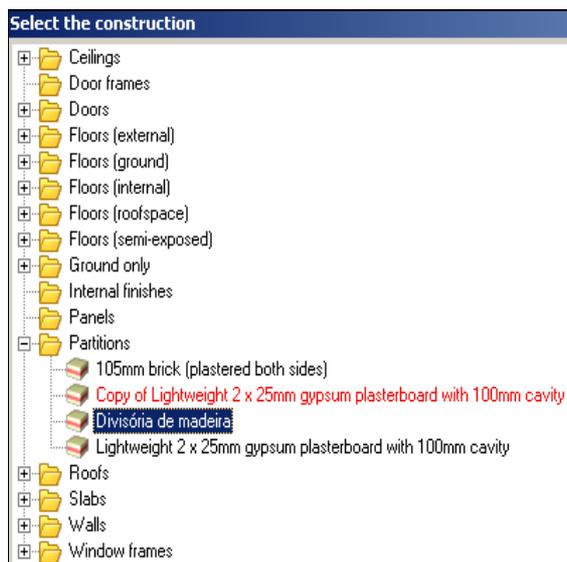


Figura 5.16 - Seleção de uma partição interna

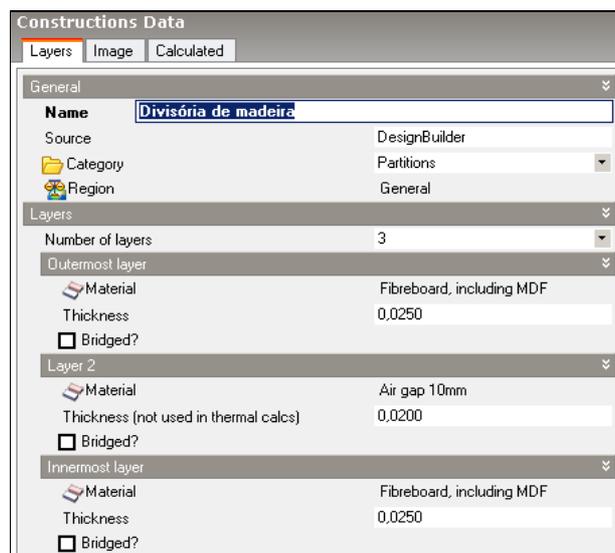
O programa DesignBuilder possui uma biblioteca extensa de componentes e materiais construtivos, conforme Figura 5.17 (a). Sua aplicação é fácil e rápida podendo-se visualizar, a cada modificação, as alterações nas suas dimensões e propriedades térmicas. Além disso, é possível a configuração de opções não existentes, copiando-se as características de um componente da biblioteca que sirva de base para um modelo semelhante, ou mesmo criando um novo, desde que se informe as propriedades térmicas exigidas.

O cálculo das propriedades térmicas de sistemas construtivos é baseado em *layers* (camadas), sendo que cada *layer* está associado aos materiais correspondentes e suas espessuras (LIMA, 2007). O modo de visualização/edição de um componente construtivo possui três abas: *layers*, *image* e *calculated*, como descrito abaixo:

- *Layers* - O acesso a esta aba permite a nomeação do componente construtivo e a quantificação e dimensionamento das suas camadas. Ver Figura 5.17 (b).
- *Image* – É mostrada a visualização em escala do componente construtivo especificado na aba *layers* com relação às superfícies externas e internas. Ver Fig.5.18 (a).



(a)



(b)

Figura 5.17 - (a) Biblioteca de componentes e materiais construtivos acessados pela aba *Construction*, (b) Modo de edição de construction: aba *layers*.

- *Calculation* – Essa aba apresenta os valores referentes às propriedades térmicas do componente construtivo especificado. São mostrados coeficientes de convecção (interno e externo), bem como o resultado total da transmitância térmica (U). Os valores demonstrados “with bridging” não devem ser considerados nos cálculos para

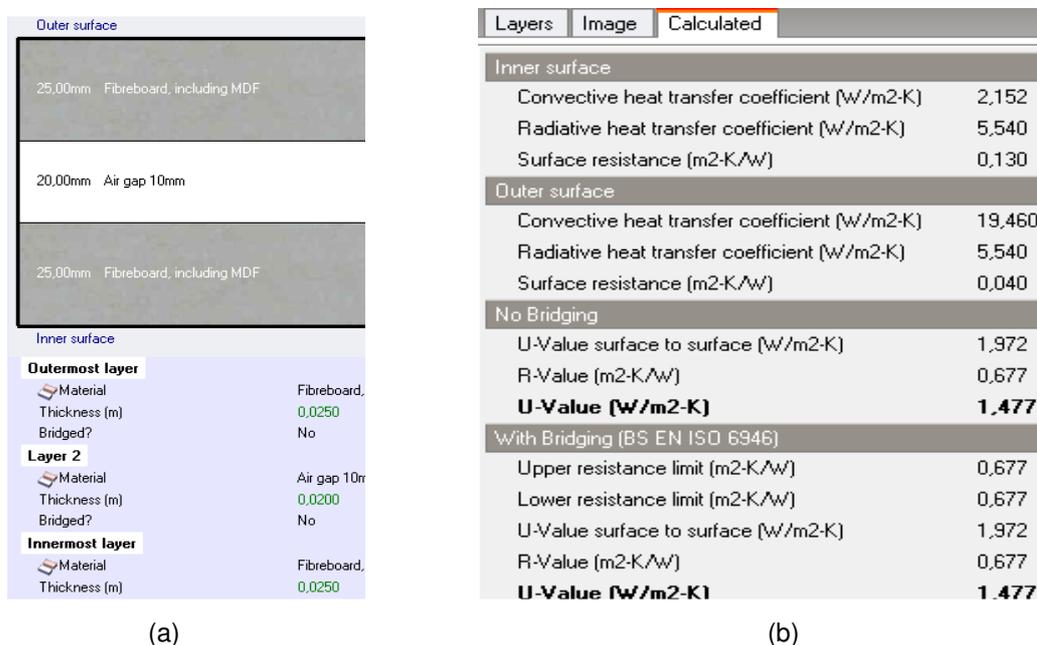


Figura 5.18- (a) Modo de edição de *construction*: aba *image*, (b) Modo de edição de *construction*: aba *calculation*

simulação, visto que o programa calcula com aproximação os valores das resistências térmicas de sistemas construtivos com materiais híbridos (LIMA, 2007). Ver Figura 5.18(b).

No modelo foram aplicados os materiais utilizados na construção do edifício, objeto de estudo, e descritos a seguir:

- Paredes externas - Refere-se somente às empenas, visto que as fachadas leste e oeste são totalmente envidraçadas⁴¹. Compostas por alvenaria de bloco cerâmico deitado com 20 cm, emboço externo e interno com 2,5cm, reboco interno e externo com 1,5cm e revestimento externo em cerâmica, na cor gelo e interno em pintura acrílica, na cor branca, com espessura total de 29 cm (Figura 5.19).

⁴¹ A parte opaca se resume na viga de concreto acima da janela.

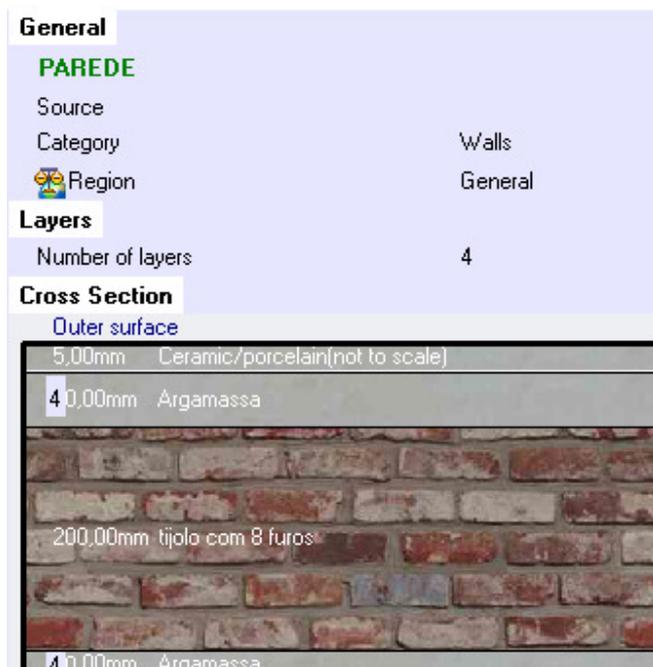


Figura 5.19 – Camadas dos materiais construtivos empregados nas paredes visualizados pelo programa.

- Partições internas - Divisórias piso-teto, de meio painel cego e meio de vidro transparente incolor com 4mm, sendo o painel cego composto por sanduíche de mdf de 1,9mm, revestido em laminado melamínico na cor bege, com manta interna em fibra de vidro, com espessura total de 7cm.
- Laje de piso - Composta por laje maçaça com 15cm, regularização com argamassa de 2cm e piso vinílico.
- Lajes intermediárias e de cobertura – Compostas pelas camadas que vão desde o forro até o piso vinílico (lajes intermediárias) e desde o forro até as placas de concreto de recobrimento do betume asfáltico (laje de cobertura) (Figura 5.20 “a” e “b”)

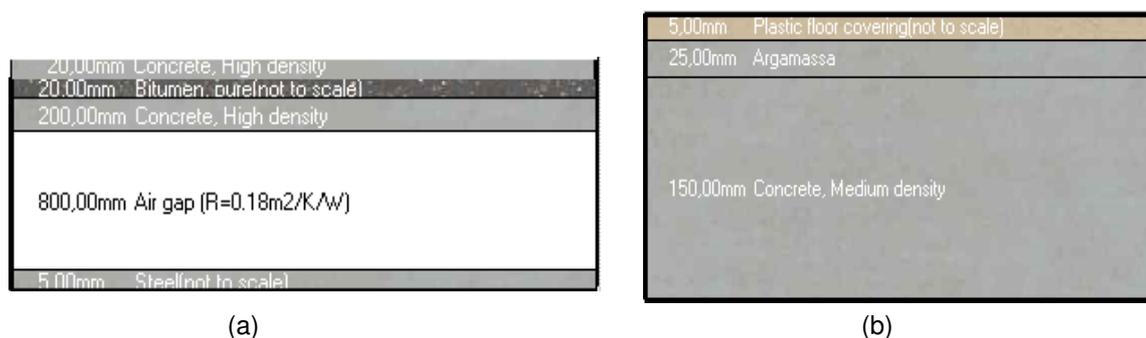


Figura 5.20 – (a) Camadas dos materiais construtivos da laje de cobertura visualizadas pelo programa, (b) Camadas dos materiais construtivos da laje de piso visualizadas pelo programa.

- Janelas de piso ao teto da fachada leste - Composta de esquadrias de ferro com pintura esmalte acetinada, na cor cinza e vidro temperado 6mm transparente com película prata espelhada de controle solar, marca Intercontrol.
- Janelas de piso ao teto da fachada oeste – Idem fachada leste, mas sem película de controle solar.

As portas não foram inseridas por terem pouquíssima influência no comportamento térmico dos ambientes. As janelas foram inseridas acessando a aba *Opening*. A tela apresentada nesta aba (Figura 5.21) possibilita a especificação das mais diferentes variáveis, quais sejam: a definição do tipo de vidro, tamanho dos peitoris e das janelas, porcentagem de aberturas na superfície (W.W.R.), definição e dimensionamento da esquadria e de persianas.

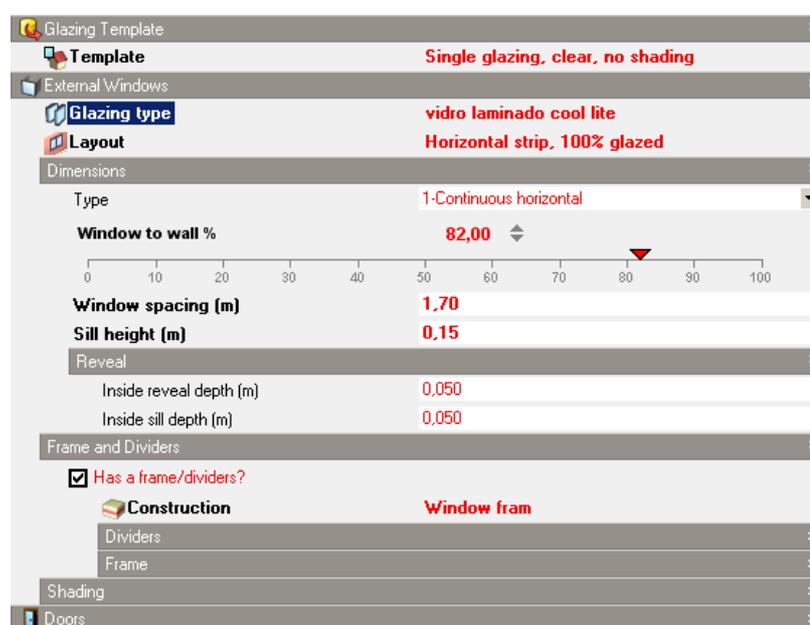


Figura 5.21 - Modo de edição: aba *opening*

5.3.1.1.4. Definição das cargas térmicas

Para a correta simulação dos ambientes climatizados foi de grande importância determinar a população de cada sala e do edifício objeto de estudo, bem como o levantamento de todas as fontes de dissipação de calor: iluminação, equipamentos e sistema de climatização. O programa DesignBuilder utiliza estas informações para determinar, na forma de rotinas ou “*schedulles*”, os horários de ocupação, operação de equipamentos e dos sistemas de

iluminação e ar condicionado e das temperaturas de *setpoint* do ar condicionado. Desta maneira, foi possível estimar a demanda de energia elétrica em cada hora, durante todo ano.

Como citado anteriormente, as zonas 3 e 4 (Ver Figura 5.22 “a” e “b”) são compostas por escritórios que foram distribuídos seguindo a modulação do edifício (1,70m), o que propiciou a uniformização das cargas térmicas. Cada escritório com 2 módulos (3,40 x 7,48m) acomodam no máximo quatro pessoas, possui quatro fileiras de luminárias com lâmpadas fluorescentes em conjuntos de 2x40W⁴² e um aparelho mini-split de condicionamento de ar. Como as cargas térmicas são estipuladas por metro quadrado, foi possível o agrupamento destes escritórios em uma zona única.

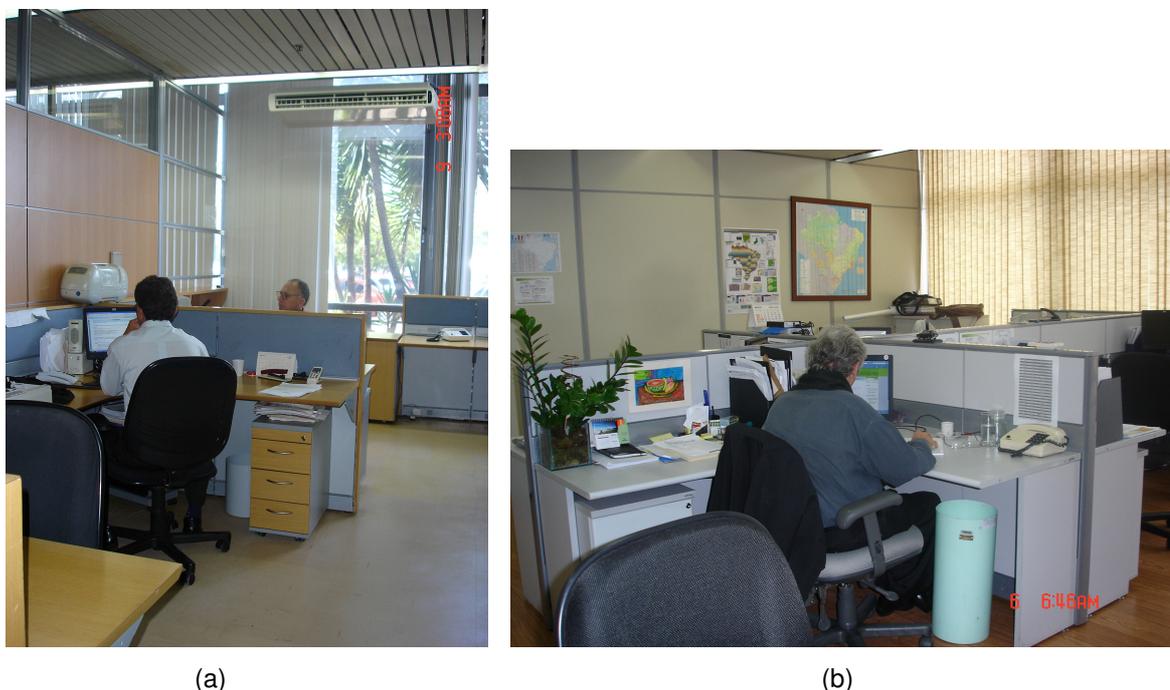


Figura 5.22 – (a) Modelo representativo de ambiente de trabalho da zona térmica da fachada leste, (b) Modelo representativo de ambiente de trabalho da zona térmica da fachada oeste.

A presença de pessoas nos ambientes é definida por meio do quantitativo, atividade e horário de ocupação. A densidade calculada para as zonas 3 e 4 é de 0,16 pessoas/m². A geração de calor metabólico considerada para uma pessoa trabalhando em um escritório, sentada, é 70 W/m² (ASHRAE, 2001).

Outra fonte de dissipação de calor é a iluminação artificial. Os ambientes analisados possuem iluminação artificial através de conjuntos de lâmpadas fluorescentes 2x40W, com reator de partida rápida interno, dispostos ao longo de uma calha contínua, obedecendo a

⁴² Nas manutenções periódicas as lâmpadas fluorescentes queimadas são substituídas por lâmpadas de 32W.

modulação do edifício. Apesar de 1/3 dessas lâmpadas terem sido projetadas para segurança, verificou-se que 100% permanecem ligadas durante o expediente, caracterizando uma densidade de potência de iluminação de 15W/m². O horário de funcionamento do sistema de iluminação está especificado na Figura 5.24 (a).

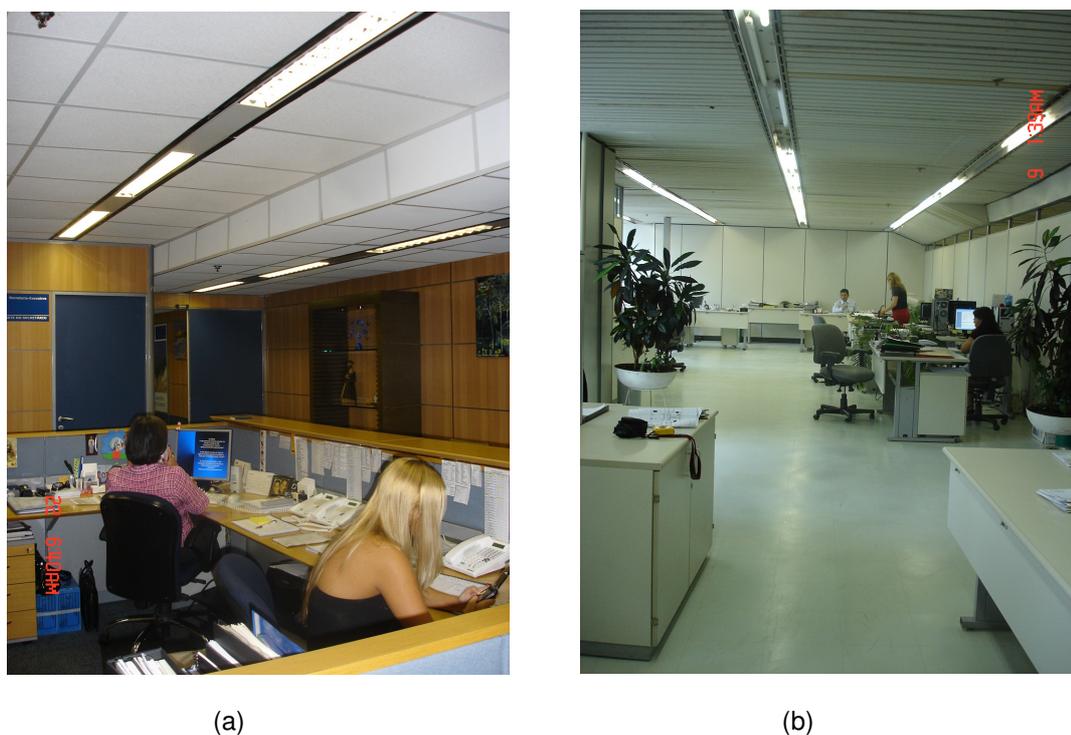


Figura 5.23- (a) Sistema de iluminação artificial de escritório padrão e forro em placas de aço pintado, (b) Sistema de iluminação artificial de escritório atípico⁴³ e forro em lambris de aço pintado.

Para análise do consumo elétrico total, foi feita uma amostragem da quantidade de equipamentos utilizados nos escritórios. Foi verificado que 90% dos funcionários tinham computadores e que as impressoras existiam na proporção de 1:2 funcionários. Em média, foram contabilizados quatro fotocopiadoras por pavimento. A potência nominal dos equipamentos foi determinada através da placa de identificação de cada aparelho (Tabela 5.13)

⁴³ A Figura 5.30 ilustra um escritório com densidade ocupacional menor que a de referência para o edifício.

Tabela 5.13 - Relação dos equipamentos da sala padrão de 2 módulos

Equipamentos elétricos e eletrônicos			
Quantidade	Equipamentos	Potência (W)	Tempo de uso diário (horas)
04	Computadores	350	8
02	Impressoras	50	3
01	Fax	600	2

Para proceder a simulação no DesignBuilder é necessário encontrar o coeficiente de funcionamento dos equipamentos nas zonas que estão sendo simuladas. Este coeficiente será usado no “schedule” do programa, e indica o quanto da potência total instalada está sendo utilizado no horário principal de interesse, neste caso, das 08h00min às 18h00min. Foi estabelecido a carga de 18 W/m² para equipamentos e 55 W/m² para computadores. O horário de funcionamento dos equipamentos está especificado na Figura 5.24 (b).

O levantamento de dados por meio de entrevistas informais (ver Anexo I) possibilitou delimitar as rotinas de ocupação, de acionamento do sistema de iluminação artificial e do condicionamento de ar e a operação dos equipamentos de escritório.

Estes dados foram fornecidos ao programa DesignBuilder através de “schedules” (rotinas) para caracterizar as diferentes formas de uso durante o ano, Figura 5.25. A rotina “compact” (mais usada) possui dados de ocupação ou uso (com valores entre 0 e 1), indicando a porcentagem de ocupação e até que hora essa porcentagem é válida, nas horas, dias e períodos do ano especificados pela rotina (Ver Figuras 5.24 “a” e “b”).

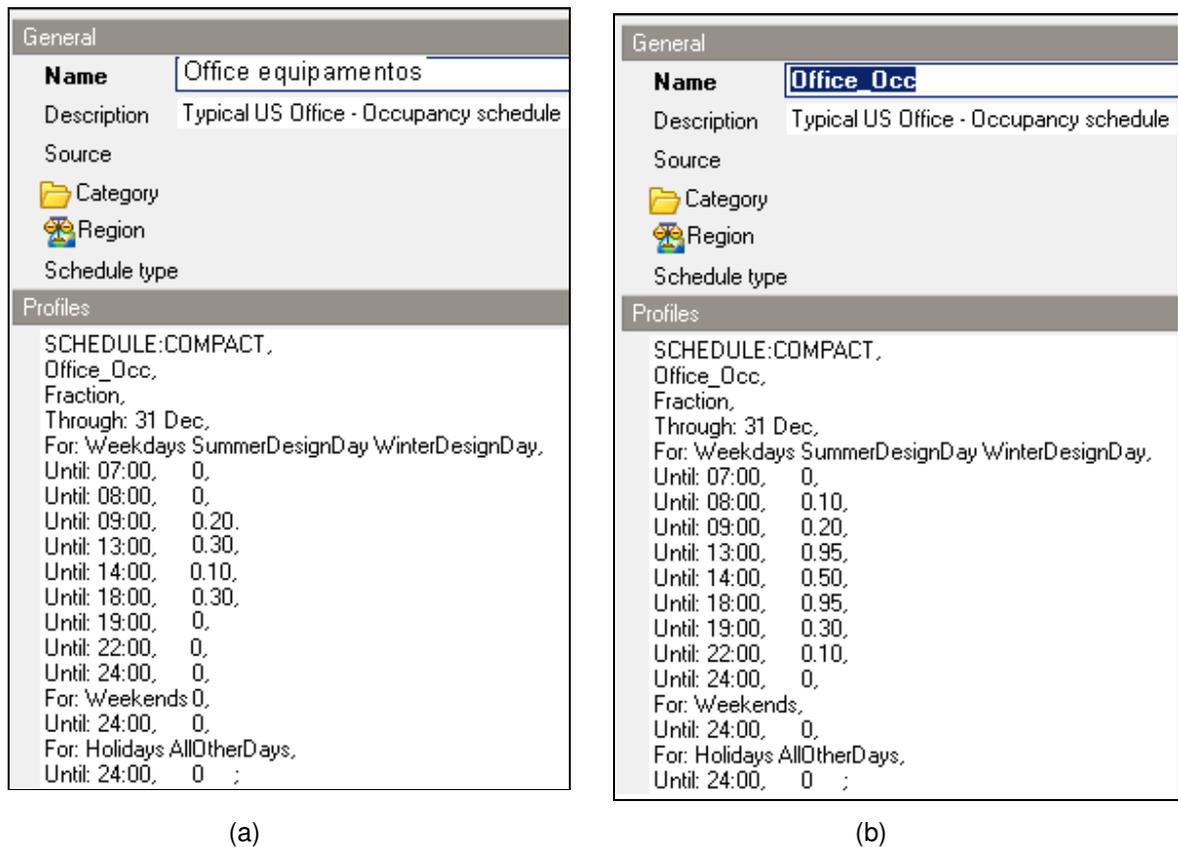


Figura 5.24- (a) Rotinas de ocupação e uso de computadores, iluminação e HVAC utilizadas no estudo, (b) Rotinas de uso de equipamentos de escritório utilizadas no estudo.

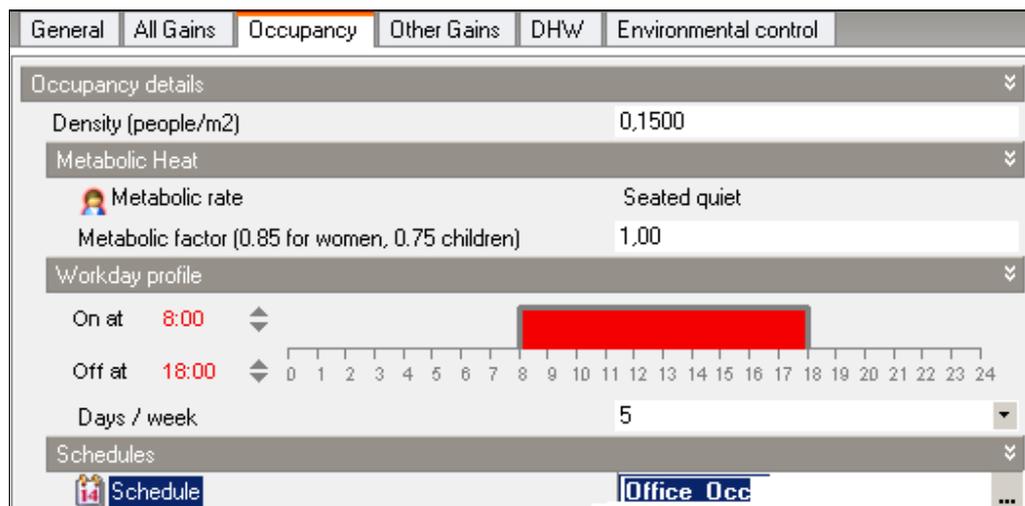


Figura 5.25- Modo de edição de rotinas (*schedules*) do programa DesignBuilder.

O sistema de condicionamento de ar é composto por aparelhos de expansão direta, mini-splits, com a capacidade em Btu/h⁴⁴ correspondente a área de resfriamento, grau de isolamento, exposição ao sol e número de pessoas por ambiente.

- Evaporador Minisplit Teto Stylus – MCX 12.000 Btu/h - para uma sala com 2 módulos, medindo 3,40 x 7,48m (25,43 m²).
- Evaporador Minisplit Teto Stylus – MCX 18.000 Btu/h - para uma sala com 3 módulos, medindo 5,10 x 7,48m (38,15 m²).
- Evaporador Minisplit Teto Stylus – MCX 24.000 Btu/h - para uma sala com 4 módulos, medindo 6,80 x 7,48m (50,86 m²).
- Evaporador Minisplit Teto Stylus – MCX 48.000 Btu/h - para uma sala com 6 módulos, medindo 10,20 x 7,48m (76,30 m²).

O sistema é composto de dois módulos. O evaporador fica dentro do ambiente e o outro (condensador), que tem o compressor, fica do lado de fora. Esses dois módulos são interligados por tubulações de passagem de gás refrigerante e dreno, além das interligações elétricas necessárias. Nos equipamentos convencionais, que inclui o modelo mini-split Stillus MCX adotado no edifício, quando se atinge a temperatura desejada, o compressor “desarma” (desliga), pois trabalha em velocidade constante. Quando o ambiente demanda que se atinja a temperatura novamente, o compressor é religado e o processo se reinicia.

O processo de desarme e religamento do compressor consome muita energia, porque o funcionamento já se reinicia em alta velocidade. O sistema “inverter”, utilizado em condicionadores mais eficientes, permite variar a velocidade do compressor evitando que o mesmo se desligue; fazendo-o chegar a uma velocidade bastante reduzida. Quando a temperatura do ambiente exigir, essa velocidade aumenta gradativamente, evitando alto consumo de energia elétrica.

Nas zonas 3 e 4, seguindo o critério de uniformização que a modulação pré-estabelece, foi determinado o valor de COP⁴⁵, através da média ponderada dos valores informados pelo fabricante pela área que ocupam. Assim, o valor COP declarado ao programa

⁴⁴ BTU - British Thermal Unit (Unidade Térmica Britânica). É, genericamente, a quantidade de calor necessária para reduzir a temperatura de uma libra de água (0,4536 litros) em um grau Fahrenheit (0,53 graus Celsius). Fonte: http://www.friomaxsp.com.br/dica_005.htm.

⁴⁵ COP- “Coefficient of Performance” ou Coeficiente de Desempenho representa o quociente entre a energia térmica (calor ou frio) fornecida por um equipamento de refrigeração e a energia elétrica consumida pelo sistema. Quanto maior for o COP, mais eficiente será o sistema. Fonte: <http://www.eco.edp.pt/pt/eficiencia>

foi 3. Por limitações do programa, as variações na demanda de climatização, que normalmente acontecem durante o dia, não são passíveis de declaração.

Tabela 5.14- Dados técnicos dos aparelhos Minisplit Stylix (Trane) e consumo por área.

Modelo	Capacidade (Btu/h)	Consumo Elétrico (W)	Área (m ²)	Consumo (W/m ²)	COP** (Wtér./ Welétr.)
MCX512 E	12.000	108	25, 43	4,25	2,56
MCX518 E	18.000	123	38,15	3,22	2,59
MCX524 E	24.000	161	50,86	3,16	2,87
MCX048 E	48.000	321	76,30	4,20	3,11

Fonte: <http://www.trane.com.br/2006/files/literatura/pdf3/79.pdf>

COP** - Valor teórico, informado pelo fabricante.

A modelagem da ocupação, iluminação e HVAC foi executada acessando as abas *activity*, *Lighting* e *HVAC*, respectivamente. Em todos os casos, todos os campos foram preenchidos, inclusive as informações referentes a computadores e equipamentos da aba *activity*, visto que foi acionado no módulo de cálculo *internal gains > early*, na configuração do modelo. Essa configuração básica deve ser realizada após a próxima etapa para que possa abranger todo edifício, visto influenciar nos tipos de cálculo (conforme os resultados esperados), podendo gerar simplificações ou configurações específicas.

5.3.1.1.5. Construção geométrica do modelo – 2ª Fase

O edifício estudado corresponde a um volume prismático, com a projeção dos 9 pavimentos exatamente iguais. O pavimento tipo (1º pavimento) se repete até o 8º pavimento. Os demais (1º subsolo, térreo e 9º pavimento) apresentam planta baixa idêntica divergindo apenas no pé-direito. Portanto, para simplificar o processo de modelagem do edifício foi adotada a seguinte sequência:

1. Modelagem do térreo (Bloco 1) e em seguida suas zonas térmicas (item 3.1.1.2);
2. Modelagem dos brises verticais;

Foram modelados como *component blocks*, para o Bloco 1, os brises verticais da fachada oeste. Este comando é utilizado para a modelagem de elementos que possuem algum impacto (visual ou de sombreamento), sem contudo formar zonas. A modelagem de *component blocks* é semelhante a modelagem de blocos e pode ser acessada pela barra de opções de

desenho, conforme apresentado na Figura 5.26. A Figura 5.27 representa o brise modelado conforme o modelo real.



Figura 5.26 - Opções de desenho do programa.

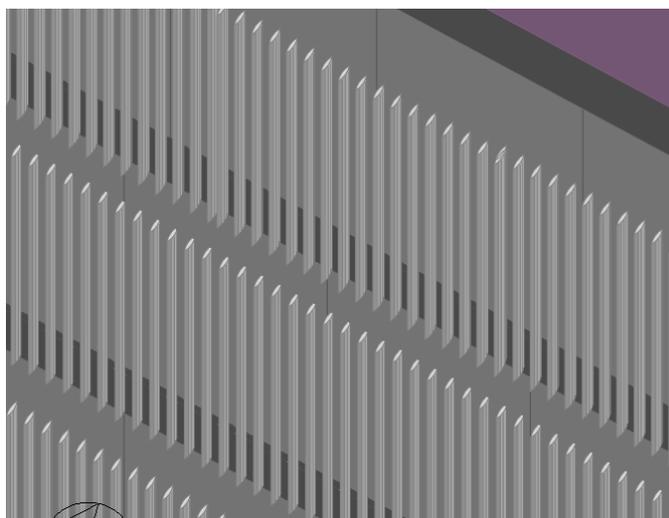


Figura 5.27- Brise modelado para a fachada oeste conforme a situação existente.

- O Bloco 1 foi copiado para um nível abaixo (1º subsolo), sendo editado o pé-direito e o tamanho das aberturas. Foram modeladas as paredes do fosso de ventilação e configuradas as cargas térmicas das zonas criadas;
- O Bloco 1 foi copiado com os brises verticais para um nível acima (1º pavimento-Bloco 2), sendo editado o pé-direito, o tamanho das aberturas e a altura dos brises;
- Criado o Bloco 2, que corresponde ao pavimento tipo, este é copiado até 8º pavimento, não sendo necessária nenhuma edição;
- Para criação do 9º pavimento (que corresponde ao Bloco 10), foi copiado o Bloco 9 a um nível acima e editado o pé-direito e o tamanho das aberturas. As platibandas foram modeladas com a importação de um planta “2D” do AUTOCAD, para locação

das paredes que fazem a limitação externa. A modelagem do edifício completo é visualizada pelas Figuras 5.28 e 5.29 abaixo.

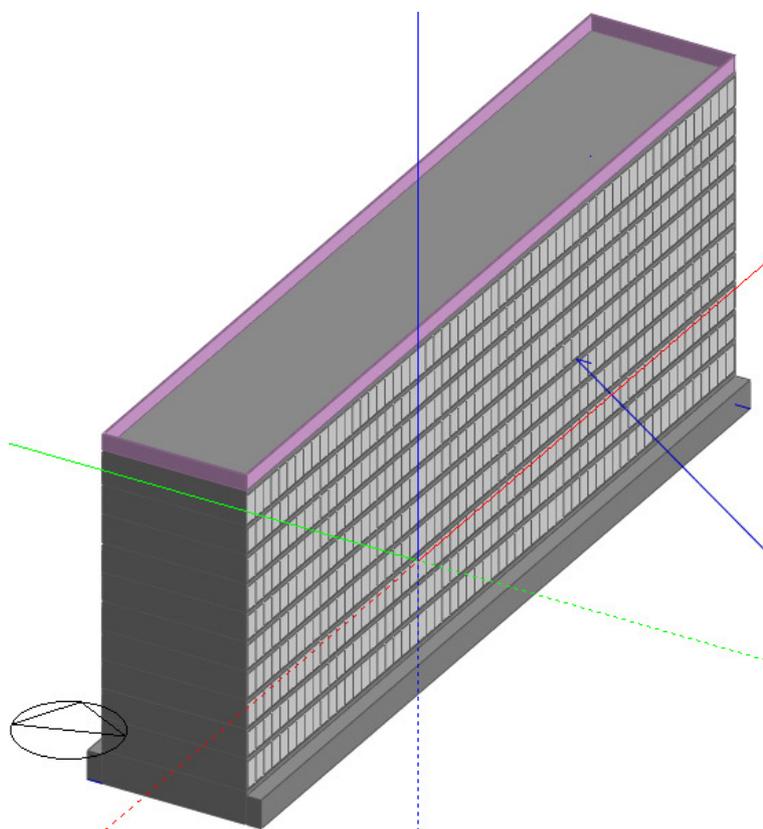


Figura 5.28 - Vista em perspectiva da fachada leste

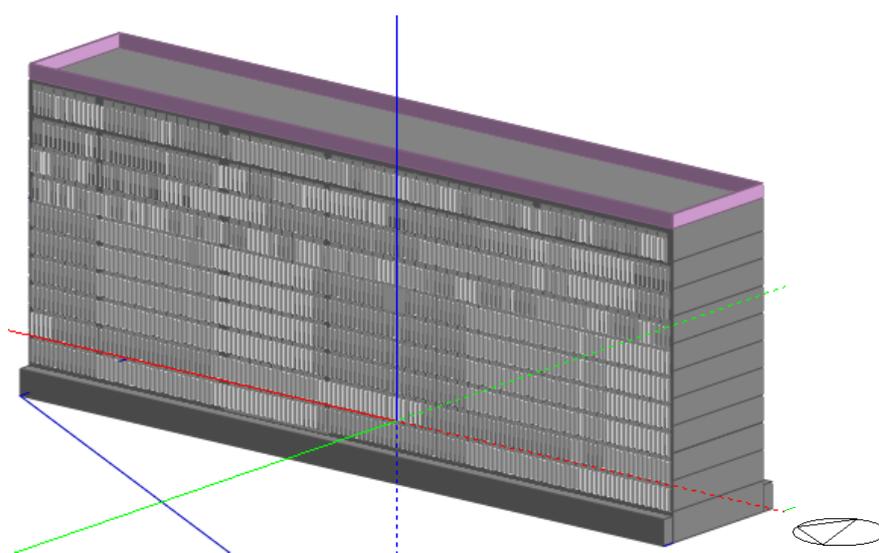


Figura 5.29 - Vista em perspectiva da fachada oeste (com brises verticais).

Com o edifício modelado, é possível fazer a configuração geral ao nível “Building” das superfícies que se repetem em todos andares, acionando a aba Construction, tais como: lajes intermediárias, partições internas, brises verticais e das paredes(empenas). Outras informações (entrada de dados) também podem ser efetuadas a este nível, como as características do sistema de iluminação (aba Lighting) e HVAC, uso de ventilação natural e taxas de infiltração (estipulada 1 troca/h), caso sejam adotados os mesmos parâmetros em todas as zonas.

5.3.1.1.6. Configuração do modelo

Esta etapa é de grande importância e seu pleno conhecimento favorece o sucesso e a credibilidade dos resultados. Para a configuração do modelo poderá ser utilizada a técnica da tentativa e erro, mas este processo é demorado, demandando meses para que os resultados apresentem a coerência desejada. Esse foi o caminho percorrido neste trabalho, visto a insuficiência de dados e explicações do tutorial do programa.

A janela de configurações “model options data”, acessada pelo ícone , no nível Building, é formada por 9 abas: data, advanced, heating design, cooling design, simulation, display, drawing tools, block e notes.

Neste trabalho, após a análise dos resultados de várias simulações, foram selecionadas as opções que paulativamente iam sendo testadas com bom êxito e se encaixavam à finalidade do estudo, resultando em uma margem de erro (modelo com a simulação calibrada) de 8,19% entre os resultados anuais simulados e os reais. A Figura 5.30 mostra as opções assinaladas da aba *data* do modelo final já calibrado.

A análise do processo possibilitou as seguintes conclusões, em relação aos itens assinalados da aba *data* (alto grau de relevância) :

1. Na seção *Scope* - Foi assinalado “*Building*”, visto se esperar resultados referentes ao edifício completo.
2. Na seção *Construction e Glazing data* – Foi assinalado *General* (por ter sido utilizado templates da lista fornecida) > *Separate* (por considerar elementos construtivos separados) > *Include constructions in zone volume > floor voids and ceiling* (por considerar o vazio do piso suspenso e do forro no cálculo do volume da zona).
3. Na seção *Gains Data* - Foi assinalado *Early* para possibilitar que os ganhos térmicos pudessem ser definidos para várias categorias.

4. Na seção *Timing* - Foi assinalado *Typical workday* (para que as rotinas pudessem ser definidas pelas horas de começo e fim, dias de trabalho por semana e variações sazonais -ar condicionado) > *HVAC + natural ventilation operates with occupancy* (para que os sistemas de climatização operem segundo a mesma rotina da ocupação).
5. Na seção *HVAC* - Foi assinalado *Compact* > *adequate* para o que sistema de climatização seja modelado em detalhe, dimensionando equipamentos e taxas para que as condições de conforto sejam atendidas. O cálculo é realizado pelo EnergyPlus.
6. Na seção *Natural Ventilation* - Foi assinalado *Scheduled* para que as taxas de ventilação fossem pré-definidas. No caso, foi utilizado o valor “0”, demonstrando que não haverá ventilação natural. A outra opção *Calculated* aumenta a complexidade do modelo e o tempo de simulação. Dessa forma, recomenda-se usar essa opção em modelos que tenha zonas ventiladas naturalmente e que a análise das taxas de renovação de ar seja relevante.

The screenshot shows the 'Data' tab in the EnergyPlus software interface. The configuration is as follows:

- Scope:** Whole building (Analyse the whole building).
- Construction and Glazing Data:** General construction templates (Construction default data is selected from a list). Floor/slab/ceiling representation: 2-Separate. Zone volume calculations: Floor voids included in zone volume (checked), Ceiling voids included in zone volume (checked).
- Gains Data:** Early gains (Internal gains are separated into various categories (e.g. occupancy, lighting, computing etc.)).
- Timing:** Typical workday. HVAC + natural ventilation operates with occupancy (checked). Internal gains operate with occupancy (unchecked).
- HVAC:** Compact HVAC (HVAC systems are defined parametrically and modelled within EnergyPlus using Compact HVAC descriptions). HVAC sizing: 1-Adequate.
- Natural ventilation:** Scheduled ventilation (Ventilation is defined as an air-change rate modified by an operation schedule and controlled using a set-point temperature).

Figura 5.30 – Opção de dados da aba *Data*.

5.3.2. Calibração do modelo

Seguindo a metodologia indicada por Westphal e Lamberts (2005), a calibração⁴⁶ do modelo do edifício foi dividido em uma sequência de 6 etapas:

A primeira etapa consistiu em representar as cargas constantes, sem dependência do clima externo (iluminação e equipamentos), e seus padrões de uso. Foram configuradas no modelo virtual completo (nível “*Building*”), sem detalhamentos construtivos e brises verticais. O levantamento dessas cargas (potência instalada e padrão de uso) foi realizado através de visitas ao edifício, pelas entrevistas informais aos usuários e pela análise das contas de energia elétrica para identificação do consumo em kWh/mês e gastos com energia elétrica. Estas faturas foram fornecidas pela Gerência de Manutenção do edifício e correspondem a um ciclo completo (janeiro a dezembro de 2008), como mostrado na Tabela 5.16

Tabela 5.16 – Consumo de energia elétrica mensal fornecido pelas faturas das contas de energia (2008).

Data	Equipamentos Iluminação (kWh)	Ar Condicionado (kWh)	Consumo Total (kWh)	Equipamentos e Iluminação (R\$)	Ar Condicionado (R\$)	Total (R\$)
jan/08	108.674	65.029	173.703	32.924,53	24.043,82	56.968,35
fev/08	112.294	83.540	195.834	32.097,18	28.551,13	60.648,31
mar/08	114.941	92.035	206.976	33.015,07	29.133,02	62.148,09
abr/08	116.420	65.112	181.532	36.572,90	26.448,00	63.020,90
mai/08	119.138	73.536	192.674	37.087,96	28.186,14	65.274,10
jun/08	125.708	52.214	177.922	40.178,91	23.377,11	63.556,02
jul/08	129.349	44.525	173.874	41.501,95	21.590,55	63.092,50
ag/08	123.212	44.934	168.146	39.660,04	21.600,10	61.260,14
set/08	125.567	73.536	199.103	43.749,64	28.186,14	71.935,78
out/08	125.438	89.435	214.873	42.875,98	32.633,50	75.509,48
nov/08	121.639	106.333	227.972	39.238,37	35.280,56	74.518,93
dez/08	126.642	78.245	204.887	38.547,12	27.334,05	65.881,17
Total	1.449.022	868.474	2.317.496	457.449,65	326.364,12	783.813,77

Porém, como não foi possível aferir com precisão as cargas instaladas por questões de segurança do edifício, adotando-se a análise de memória de massa ou a instalação de um medidor de energia, tornou-se impossível monitorar a curva de carga e detectar os momentos exatos em que os sistemas e equipamentos eram acionados. Nesse caso, a análise paramétrica dos valores das cargas de iluminação, equipamentos e cargas da energia reativa

⁴⁶ A calibração consiste em comparar dados de desempenho real com os de simulação, com objetivo de corrigir as variáveis de entrada para melhorar a fidelidade do modelo. Fonte: Pedrini, 1997.

(elevadores), esta última configurada inicialmente no campo *Process* e depois alterada para o *Miscellaneous* (aba *Activity*), tornou possível a calibragem do modelo nesta etapa inicial

Foram realizadas 10 simulações para que, parametricamente, fossem ajustados os comandos da configuração geral “*model options data*”, ao nível do edifício e os resultados expressassem a precisão desejada: uma margem de erro menor que 20%, em média, entre o consumo elétrico real mensal e o simulado para equipamentos e iluminação (WESTPHALL, 2005). A potência instalada em iluminação foi estimada em 17 W/m², a potência em equipamentos de tomadas foi estimada para computadores em 70 W/m², 18 W/m² (demais equipamentos) e 4 W/m² (elevadores).

Com a iluminação e equipamentos calibrados no modelo, inicia-se a segunda etapa, a qual consiste na análise de fluxo de calor nos dias de projeto, onde se caracterizam o envelope (geometria, janelas, proteção solar, orientação solar) e o sistema de condicionamento de ar fictício, o qual o EnergyPlus chama de “purchased air”. Nesta etapa o período de simulação necessário compreende apenas os dias típicos ou de pico de carga, para inverno e verão.

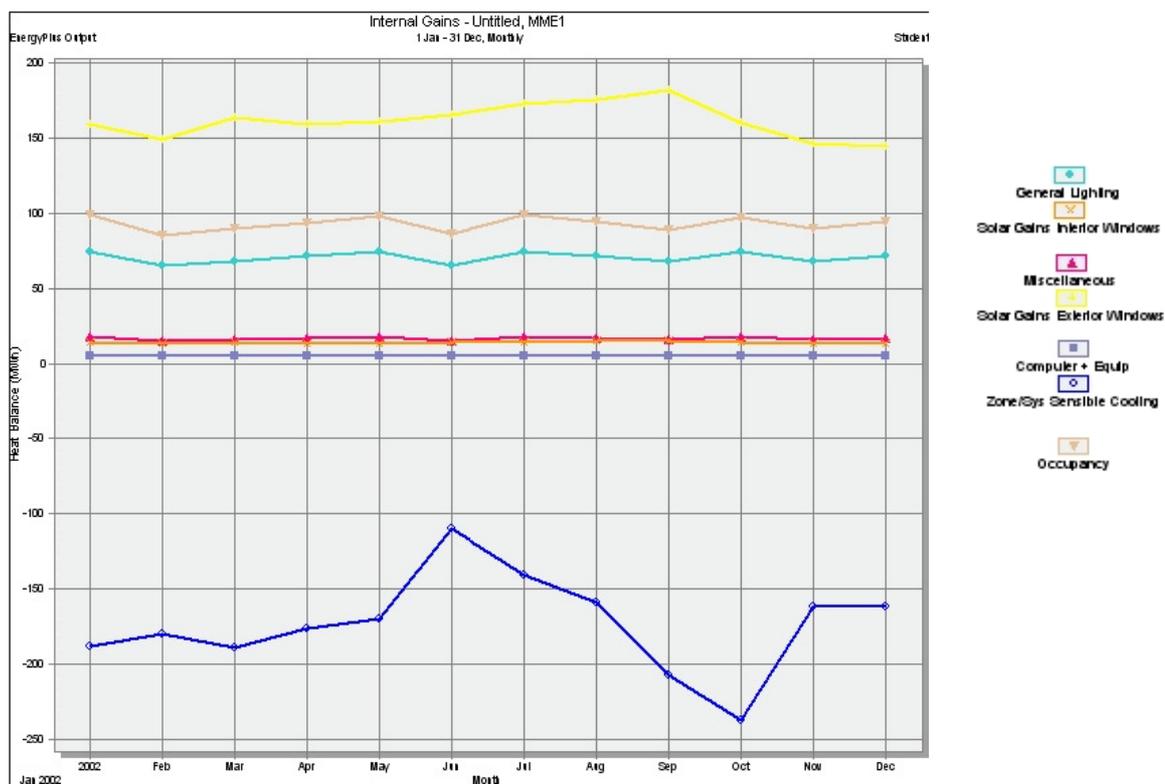


Figura 5.31- Perfil dos ganhos internos - 2ª etapa da calibração ;ados e classificados de acordo com a

Analisando o gráfico do perfil dos ganhos térmicos internos conclui-se que o ganho de calor provindo das janelas externas (radiação solar) corresponde a mais que o dobro do gerado pelo sistema de iluminação artificial. Desta maneira, deduz-se que a envoltória (janelas) é a maior fonte de ganhos térmicos desta edificação, devendo ser estudada de maneira mais criteriosa.

Na terceira etapa da calibração foi feita a análise de sensibilidade sobre parâmetros relacionados à caracterização das janelas. A simulação do dia de projeto foi realizada testando-se a influência das seguintes características das janelas: dimensões, área de aberturas e fator solar. Foram inseridos no programa os dados de entrada conforme os especificados no projeto e depois alterados cada um de uma vez (análise paramétrica). Verificou-se que a diminuição do fator solar gerava uma redução considerável no consumo de energia elétrica, e que os demais parâmetros não o alteravam consideravelmente.

Na quarta etapa, optou-se por não modificar qualquer parâmetro relacionado com o ganho de calor através das janelas no modelo real, visto que os dados de entrada não alteravam a precisão desejada, ou seja as dimensões e os materiais e componentes construtivos especificados para as aberturas representavam fielmente o modelo real. Entretanto, pôde-se deduzir que a variação dos dados de entrada do caso base, gerava variação do consumo do ar condicionado e que algumas variáveis de entrada de caracterização do envelope (fator solar e percentual de abertura nas fachadas) geravam uma maior diferença no consumo elétrico final, sem alterar as condições de conforto térmico.

Para confirmar os resultados da análise de sensibilidade das janelas realizada pelo DesignBuilder, também utilizou-se a Equação 2 (item 5.2.1) do RTQ-C, com a finalidade de melhor avaliar a influência dos parâmetros relacionados à caracterização das janelas. A diminuição do percentual de abertura nas fachadas (PAFt) em 50% (de 0,60 para 0,30) ou a diminuição do fator solar em 50% (de 0,53 para 0,26), em relação a situação existente (item 5.2.1), propiciou uma melhoria na etiqueta (ENCE) a ser conferida, passando de D para B. Reduzindo os dois parâmetros simultaneamente em 50% a etiqueta passou para A.

Na quinta etapa, executou-se a simulação de um ano completo de dados horários (8760h), substituindo-se o sistema de condicionamento de ar “purchased air” pelo real (mini-splits). Foram feitas análises paramétricas em relação ao COP (coeficiente de performance), já que os dados informados pelos fabricantes eram teóricos (não constavam nos catálogos). O modelo final calibrado apresentou o valor de COP = 3 (os testes foram feitos variando-se o COP de 2,7 à 3). O comparativo entre o consumo real e o consumo do modelo calibrado é representado pela Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Comparação entre o consumo do edifício real e o do modelado calibrado.

Data	Modelo Real (kWh)	Modelo Calibrado (kWh)	Diferença (kWh)	Diferença (%)
Janeiro	173.703	193.440,90	19.737,90	11,36
Fevereiro	195.834	175.323,50	-20.510,50	-10,47
Março	206.976	184.178	-22.798,00	-11,01
Abril	181.532	182.298,90	766,90	0,42
Mai	192.674	182.181,40	-10.492,60	-5,44
Junho	177.922	140.047,40	-37.874,60	-21,29
Julho	173.874	165.253,60	-8.620,40	-4,96
Agosto	168.146	166.080,70	-2.065,30	-1,23
Setembro	199.103	181.309	-17.794,00	-8,94
Outubro	214.873	205.657,70	-9.215,30	-4,29
Novembro	227.972	173.751,90	-54.220,10	-23,78
Dezembro	204.887	178.213,50	-26.673,50	-13,01
Total	2.317.496	2.127.736,50	-189.759,50	-8,19

A sexta etapa corresponde à análise dos resultados e ajustes finais. Verificou-se que nos meses de junho e de novembro a diferença ultrapassava a margem de erro de 20% e que o consumo total estimado pela simulação ultrapassava a margem de erro de 5%, recomendados para modelos calibrados (WESTPHAL, 2007). Analisando as faturas de energia elétrica do edifício constatou-se que os valores correspondiam aos 10 pavimentos e dois subsolos. O edifício modelado seguiu os pré-requisitos para análise do RTQ-C, visto que os seus resultados finais seriam comparados, portanto não foi modelado o 2º subsolo, por não ter contato com o meio exterior.

Como no 2º subsolo deste edifício existem somente áreas de depósitos e garagem (a área ocupada com atividades de escritório é mínima), não condicionadas artificialmente, pôde-se estimar o consumo de energia elétrica calculando a carga térmica do sistema de iluminação. A Tabela 5.18 resume este consumo.

Tabela 5.18- Consumo estimado para o modelo calibrado considerando o 2º subsolo.

Consumo modelo calibrado(kWh)	Iluminação do 2º subsolo + garagem (kWh)	Total (kWh)
2.127.737	181.602	2.309.339

Feito o ajuste nos valores do modelo calibrado, a diferença entre o consumo do edifício real e o consumo do modelo calibrado, demonstra o êxito da calibração do modelo, como visto na Tabela 5.19 e Figura 5.32.

Tabela 5.19- Comparação entre o consumo do edifício real e o do modelado calibrado.

Data	Modelo Real ConsumoTotal (kWh)	Modelo Calibrado ConsumoTotal (kWh)	Diferença (kWh)	Diferença (%)
Janeiro	173.703	208.574	34.871	20,08
Fevereiro	195.834	190.457	-5.377	-2,75
Março	206.976	199.495	-7.481	-3,61
Abril	181.532	197.432	15.900	8,76
Maio	192.674	197.314	4.640	2,41
Junho	177.922	155.180	-22.742	-12,78
Julho	173.874	180.387	6.513	3,75
Agosto	168.146	181.214	13.068	7,77
Setembro	199.103	196.442	-2.661	-1,34
Outubro	214.873	220.791	5.918	2,75
Novembro	227.972	188.885	-39.087	-17,15
Dezembro	204.887	193.347	-11.540	-5,63
Total	2.317.496	2.309.518	-7.978	-0,34

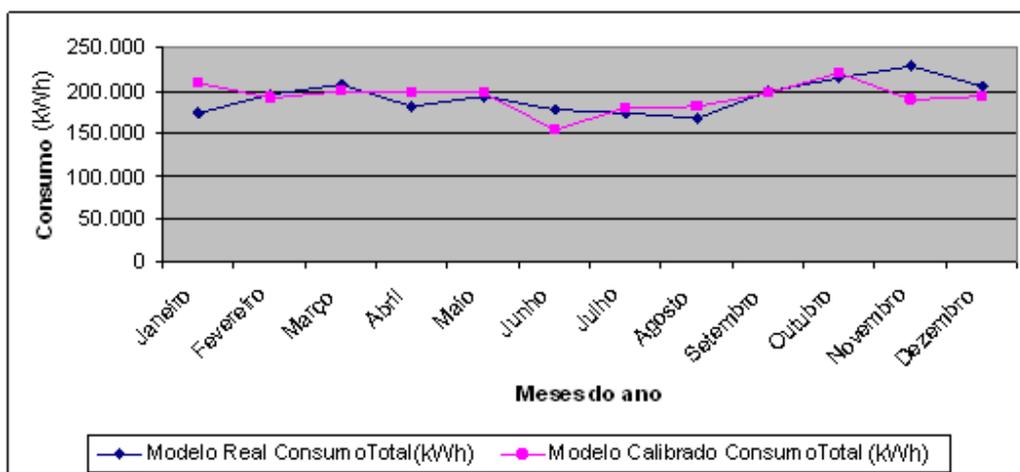


Figura 5.32 - Comparação entre o consumo do edifício real e o do modelado calibrado.

Com relação ao uso final de energia elétrica do modelo calibrado, o sistema de maior participação no consumo anual é o ar condicionado, com 47% de representatividade, seguida da iluminação artificial, com 41% de participação e 12% dos equipamentos.

5.3.3. Criação dos modelos de referência

Para avaliação da eficiência da envoltória, foram desenvolvidos quatro modelos de referência, um para cada nível de eficiência (A, B, C e D). Esta análise minuciosa é importante, visto proporcionar maior flexibilidade na escolha das alternativas de *retrofit* (modelos propostos) que apresentarão mais vantagens (viabilidade técnica e financeira). Os modelos de referência construídos serviram de base para comparação com o modelo real.

De acordo com o RTQ-C, os modelos de referência foram modelados para atingir o nível de eficiência pretendido, no entanto, alguns parâmetros são fixos em todos os modelos. A transmitância térmica e a absorptância solar, tiveram os valores máximos definidos pela metodologia prescritiva, para o nível de eficiência desejado. Da mesma forma foi calculado o PAFt, de modo a se obter o maior percentual de aberturas para o nível desejado. O procedimento de cálculo seguiu a sequência abaixo:

1. Os parâmetros da metodologia prescritiva (RTQ-C) referentes ao AVS (ângulo vertical de sombreamento) e AHS (ângulo horizontal de sombreamento) são mantidos constantes e igual à zero. Portanto os modelos de referência foram modelados sem os brises verticais;
2. É adotado o $FS=0,87$, correspondente a vidro simples, com 3mm;
3. Adota-se o FF (fator de forma) e o FA (fator altura) do modelo proposto. Como o FF e o FA do modelo proposto e do real são iguais, logo $FF=0,16$ e $FA=0,09$ (ver item 2.1);
4. Determinou-se o IC para a classificação desejada, a partir da Equação 2 (item 2.1), para a zona bioclimática 4 (referente a cidade de Brasília). Os valores utilizados para o cálculo do $IC_{máx}$ e $IC_{mín}$, são encontrados nas Tabelas 2.2 e 2.4, respectivamente;
5. Foram substituídos os valores da Tabela 2.2, na Equação 2, para a determinação do $IC_{máx}$; da mesma forma foram substituídos os valores da Tabela 2.4, na Equação 2, para a determinação do $IC_{mín}$. Os valores são os mesmos encontrados nas Tabelas 2.3 ($IC_{máx}=293$) e 2.5 ($IC_{mín}=85$);
6. No passo seguinte, foram substituídos estes valores na Equação 3 (item 2.2). Com o valor de i calculado ($i = 52$), encontra-se o IC do nível pretendido na Tabela 2.7
7. Para o cálculo do modelo de referência A, substituiu-se o valor de “ i ”, no limite gerado para o nível A ($IC_{máx} - 3i = 137$), logo o $IC=137$.
8. Como valor de IC encontrado para o modelo de referência A, substituiu-se este valor na Equação 1, mantendo-se constantes os valores dos itens 1, 2 e 3 para se encontrar o

valor do PAFt do modelo. Esta sequência foi repetida para se encontrar os PAFts de todos os modelos de referência pretendidos. Na Tabela 5.20 abaixo, se encontram os valores dos PAFts encontrados.

Tabela 5.20 - Valor dos PAFts para os modelos de referência

	Modelos de Referência			
	A	B	C	D
PAFts	0,15	0,24	0,34	0,44

9. Portanto, o modelo de referência A foi modelado com 15% de aberturas em suas fachadas. Estas aberturas foram distribuídas nas fachadas leste e oeste, na mesma proporção do modelo real. O mesmo foi feito em relação aos outros modelos.

5.3.3.1. Simulação dos modelos de referência

Após a modelagem completa do edifício (modelo de referência A) foi rodada a simulação para um período completo de um ano (8760 horas). A Tabela 5.21 compara o consumo do modelo real calibrado com o modelo de referência A. As temperaturas operativas (TO), nos dois modelos, se mantêm dentro do limite de conforto para ambientes condicionados, que é o considerado entre 21 ° e 26 °C, bem como a umidade relativa, variando entre 42 e 60%, conforme a NBR 16401-2.

Tabela 5.21-Comparação dos valores de consumo (kWh) e de TO* entre o modelo calibrado e o modelo de referência A.

Data (meses do ano)	Modelo Calibrado Consumo (kWh)	TO* (°C)	Modelo Referência (Etiqueta A) Consumo (kWh)	TO* (°C)
1	193.441	24,63	167.646	23,77
2	175.324	24,79	148.963	23,90
3	184.178	24,94	157.394	24,04
4	182.299	24,74	159.785	23,87
5	182.181	24,19	162.278	23,35
6	140.047	23,76	126.653	21,62
7	165.254	24,40	148.595	21,35
8	166.081	24,91	146.395	22,88
9	181.309	25,28	154.945	24,38
10	205.658	25,25	178.489	24,50
11	173.752	24,54	152.404	24,62
12	178.214	24,24	156.808	24,39
Total (kWh)	2.127.737		1.860.354	

TO* - Temperatura operativa

Portanto, os modelos propostos⁴⁷ que serão submetidos a certificação almejando a etiqueta A, B,C ou D terão que apresentar o consumo menor ou igual ao destes respectivos modelos de referência. Os valores comparativos dos consumos mensais e anuais dos modelos de referência se encontram na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 - Comparação dos valores de consumo (kWh) entre o modelo real e os modelos de referência.

Data (meses do ano)	Edifício Real (kWh)	Modelo Calibrado (kWh)	Modelo de Referência (Etiqueta D) (kWh)	Modelo de Referência (Etiqueta C) (kWh)	Modelo de Referência (Etiqueta B) (kWh)	Modelo de Referência (Etiqueta A) (kWh)
1	173.703	193.441	193.038	183.848	174.051	167.646
2	195.834	175.324	174.701	165.353	155.415	148.963
3	206.976	184.178	183.949	174.133	163.926	157.394
4	181.532	182.299	181.615	173.434	165.123	159.785
5	192.674	182.181	180.505	173.636	166.749	162.278
6	177.922	140.047	139.067	134.134	129.564	126.653
7	173.874	165.254	163.968	157.841	152.165	148.595
8	168.146	166.081	164.586	157.465	150.668	146.395
9	199.103	181.309	179.591	170.648	161.233	154.945
10	214.873	205.658	205.391	195.849	185.529	178.489
11	227.972	173.752	172.434	165.003	157.346	152.404
12	204.887	178.214	178.952	170.763	162.294	156.808
Total (kWh)	2.317.496	2.127.737	2.117.797	2.022.105	1.924.061	1.860.353,81

A análise dos resultados fornecidos pelo modelo calibrado é de extrema importância para a elaboração de propostas de *retrofits*. Após a análise de sensibilidade dos parâmetros, pode-se identificar quais variáveis de entrada geram uma maior diferença no consumo final do edifício. Estas variáveis de maior influência devem receber atenção especial nas representações dos modelos propostos para que seja viabilizado o sucesso das propostas .

Pela análise dos parâmetros relacionados aos ganhos de calor pela janela (2ª, 3ª e 4ª etapas da calibração), pôde-se deduzir que a variação dos dados de entrada do caso base gerava variação do consumo do ar condicionado e que algumas variáveis de entrada de caracterização da envoltória (fator solar e percentual de abertura nas fachadas) geravam uma maior diferença no consumo elétrico final, sem alterar as condições de conforto térmico.

Verificou-se que a análise de sensibilidade dos parâmetros da equação do Índice de Consumo da envoltória (metodologia prescritiva/ RTQ-C) e da calibração do modelo

⁴⁷ De acordo com o RTQ-C, os modelos propostos são os modelos virtuais desenvolvidos para representar as modificações (*retrofit*) executadas no modelo real visando eficiência energética.

(metodologia da simulação/ RTQ-C) apontaram os mesmos resultados, ou seja, que variações no percentual de abertura das fachadas (PAFt) e no fator solar (FS) dos vidros provocam alterações consideráveis nos resultados, sendo que a redução destes valores repercute em melhores níveis de eficiência energética. Em razão disto, alguns parâmetros de entrada referente à envoltória, relacionados aos ganhos de calor pelas janelas, serão substituídos na modelagem dos edifícios propostos para verificar a influência destes no conforto térmico e consumo de energia elétrica da edificação.

5.3.4. Propostas de *retrofit* para a envoltória

Em função dos resultados apontados foram estudados alguns materiais e componentes construtivos considerando, especificamente, o mercado de reabilitação de edificações de escritórios. Além disso, ficou esclarecido na Revisão Bibliográfica que a racionalização e a adaptação do sistema de vedações verticais, principalmente com a utilização de pré-moldados ou painéis industrializados (EPS, painel Wall, etc.), proporcionam alto rendimento de produtividade de montagem e assim, menor prazo para conclusão dos serviços, menos entulho ou perda de material e não paralisa as atividades rotineiras dos ambientes de trabalho, pois a reforma é executada a seco.

Dessa maneira, todas propostas potencialmente viáveis para o *retrofit* da envoltória dos Ministérios objetivaram à mínima interferência na fachada, a organização e a limpeza na execução da reforma, facilidade de manutenção, possibilidade de instalação em edifícios existentes, e sobretudo melhorias nas condições de conforto dos ambientes e em consequência na sua performance energética.

Foram modeladas as propostas (modelos propostos) de modo a conferir ao edifício dos Ministérios as etiquetas (ENCE) A , B, C e D. Apesar de todos os esforços terem sido, neste trabalho, para conferir a etiqueta A ao edifício, somente através dos estudos de viabilidade financeira poderão ser encontradas as propostas mais eficientes e vantajosas.

5.3.4.1. Alternativas para propostas de *retrofit* da envoltória

Para analisar a influência do ganho de calor pelas aberturas e pelos fechamentos opacos da envoltória no conforto térmico dos usuários e no consumo de energia elétrica, de modo a estabelecer critérios, do ponto de vista qualitativo e quantitativo, para o *retrofit* de envoltória de edifícios de escritórios, foram simuladas as seguintes variáveis:

- Redução da área de janela nas fachadas (PAF);
- Tipo de fachada: simples e dupla, visando a redução da transmitância térmica (U);
- Redução do fator solar (FS) do vidro;
- Uso de isolante térmico EPS como fechamento opaco interno nas fachadas envidraçadas;
- Uso de painel Wall como fechamento opaco interno nas fachadas envidraçadas, visando a redução da transmitância térmica (U);
- Uso de isolante térmico EPS na cobertura.

As alternativas foram testadas nas fachadas leste e oeste simultaneamente. Para nomear as diferentes alternativas foram atribuídas “letras” para cada uma das variáveis definidas, conforme a Tabela 5.23. Já a Tabela 5.24 mostra como foram obtidas as diferentes alternativas de simulação a partir das variáveis.

Tabela 5.23 – Valores adotados para as variáveis nas simulações dos modelos propostos.

Parâmetros	Valores	Alterações adotadas	Código
Percentual de abertura nas fachadas (PAFt)	43%	Peitoril interno com 85cm	A
	38%	Peitoril interno com 110 cm	B
	60%	Sem alteração	C
Fator solar do vidro (FS)	57	Vidro Low-e	D
	29,9	Vidro Cool Lite	E
	23	Vidro + Película	F
	44,3	Vidro Reflect Float	G
	30,5	Vidro Cool Lite laminado	H
Tipo de fachada	*	simples	I
	*	dupla	J
Isolante EPS TI aplicado internamente à fachada	R = 1,25 m ² K/W	75mm	L
	R = 1,52 m ² K/W	90mm	M
Painel Wall aplicado internamente à na fachada	R = 0,27 m ² K/W	40mm	N
Cobertura	U=0,60 W/m ² K	Isolante EPS -35 mm	O
	U=1,70 W/m ² K	Sem isolante	P

* Os valores de “U”, nestes casos, serão resultado das combinações dos materiais construtivos que compõe as fachadas simples e duplas propostas.

Tabela 5.24 – Alternativas de simulações a serem realizadas - Modelos propostos.

Parâmetros	PAF(%)			Fator solar do vidro					Tipo de fachada		Fechamento opaco			Cobertura		Combinações de Variáveis
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O	P	
I			X			X			X						X	CFIP
II			X		X				X					X		CEIO
III	X					X			X		X				X	AFILP
IV	X					X			X				X		X	AFINP
V	X					X			X				X		X	AFINP*
VI	X				X				X		X				X	AEILP
VII	X				X				X		X			X		AEILO
VIII	X				X				X				X		X	AEINP
IX	X			X					X		X			X		ADILO
X	X					X			X		X			X		AFILO
XI		X					X			X	X			X		BGJLO
XII		X					X			X	X			X		BGJLO**
XIII	X							X		X	X			X		AHJLO
XIV	X							X		X		X		X		AHJMO
XV	X				X				X				X	X		AEINO

A F I N P* - Nesta alternativa foi retirada a câmara de ar interna.

B G J L O** - Nesta alternativa a câmara de ar foi modelada com 12 cm.

5.3.4.2. Caracterização dos modelos propostos

Os modelos propostos neste estudo de caso representam as propostas de retrofit, os quais foram desenvolvidos para testar a viabilidade da incorporação de modificações na envoltória do modelo real através dos impactos destas alterações na temperatura interna e na redução do consumo de energia, pela diminuição da energia de refrigeração demandada para manter as condições conforto nas zonas.

Para avaliação dos parâmetros construtivos adequados para o *retrofit* de envoltória do edifício, objeto do estudo de caso, além da bibliografia pesquisada foi utilizada a análise paramétrica, onde cada parâmetro foi inserido, um de cada vez, para avaliar as melhorias na redução da carga térmica por insolação. Abaixo, estão caracterizadas as modificações

propostas em cada alternativa (modelos propostos), sendo que os valores de ‘U’ e ‘R’ apresentados nas figuras foram calculados automaticamente pelo programa DesignBuider :

Modelo Proposto I

Este modelo foi desenvolvido tendo como base o modelo real, sendo inserida a seguinte modificação:

- Foi acrescentado película de controle solar prata refletiva nos vidros das esquadrias da fachada oeste. Os dados referente ao componente modificado foram fornecidos ao programa de acordo com o item 5.2.1.

Calculated Values	
Total solar transmission (SHGC)	0,272
Direct solar transmission	0,111
Light transmission	0,128
U-Value (W/m ² -K)	6,121

Figura 5.33- Propriedades do vidro especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto I calculado pelo programa.

Modelo Proposto II

Este modelo foi desenvolvido tendo como base o modelo proposto I, sendo inserida a seguinte modificação:

- Na cobertura foi modelada uma camada de EPS com 35mm + 20mm de argamassa + câmara de ar com 200mm + telhado de fibrocimento, acima das existentes.

Outer surface	
5,00mm	PVC/Asbestos Tiles(not to scale)
200,00mm	Air gap >=15mm (upwards)
20,00mm	Argamassa(not to scale)
35,00mm	EPS Expanded Polystyrene (Heavyweight)
10,00mm	Bitumen (not to scale)
200,00mm	Concrete, High density
800,00mm	Air gap >=15mm (upwards)
5,00mm	Steel(not to scale)
Inner surface	

Figura 5.34- Camadas dos materiais construtivos empregados na cobertura do Modelo Proposto II, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder.

Layers	Image	Calculated
Inner surface		
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)		8,153
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)		1,847
Surface resistance (m ² -K/W)		0,100
Outer surface		
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)		19,870
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)		5,130
Surface resistance (m ² -K/W)		0,040
No Bridging		
U-Value surface to surface (W/m ² -K)		0,666
R-Value (m ² -K/W)		1,642
U-Value (W/m²-K)		0,609

Figura 5.35- Propriedades físicas resultantes do novo componente construtivo (cobertura) especificado para o Modelo Proposto II.

Modelo Proposto III

Este modelo foi desenvolvido tendo como base o modelo real, sendo inserida a seguinte modificação:

- Internamente às esquadrias das fachadas leste e oeste, foi modelado, intercalado por uma câmara de ar com 10 cm, um peitoril com 85cm de altura em painéis modulares de EPS (com 70mm), com as duas faces pintadas na cor branca. Este painel deverá ser estruturado em perfil de aço “U” com 2cm, chumbado na base metálica existente. O acabamento superior deverá ser executado em perfil de aço “U” com 2cm, chumbado nos montantes laterais em aço, que por sua vez deverão ser fixados nos montantes existentes. As características dos vidros existentes foram mantidas: fachada leste com vidro e película de controle solar refletiva prata e fachada oeste, sem película.

Outer surface	
6,00mm	vidro(not to scale)
1,00mm	película(not to scale)
100,00mm	Air gap >=15mm (upwards)
70,00mm	EPS Expanded Polystyrene (Heavyw
Inner surface	

Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	2,152
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,540
Surface resistance (m ² -K/W)	0,130
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	19,870
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,130
Surface resistance (m ² -K/W)	0,040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0,460
R-Value (m ² -K/W)	2,343
U-Value (W/m²-K)	0,427

(a)

(b)

Figura 5.36- (a) Camadas dos materiais construtivos empregados nas paredes das fachadas leste e oeste do Modelo Proposto III, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder, (b) Propriedades físicas resultantes do novo componente construtivo (vedações externas) especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto III.

Modelo Proposto IV

Este modelo foi desenvolvido tendo como base o Modelo Proposto III, sendo inserida a seguinte modificação:

- Foi substituído o painel em EPS por painel Wall com 40mm, com as duas faces pintadas na cor branca, no peitoril a ser construído com 85 cm de altura, internamente às esquadrias das fachadas leste e oeste.

Outer surface	
6,00mm	Glas(not to scale)
5,10mm	película(not to scale)
100,00mm	Copy of Air gap 7mm
40,00mm	PAINEL WALL
Inner surface	

Layers	Image	Calculated
Inner surface		
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)		5,230
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)		2,462
Surface resistance (m ² -K/W)		0,130
Outer surface		
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)		19,870
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)		5,130
Surface resistance (m ² -K/W)		0,040
No Bridging		
U-Value surface to surface (W/m ² -K)		2,217
R-Value (m ² -K/W)		0,621
U-Value (W/m²-K)		1,610

(a)

(b)

Figura 5.37- (a) Camadas dos materiais construtivos empregados nas paredes das fachadas leste e oeste do Modelo Proposto IV, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder, (b) Propriedades físicas resultantes do novo componente construtivo (vedações externas) especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto IV.

Modelo Proposto V

Este modelo foi desenvolvido tendo como base o Modelo Proposto IV, sendo inserida a seguinte modificação:

- Foi retirada a câmara de ar.

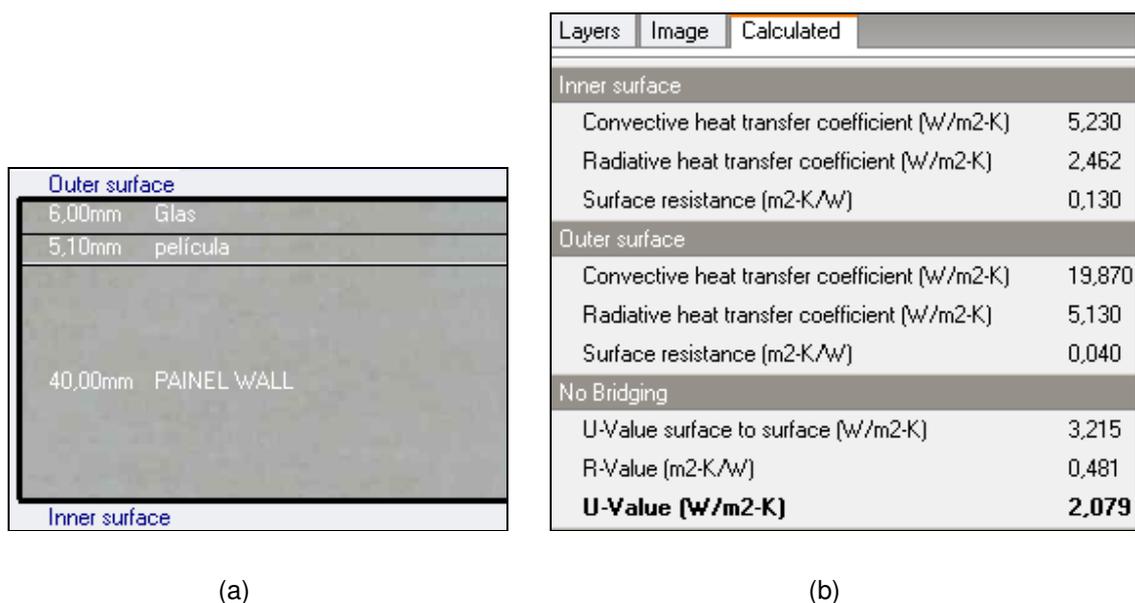


Figura 5.38 -(a) Camadas dos materiais construtivos empregados nas paredes das fachadas leste e oeste do Modelo Proposto V, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder, (b) Propriedades físicas resultantes do novo componente construtivo (vedações externas) especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto V.

Modelo Proposto VI

Este modelo foi desenvolvido tendo como base o Modelo Proposto III, sendo inserida a seguinte modificação:

- A câmara de ar foi alterada para 5cm e substituídos os vidros existentes pelos vidros Sgl-Ref-B-H-Tint 6mm, da biblioteca do Energyplus, que possui características semelhantes ao vidro laminado Cool Lite PR 120 4.4.1 Prata. Esta modificação possibilitará testar a redução do Fator Solar (FS). Além disso, este vidro se assemelha esteticamente ao vidro com película existente.

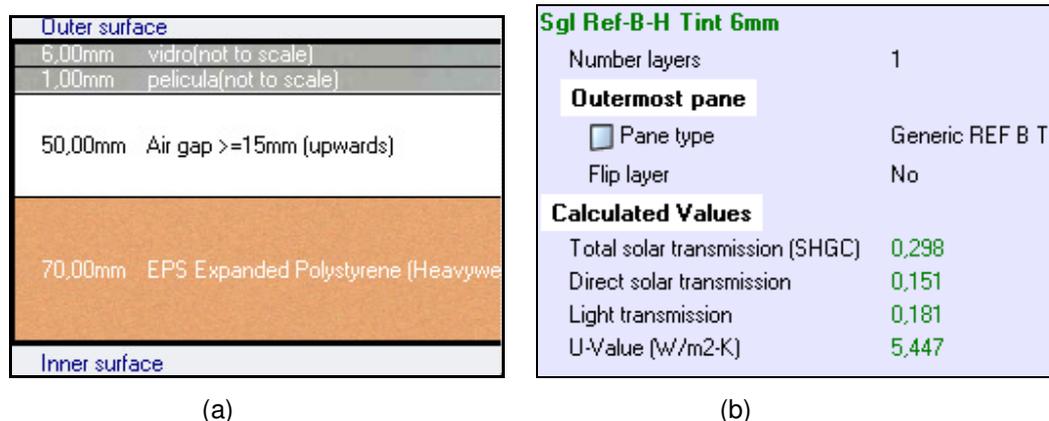


Figura 5.39- (a) Camadas dos materiais construtivos empregados nas paredes das fachadas leste e oeste do Modelo Proposto VI, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder, (b) Propriedades físicas resultantes do vidro especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto VI.

Modelo Proposto VII

Este modelo foi desenvolvido a partir do Modelo Proposto VI, sendo inserida a seguinte modificação:

- Na cobertura foi modelada uma camada de EPS com 35mm + câmara de ar com 250mm + telhado de fibrocimento, acima das camadas existentes.

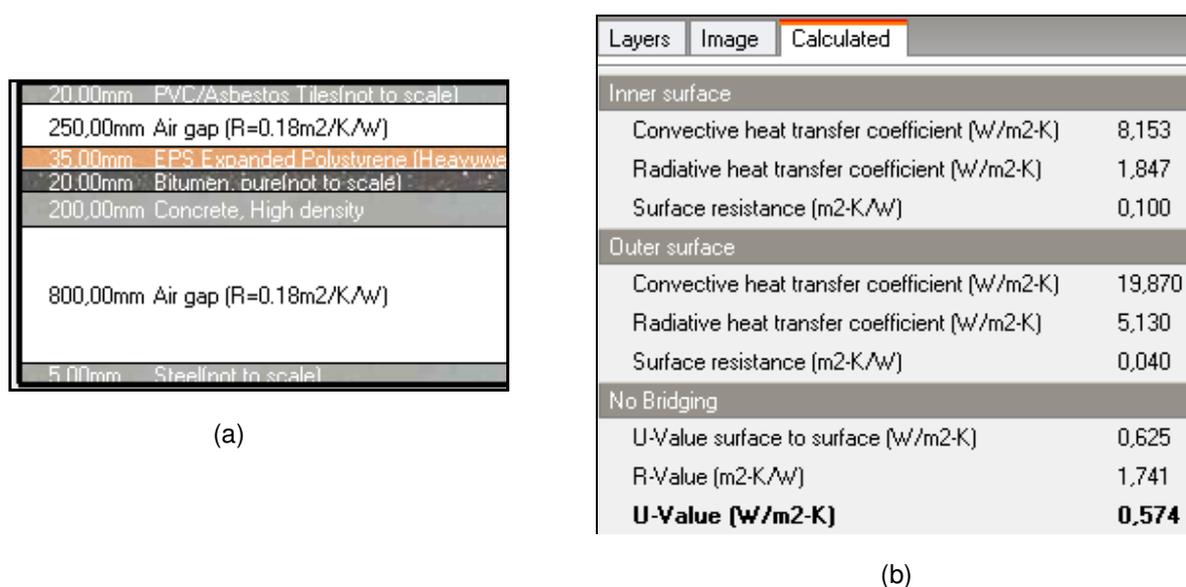


Figura 5.40- (a) Camadas dos materiais construtivos empregados na cobertura do Modelo Proposto VII, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder, (b) Propriedades físicas resultantes do novo componente construtivo (cobertura) especificado para o Modelo Proposto VII.

Modelo Proposto VIII

Este modelo foi desenvolvido a partir do Modelo Proposto VI, sendo inserida a seguinte modificação:

- Foi substituído o painel em EPS por Painel Wall, com 40mm, no peitoril a ser construído internamente com 85 cm de altura, internamente às esquadrias das fachadas leste e oeste.

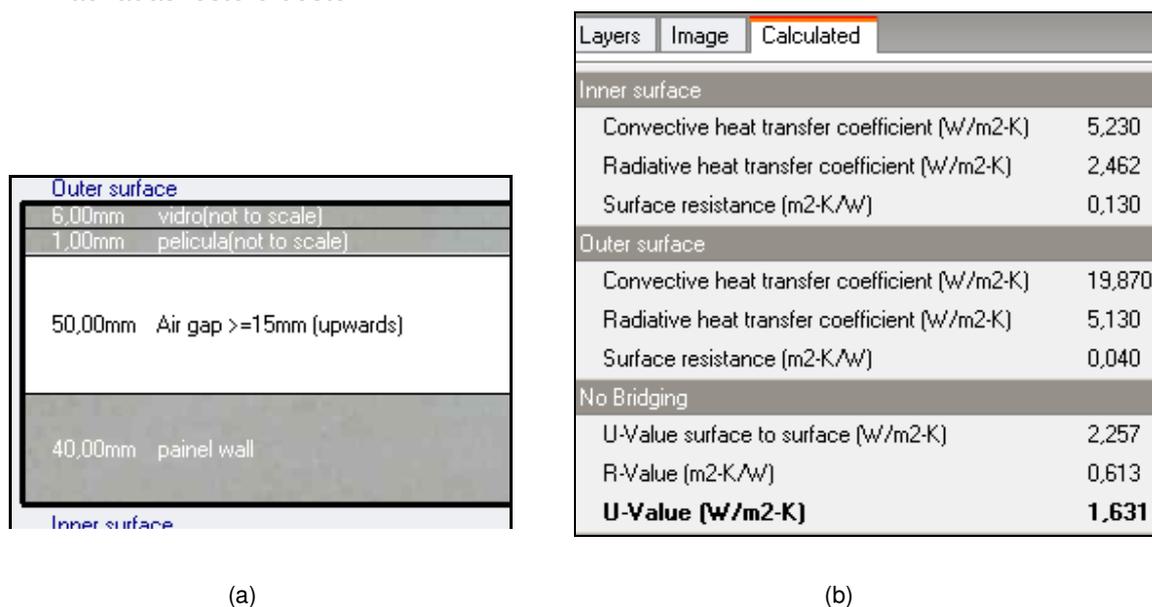


Figura 5.41 -(a) Camadas dos materiais construtivos empregados nas paredes das fachadas leste e oeste do Modelo Proposto VIII, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder, (b) Propriedades físicas resultantes do novo componente construtivo (vedações externas) especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto VIII.

Modelo Proposto IX

Este modelo foi desenvolvido a partir do Modelo Proposto VII, sendo inserida a seguinte modificação:

- Foi substituído o vidro das fachadas leste e oeste por vidro duplo Dbl Low-e (e 2=1) Clr 6mm, com camada de ar interna com 13 mm. Esta modificação visa testar a redução da transmitância térmica de vidros em edifícios condicionados.

Layers	Calculated
Calculated Values	
Total solar transmission (SHGC)	0,568
Direct solar transmission	0,474
Light transmission	0,745
U-Value (W/m2-K)	1,761

Figura 5.42- Propriedades físicas resultantes do vidro especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto IX.

Modelo Proposto X

Este modelo foi desenvolvido a partir do Modelo Proposto VII, sendo inserida a seguinte modificação:

- Foi acrescentada película de controle solar refletiva prata, com características similares à da fachada leste, nos vidros existentes das esquadrias da fachada oeste.

Layers	Calculated
Calculated Values	
Total solar transmission (SHGC)	0,221
Direct solar transmission	0,121
Light transmission	0,159
U-Value (W/m2-K)	5,622

(a)

General	
3M Corporation ScotchTint Sun Control Ext	
Thermal Properties	
Thickness (mm)	0,03810
Conductivity (W/m-K)	0,13850
Solar Properties	
Solar transmittance	0,11700
Outside solar reflectance	0,59800
Inside solar reflectance	0,61500
Visible Properties	
Visible transmittance	0,15900
Outside Visible reflectance	0,57900
Inside Visible reflectance	0,60000
 Colour	
Infra-Red Properties	
Infra red transmittance	0,00000
Outside Infra Red reflectance (emis...)	0,73000
Inside Infra Red reflectance (emissi...)	0,59000

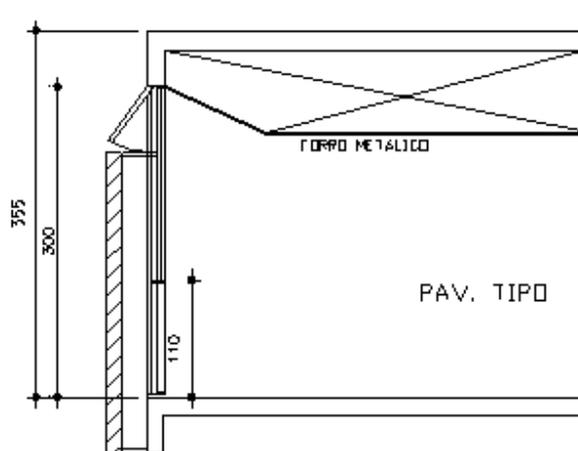
(b)

Figura 5.43- (a) Propriedades físicas resultantes do vidro com película especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto X, (b) Propriedades físicas resultantes do vidro/película de controle solar.

Modelo Proposto XI

Este modelo foi desenvolvido a partir do modelo proposto I, sendo inserida a seguinte modificação:

- Internamente às esquadrias da fachadas leste e oeste, foi modelado, intercalado por uma câmara de ar com 5 cm, uma parede com peitoril de 110cm de altura executada em painéis modulares de EPS, com 70mm, que poderão ser retirados para limpeza da esquadria externa, através de saque frontal. Esta parede para ser construída deverá ser estruturada em perfil de aço “U” com 2cm, chumbado na base metálica existente. Acima do peitoril, apoiada sobre perfil de aço “U” com 2cm (chumbado nos montantes laterais a serem instalados) deverá ser instalada esquadria de correr com vidro com características semelhantes ao vidro Reflect Float incolor, com 6mm, cujas propriedades térmicas e luminosas do conjunto foram calculadas pelo fabricante (item 2.4.2.1.2.). Os detalhes construtivos estão representados nas Figura 5.44 (a) e 5.45.



(a)

Copy of Copy1 of Sgl Clr 6mm	
Number layers	2
Outermost pane	
Pane type	3M Corporation
Flip layer	Yes
Window gas 1	
Window gas type	
Innermost pane	
Pane type	Generic REF D
Flip layer	No
Calculated Values	
Total solar transmission (SHGC)	0,134
Direct solar transmission	0,064
Light transmission	0,073
U-Value [W/m ² -K]	2,718

(b)

Figura 5.44 (a) Corte esquemático mostrando a fachada dupla, (b) Propriedades físicas do conjunto vidro/película de controle solar + câmara de ar + vidro Reflect Float, incolor, exibidos pelo programa DesignBuilder.

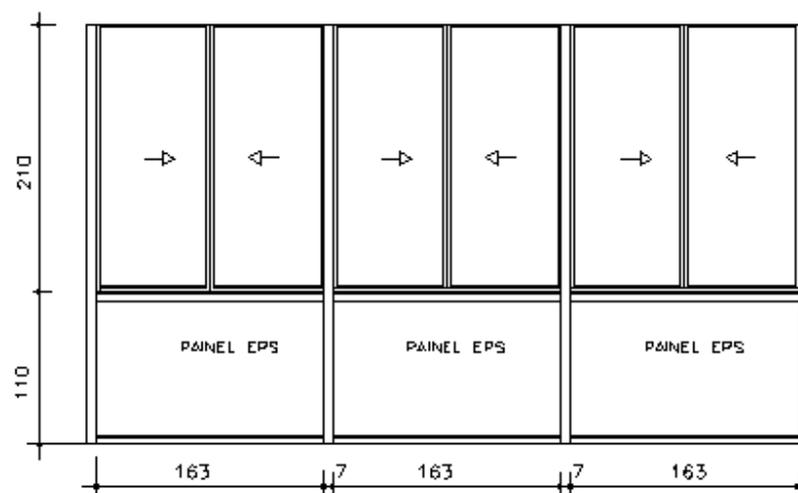


Figura 5.45 - Vista interna da parede modelada no Modelo Proposto XI, com modulação similar à esquadria existente.

Proposto XII

Este modelo foi desenvolvido a partir do modelo proposto XI, sendo inserida a seguinte modificação:

- A câmara de ar foi modelada com 12cm de espessura.

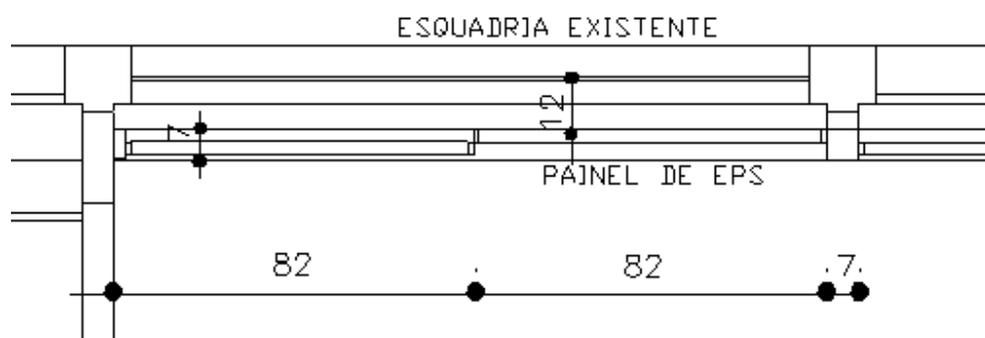


Figura 5.46- Planta baixa esquemática da paredes dupla a ser testada nas fachadas leste e oeste.

Modelo Proposto XIII

Este modelo foi desenvolvido a partir do modelo proposto XI, sendo inserida a seguinte modificação:

- Foi alterada a altura do peitoril para 85cm (EPS) e o vidro da esquadria interna, para atendimento à norma NBR 7199⁴⁸, por vidro laminado Cool Lite 120-PR-5.5.1.

⁴⁸ A norma NBR 7199, item 4.7.2, alínea q, determina que o envidraçamento quando executado em esquadrias de fechamentos externos, com peitoril menor que 110cm e sem proteção adequada, deverá ser executado com vidros laminados ou aramados.

laminado Coolite +ar+ vidro+película	
Number layers	2
Outermost pane	
Pane type	3M Corporation
Flip layer	Yes
Window gas 1	
Window gas type	Copy of Copy of
Innermost pane	
Pane type	3M Corporation
Flip layer	Yes
Calculated Values	
Total solar transmission (SHGC)	0,123
Direct solar transmission	0,022
Light transmission	0,031
U-Value (W/m ² K)	2,659

Figura 5.47- Propriedades físicas do conjunto vidro/película de controle solar + câmara de ar + vidro laminado Cool Lite prata, exibidos pelo programa DesignBuilder.

Modelo Proposto XIV

Este modelo foi desenvolvido a partir do modelo proposto XIII, sendo inserida a seguinte modificação:

- A espessura do painel EPS foi alterada para 90mm e a câmara de ar aumentou para 10cm.

Layers	Image	Calculated
Inner surface		
Convective heat transfer coefficient (W/m ² K)		2,152
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² K)		5,540
Surface resistance (m ² K/W)		0,130
Outer surface		
Convective heat transfer coefficient (W/m ² K)		19,870
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² K)		5,130
Surface resistance (m ² K/W)		0,040
No Bridging		
U-Value surface to surface (W/m ² K)		0,364
R-Value (m ² K/W)		2,914
U-Value (W/m²K)		0,343

(a)

Outer surface	
6,00mm	vidro(not to scale)
0,50mm	película(not to scale)
100,00mm Air gap 10mm	
90,00mm	EPS Expanded Polystyrene (Heavywe
15,00mm	Argamassa(not to scale)
Inner surface	

(b)

Figura 5.48- (a) Propriedades físicas resultantes do novo componente construtivo (parede) especificado para o Modelo Proposto XIV, (b) Camadas dos materiais construtivos empregados nas paredes das fachadas leste e oeste, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder

Modelo Proposto XV

Este modelo foi desenvolvido a partir do modelo proposto VII, sendo inserida a seguinte modificação:

- Foi substituído o painel em EPS por Painel Wall, com 40mm, no peitoril a ser construído internamente às esquadrias das fachadas leste e oeste

Outer surface	
6,00mm	vidro(not to scale)
1,00mm	película(not to scale)
50,00mm	Air gap >=15mm (upwards)
40,00mm	panel wall
Inner surface	

With Bridging (BS EN ISO 6946)	
Upper resistance limit (m ² -K/W)	0,613
Lower resistance limit (m ² -K/W)	0,613
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	2,257
R-Value (m ² -K/W)	0,613
U-Value (W/m²-K)	1,631

(a)

(b)

Figura 5.49- (a) Camadas dos materiais construtivos empregados nas paredes das fachadas leste e oeste, visualizadas pela tela do programa DesignBuilder, (b) Propriedades físicas resultantes do novo componente construtivo (vedações externas) especificado para as fachadas leste e oeste do Modelo Proposto XV.

5.4. Viabilidade financeira das propostas de *retrofit*

Segundo Andrade e Souza (2003), o primeiro passo para se verificar a viabilidade financeira de um empreendimento, neste caso das propostas de *retrofit* da envoltória do edifício, objeto de estudo, seria determinar, de forma estimada, o custo envolvido em sua produção.

Dessa maneira, para se proceder o orçamento de uma obra é necessário o levantamento de todos os elementos técnicos pertinentes ao projeto, tais como projetos executivos, projetos de produção e especificações técnicas de materiais. Com estas informações detalhadas é possível calcular os quantitativos de serviços, os coeficientes de produtividade e preço dos materiais construtivos empregados (custos diretos), e em seguida, o custo indireto, representado pelos equipamentos a serem utilizados na obra, mobilização e

desmobilização da obras, equipe técnica, impostos, lucro da empresa, etc. (BDI)⁴⁹, que normalmente gira em torno de 35 a 45% (MARQUES, 2008) do valor dos custos diretos, quando se tratam de obras de reabilitação exclusivamente administradas por empresas contratadas.

Neste trabalho, os custos unitários dos materiais construtivos e da mão-de-obra para instalação, os quais representam os parâmetros analisados neste estudo para as propostas de *retrofit* da envoltória, foram fornecidos por cotação direta com os fornecedores, o que resultou na maior precisão das informações. Os demais materiais e serviços foram obtidos através de consulta a Revista Construção e Mercado, da editora PINI.

Numa segunda etapa é realizada a análise da viabilidade financeira dos investimentos. Para tanto, foi utilizada a metodologia da ANNEL⁵⁰ para projetos de eficiência energética, adotada pelo RTQ-C. A avaliação econômica do projeto será feita por meio do cálculo da relação custo-benefício (RCB) de cada uso final, devendo obedecer a seguinte metodologia:

$$RCB = \frac{\text{Custos Anualizados}}{\text{Benefícios Anualizados}} = RCB = \frac{(CT \times FRC)}{(EE \times CE)}$$

Onde:

- RCB é a relação custo-benefício;
- CT ou CAtotal é o custo apropriado do projeto [R\$];
- FRC é o fator de recuperação de capital;
- EE é a energia elétrica conservada [MWh/ano];
- CE é o custo evitado de energia [R\$/MWh]

A1) Cálculo do Custo dos materiais empregados no projeto de reforma que tenham a mesma vida útil (CPE_n):

$$CPE_n = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

⁴⁹ BDI (Benefícios e Despesas Indiretas) é conceito de Engenharia de custos e significa a parcela de custo que, agregada ao custo direto de um empreendimento, obra ou serviço, devidamente orçado, permite apurar o seu custo total. Tem por finalidade suportar custos que, conquanto não-diretamente incorridos na composição do binômio "material *versus* elementos operativos sobre o material (tradicionalmente denominado apenas mão-de-obra), *todavia incorrem também na composição geral do* custo total. Como indiretas, o custeio da carga tributária nas várias esferas estatais, o das inversões financeiras havidas no mercado de capitais, e, também, necessariamente, atender o lucro (dito margem de contribuição). Fonte: Dicionário da Wikipédia, acessado em 24/08/2009

⁵⁰ Metodologia para o cálculo do RCB (Relação custo-benefício) do *Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética da ANEEL*. Acessado em 26/09/2009.

Onde

- CPE_n - Custo total dos dos materiais empregados no projeto de reforma com a mesma vida útil.

Neste item, para cada proposta de *retrofit* analisada, são calculados os valores dos custos dos materiais construtivos empregados com mesma vida útil. Para isso, os custos unitários de aquisição (custos diretos), mão-de-obra e os custos indiretos (administração, acompanhamento e avaliação) são multiplicados pela área (m²) em que serão aplicados, sendo posteriormente somados (CPE_n). Foi estimado uma vida útil de 10 anos para películas de proteção solar para vidros (garantia do fabricante) e de 30 anos, para os demais componentes construtivos (conforme Tabela 9.1)

A seguir, para cada alternativa de *retrofit*, foi calculado o FRC dos materiais construtivos com a mesma vida útil, sendo considerada a taxa de desconto de 8% a.a.

A2) Cálculo do fator de recuperação de capital (FRC):

$$FRC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Onde:

- CT - Custo total do projeto (custos diretos + custos indiretos)
- n - vida útil (em anos)⁵¹
- i - taxa de juros (taxa de desconto)

A3) Cálculo do Custo Anualizado Total do projeto de reforma(CA_{total}):

$$CA_{total} = CPE1 \cdot FRC1 + CPE2 \cdot FRC2 + \dots CPE_n \cdot FRC_n$$

Neste item, o custo total de materiais construtivos com a mesma vida útil (CPE) é multiplicado pelo FCR correspondente, sendo posteriormente somados para a composição do custo total (CA_{total}).

B) Cálculo dos Benefícios (B)

$$B = (EE \times CEE)$$

⁵¹ A vida útil foi definida com base nos dados fornecidos pelo fabricante do material construtivo e pela Tabela C7 da Norma 15.575-1:2008.

Onde:

- EE - Energia Economizada (MWh/ano)
- CEE - Custo Evitado de Energia (R\$/MWh)

Neste item, para cada alternativa avaliada, o valor da energia economizada anualmente (MWh/ano) é multiplicado pelo custo da energia elétrica, sendo este valor variável de acordo com a classificação da edificação (residencial, comercial, pública, etc.) e da Estrutura Tarifária Horo-Sazonal, que é classificada em azul e verde, sendo diferenciadas de acordo com o horário do dia - “horário de ponta” e “fora de ponta”- e períodos do ano - “seco e úmido”. De acordo com a metodologia utilizada pelo RTQ-C, não são computados os valores correspondentes ao fator relativo à demanda de potência (kW).

Capítulo 6 - Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes à aplicação da metodologia prescritiva e da simulação do RTQ-C visando a avaliação da eficiência da envoltória do edifício real e dos modelos de referência para posterior classificação e etiquetagem dos modelos propostos, sendo analisados, conjuntamente, o conforto térmico e o desempenho térmico de componentes construtivos existentes e dos avaliados.

6.1. Classificação e etiquetagem do edifício

De acordo com o RTQ-C, a partir dos resultados das simulações, deve-se obter que o modelo real ou o modelo proposto submetido a classificação parcial ou geral de eficiência energética deve apresentar consumo menor ou igual ao modelo de referência para o nível de eficiência pretendida.

Comparando-se o desempenho do modelo real calibrado com o modelo de referência D, percebe-se que o primeiro tem o valor de consumo anual superior ao segundo, portanto a metodologia da simulação conferiu etiqueta E à envoltória do edifício. Isto contraria a metodologia prescritiva do RTQ-C, que conferiu etiqueta D à envoltória do edifício real. Entretanto, como a diferença entre os dois valores (Modelo Calibrado e Modelo de Referência D – ver Tabela 6.1) corresponde a 0,47% (menor que a margem de erro anual de 5% prevista pela metodologia de calibração do modelo), neste trabalho adotou-se a classificação do nível de eficiência energética da envoltória do edifício dos Ministérios pela metodologia prescritiva, portanto etiqueta D.

Tabela 6.1- Comparação dos resultados de consumo de energia elétrica (kWh) entre o modelo real e o modelo calibrado.

Data (meses do ano)	Edifício Real (kWh)	Modelo Calibrado (kWh)	Modelo de Referência (Etiqueta D) (kWh)
1	173.703	193.441	193.038
2	195.834	175.324	174.701
3	206.976	184.178	183.949
4	181.532	182.299	181.615
5	192.674	182.181	180.505
6	177.922	140.047	139.067
7	173.874	165.254	163.968
8	168.146	166.081	164.586
9	199.103	181.309	179.591
10	214.873	205.658	205.391
11	227.972	173.752	172.434
12	204.887	178.214	178.952
Total (kWh)	2.317.496	2.127.737	2.117.797

6.2. Classificação e etiquetagem das propostas de retrofit

Através das simulações no programa DesignBuilder pôde-se avaliar o consumo de energia elétrica mensal dos modelos propostos (propostas de *retrofit*) e conseqüentemente seu desempenho energético. Pela metodologia da simulação do RTQ-C, a partir dos resultados das simulações deve-se proceder a comparação dos resultados de consumo de energia anual entre os modelos propostos e os modelos de referência para a classificação do nível de eficiência. Para isto, os modelos propostos deverão demonstrar que seus resultados são menores ou iguais ao modelo de referência para o nível de eficiência pretendido.

Pôde-se comprovar pelos resultados apresentados neste trabalho, que as modificações na envoltória do modelo proposto devem ser inseridas parametricamente, devendo sempre ser acrescentadas aos modelos simulados posteriormente as soluções que impactam positivamente nos resultados de consumo.

O programa DesignBuilder oferece uma vasta possibilidade de análises térmicas e energéticas, representada por gráficos ou planilhas. Neste trabalho foram analisados os seguintes resultados:

- Valores mensais do consumo de energia por uso final;

- Valores mensais do consumo de energia total, que serão utilizados para classificação e etiquetagem das propostas de retrofit;
- Desempenho térmico: relatórios de saída sobre as trocas térmicas por paredes externas, paredes internas, pisos, infiltração, ventilação, dentre outros e os ganhos térmicos internos provenientes da ocupação e da incidência de radiação por aberturas;
- Conforto: análises de conforto térmico pelo método de Fanger;
- Predição da temperatura operativa.

Os resultados das simulações dos modelos propostos estão disponíveis no Anexo III.

Modelos Propostos - Etiqueta D

Realizada a análise dos resultados, os seguintes modelos propostos foram classificados para obter a etiqueta D do RTQ-C (ENCE): Modelos propostos III, IV e V, visto seus consumos anuais de energia elétrica terem sido menores que o do modelo de referência D e maiores que o do modelo de referência C, conforme demonstram as Tabelas 5.22 (item 5.3.3.1.) e 6.2 e a Figura 6.1. O modelo proposto IX obteve valores de consumo de energia maiores que o modelo de referência D, portanto recebeu a etiqueta E.

Tabela 6.2- Resultados de consumo de energia elétrica mensal e anual dos modelos propostos que obtiveram a etiqueta D.

Data (meses do ano)	Modelo de Referência D	Modelo Proposto III	Modelo Proposto IV	Modelo Proposto V
1	193.038	187.991	188.428	188.617
2	174.701	168.861	169.675	170.016
3	183.949	177.641	178.304	178.577
4	181.615	177.171	177.379	177.532
5	180.505	177.723	178.001	178.155
6	139.067	138.010	137.780	137.764
7	163.968	162.211	162.077	162.093
8	164.586	161.861	162.006	162.123
9	179.591	174.029	174.527	174.770
10	205.391	197.094	198.121	198.553
11	172.434	169.842	170.142	170.281
12	178.952	174.549	174.765	174.880
Total (kWh)	2.117.797	2.066.982	2.071.204	2.073.361

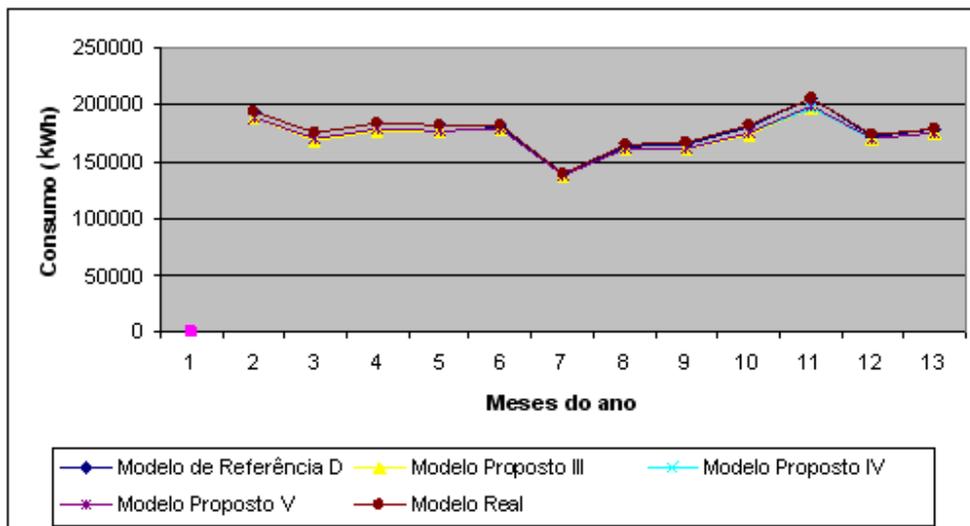


Figura 6.1- Consumos de energia elétrica anual (Modelos propostos etiqueta D x Modelo real).

Analisando o gráfico de conforto pelo método de Fanger (PMV), Figura 6.2, o índice Predicted Mean Vote - PMV indica que os modelos propostos III, IV e V apresentam um percentual de desconforto acima do recomendado pela norma ISO 7730, ou seja maior que 0,5, somente nos meses de abril e setembro, mas ainda dentro do limite aceitável (20% de insatisfeitos), de acordo com a NBR 16401-2. A Figura 6.3 mostra a evolução da temperatura operativa durante o ano, demonstrando que em todos os casos as temperaturas se mantiveram dentro dos limites de temperatura de conforto sugeridos para ambientes condicionados pela NBR 16401-2, que seria de 21 - 24°C, no inverno e 22,5 - 26°C, no verão, com umidade relativa variando entre 42 e 60%. Entretanto, como a temperatura ultrapassa os 24°C (temperatura de setpoint) o ano inteiro, o ar condicionado precisa funcionar ininterruptamente.

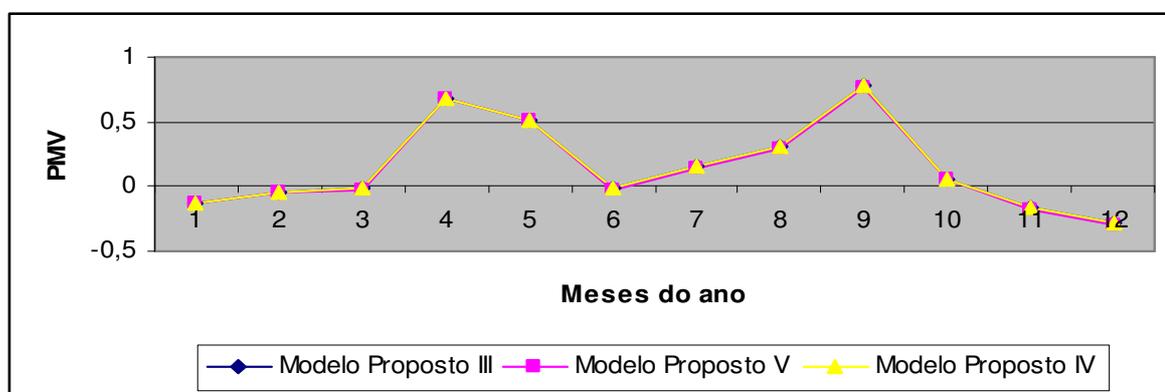


Figura 6.2- Gráfico do PMV (voto médio predito) das propostas etiqueta D.

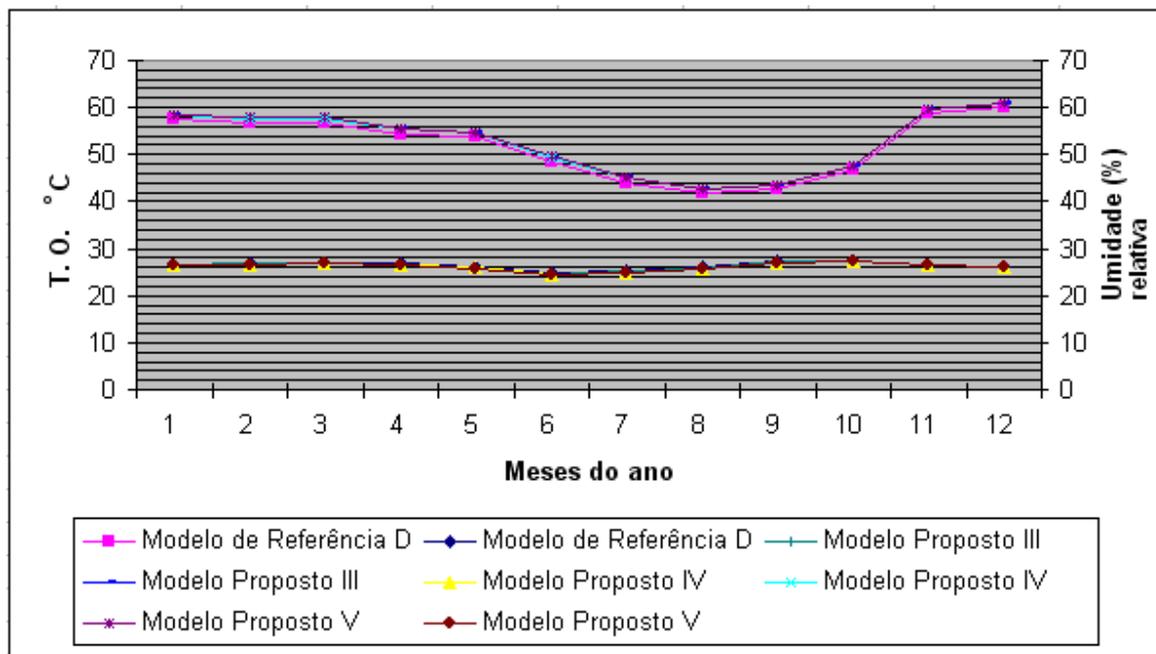


Figura 6.3- Variação anual da temperatura operativa e umidade relativa das propostas etiqueta D.

No modelo III testou-se a eficácia do uso de painéis isolantes de EPS reduzindo o percentual de aberturas nas fachadas, entretanto as características dos vidros existentes foram mantidas. Os painéis foram utilizados internamente às esquadrias das fachadas leste e oeste, reduzindo o PAF em 28,5%. Esta alteração reduz o consumo anual de energia elétrica em 60.775 kWh (2,85%), em relação ao modelo real. Apesar da redução da carga térmica por radiação solar através das janelas ter sido de 32%, as duas modificações provocaram diminuição da perda térmica pelas janelas e pelas paredes em relação ao modelo real.

No modelo IV testou-se a eficácia do uso de painéis Wall reduzindo o percentual de aberturas nas fachadas. Os painéis foram utilizados internamente às esquadrias das fachadas leste e oeste, reduzindo o PAF em 28,5%. Esta alteração reduziu o consumo anual de energia elétrica em 56.533 kWh (2,66%), em relação ao modelo real, não apresentando diferença significativa em relação ao modelo proposto III. Como no modelo anterior, apesar da redução da carga térmica por radiação solar através das janelas ter sido de 32%, as duas modificações provocaram diminuição da perda térmica pelas janelas e pelas paredes em relação ao modelo real.

No modelo V testou-se a eficácia da câmara de ar retirando-a do modelo. Os painéis Wall foram utilizados colados internamente às esquadrias das fachadas leste e oeste, reduzindo o PAF em 28,5%. Esta alteração reduz o consumo anual de energia elétrica em 54.376 kWh (2,55%), em relação ao modelo real, não apresentando diferença significativa em relação ao

modelo proposto IV. Apesar da redução da carga térmica por radiação solar através das janelas por insolação também ter sido de 32%, esta modificação provocou um discreto aumento da perda térmica pelas paredes em relação ao modelo proposto IV.

Comparando-se os resultados das simulações, verificou-se que os modelos propostos I e III obtiveram os melhores resultados de consumo de energia elétrica, portanto nas próximas simulações as duas alternativas serão utilizadas conjuntamente.

A Figura 6.4 demonstra a redução da carga térmica a ser retirada pelo sistema de condicionamento de ar pela diminuição da carga térmica que incide por radiação solar de ondas curtas através das janelas, para os modelos propostos com etiqueta D.

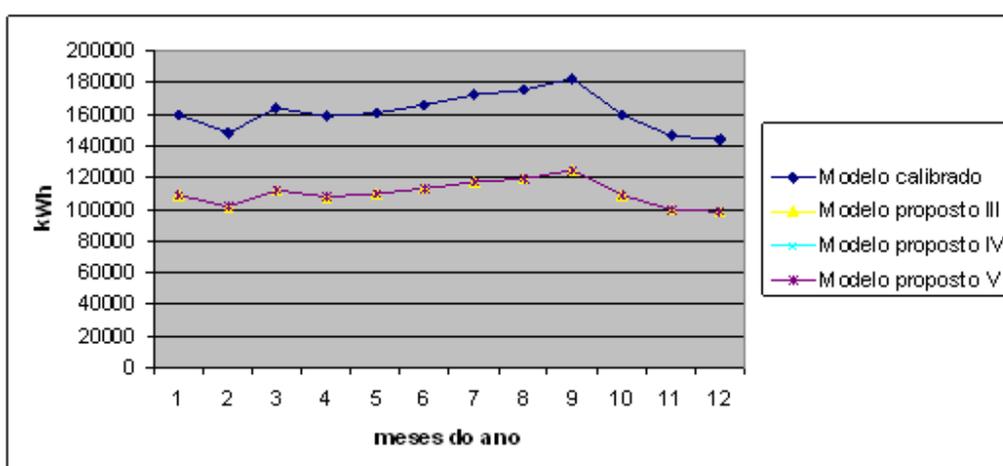


Figura 6.4 - Redução dos ganhos de calor por insolação dos modelos propostos com etiqueta D em relação ao modelo real calibrado.

Modelos Propostos - Etiqueta C

Realizada a análise dos resultados, os seguintes modelos propostos foram classificados para obter a etiqueta C do RTQ- (ENCE): Modelos propostos I, II, VI, VII e VIII, visto seus consumos anuais de energia elétrica terem sido menores que o do modelo de referência C e maiores que o do modelo de referência B, conforme demonstram as Tabelas 5.22 (item 5.3.3.1.) e 6.3 e a Figura 6.5.

Tabela 6.3 - Resultados de consumo de energia elétrica mensal e anual dos modelos propostos que obtiveram a etiqueta C.

Data (meses do ano)	Modelo de Referência C	Modelo Proposto I	Modelo Proposto II	Modelo Proposto VI	Modelo Proposto VII	Modelo Proposto VIII
1	183.848	181.733	180.138	181.218	180.869	180.963
2	165.353	164.196	162.785	162.047	161.762	162.085
3	174.133	172.041	170.663	170.067	169.871	169.996
4	173.434	171.435	170.257	170.052	169.973	169.678
5	173.636	173.177	172.222	171.139	171.166	170.740
6	134.134	133.495	133.102	133.683	134.116	132.931
7	157.841	157.249	156.640	156.454	157.310	155.656
8	157.465	157.124	156.117	155.456	155.488	154.898
9	170.648	168.854	166.939	164.710	164.444	164.736
10	195.849	194.124	191.637	189.113	187.636	189.623
11	165.003	163.854	162.677	163.911	163.626	163.529
12	170.763	168.337	167.414	169.428	168.882	168.909
Total (kWh)	2.022.105	2.005.617	1.990.591	1.987.277	1.985.143	1.983.744

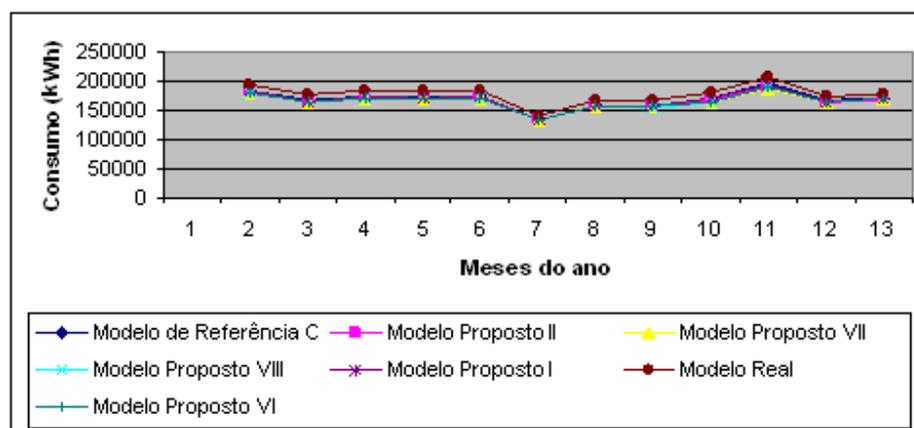


Figura 6.5- Comparação dos consumos de energia elétrica anual (Modelos propostos etiqueta C x Modelo real).

Analisando o gráfico de conforto pelo método de Fanger, Figura 6.6, o índice PMV indica que todos os modelos propostos apresentam um percentual de desconforto dentro do limite recomendado pela norma ISO 7730 (-0,5 à +0,5). Os modelos propostos I e II apresentam um percentual de desconforto acima do recomendado pela norma ISO 7730, ou seja menor que -0,5, somente em dezembro, mas ainda dentro do limite aceitável (20% de insatisfeitos), de acordo com a NBR 16401-2. A Figura 6.7 mostra a evolução da temperatura operativa durante o ano, demonstrando que em todos os casos as temperaturas se mantiveram dentro dos limites de temperatura de conforto sugeridos para ambientes condicionados pela NBR 16401-2, que

seria de 21 - 24 °C, no inverno e 22,5 - 26 °C, no verão, com umidade relativa variando entre 42 e 60% (somente nos meses de novembro e dezembro a umidade relativa variou em 62%). Nos meses do inverno (junho, julho e parte de agosto) a temperatura variou entre 23,5 e 24,3 °C. Nos outros meses a temperatura ultrapassa os 24 °C (temperatura de *setpoint*), sendo, portanto, acionado o ar condicionado.

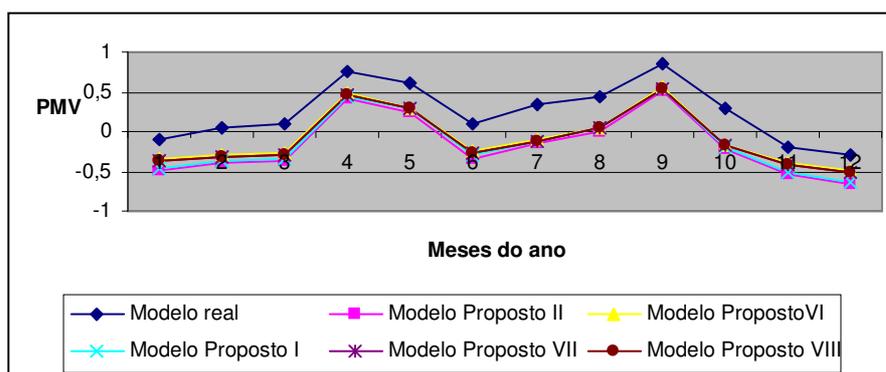


Figura 6.6- Gráfico do PMV (voto médio predito) das propostas etiqueta C.

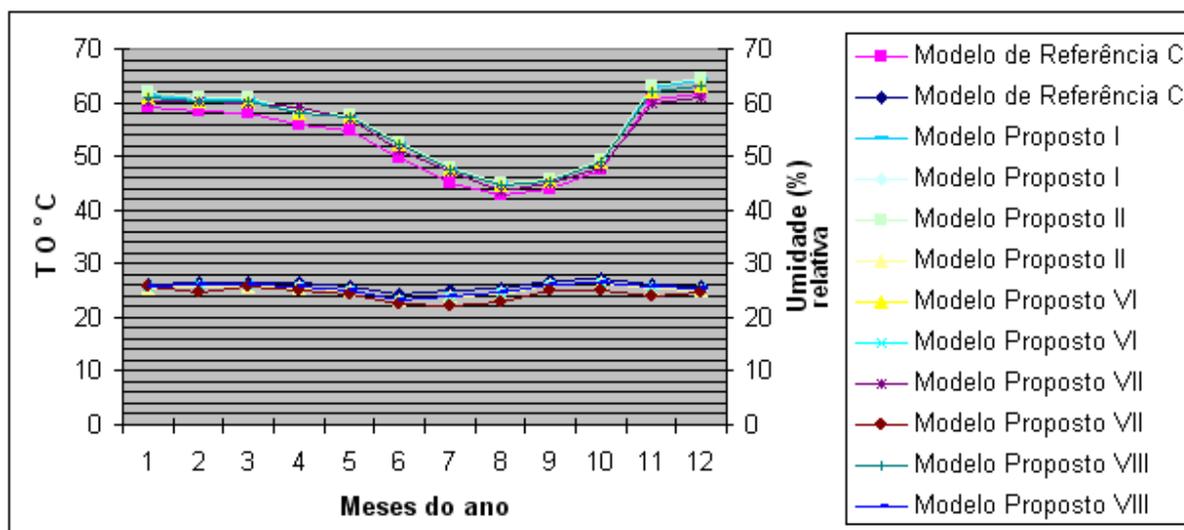


Figura 6.7- Variação anual da temperatura operativa e umidade relativa das propostas etiqueta C.

No modelo proposto I, a instalação de película de controle solar refletiva prata nos vidros das esquadrias da fachada oeste, reduz o consumo anual de energia elétrica em 122.120kWh (5,74%), em relação ao modelo real (etiqueta E). Apesar da redução da carga térmica por radiação solar através das janelas (*Solar Gains Exterior Windows*) ter sido de 77%, houve um contrabalanceamento da carga térmica causada pela diminuição da perda térmica. O modelo proposto II é similar ao modelo proposto I, sendo incluído o isolamento da cobertura.

Esta proposta reduz o consumo anual de energia elétrica em 137.146 kWh (6,45%), em relação ao modelo real (etiqueta E) provocando um achatamento da carga térmica a ser retirada pelo sistema de condicionamento de ar devido a redução total dos ganhos de calor provenientes da cobertura.

No modelo proposto VI foram substituídos os vidros das fachadas leste e oeste, por vidros laminados Cool Lite 120 PR 4.4.1, e instalado internamente, intercalado por uma câmara de ar com 5 cm, uma meia parede em EPS com 70mm (com 85cm) reduzindo o PAF. Esta proposta reduz o consumo anual de energia elétrica em 140.460 kWh (6,60%), em relação ao modelo real (etiqueta E).

O modelo proposto VII é similar ao modelo proposto VI, sendo incluído o isolamento da cobertura. Esta proposta reduz o consumo anual de energia elétrica em 142.594 kWh (6,70%), em relação ao modelo real (etiqueta E), melhorando o desempenho energético .

O modelo proposto VIII é similar ao modelo proposto VI, sendo testada a substituição do painel em EPS por painel Wall com 40 mm. Esta proposta reduz o consumo anual de energia elétrica em 143.993 kWh (6,77%), em relação ao modelo real (etiqueta E). Contrariando o resultado do modelo proposto IV, nesta simulação o uso do painel Wall melhorou a performance energética da proposta de retrofit.

A Figura 6.8 demonstra a redução da carga térmica a ser retirada pelo sistema de condicionamento de ar pela diminuição da carga térmica que incide por radiação solar de ondas curtas através das janelas, para os modelos propostos com etiqueta C.

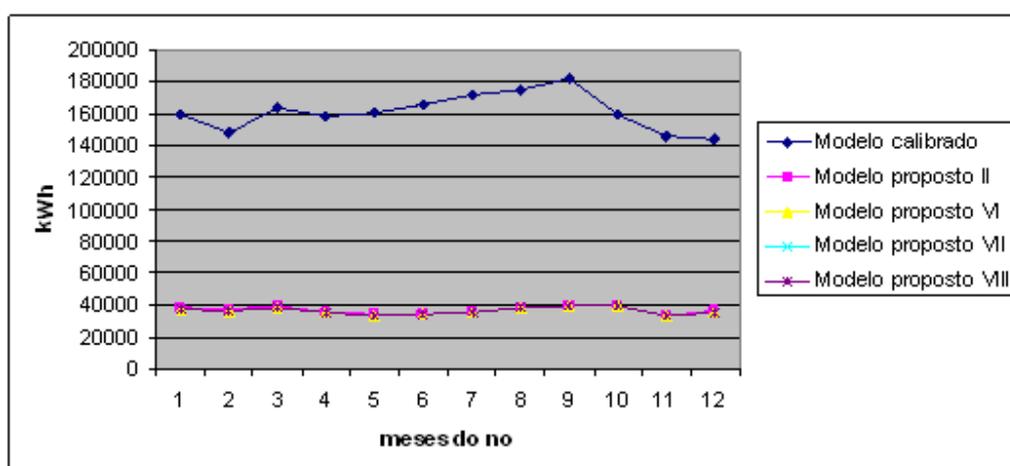


Figura 6.8- Redução dos ganhos de calor por insolação dos modelos propostos com etiqueta C em relação ao modelo real calibrado.

Modelos Propostos - Etiqueta B

Realizada a análise dos resultados, os seguintes modelos propostos foram classificados para obter a etiqueta B do RTQ-C (ENCE): Modelos propostos X, XI, XII, XIII e XV, visto seus consumos anuais de energia elétrica terem sido menores que o do modelo de referência B e maiores que o do modelo de referência A, conforme demonstram as Tabelas 5.22 (item 5.3.3.1.) e 6.4 e a Figura 6.9.

Tabela 6.4 - Resultados de consumo de energia elétrica mensal e anual dos modelos propostos que obtiveram a etiqueta B.

Data (meses do ano)	Modelo de Referência B	Modelo Proposto X	Modelo Proposto XI	Modelo Proposto XII	Modelo Proposto XIII	Modelo Proposto XV
1	174.051	170.553	169.472	169.466	169.493	171.503
2	155.415	150.769	148.852	148.846	148.857	152.067
3	163.926	159.148	157.364	157.359	157.352	160.357
4	165.123	160.731	159.595	159.589	159.599	161.534
5	166.749	162.836	161.762	161.759	161.814	163.711
6	129.564	128.180	128.037	128.034	128.062	128.506
7	152.165	150.265	149.722	149.719	149.773	150.777
8	150.668	147.605	146.628	146.627	146.670	148.357
9	161.233	154.038	151.917	151.914	151.891	155.264
10	185.529	176.156	173.257	173.255	173.170	177.760
11	157.346	154.993	154.233	154.227	154.257	155.717
12	162.294	159.951	159.574	159.568	159.568	160.606
Total (kWh)	1.924.061	1.875.225	1.860.413	1.860.364	1.860.507	1.886.160

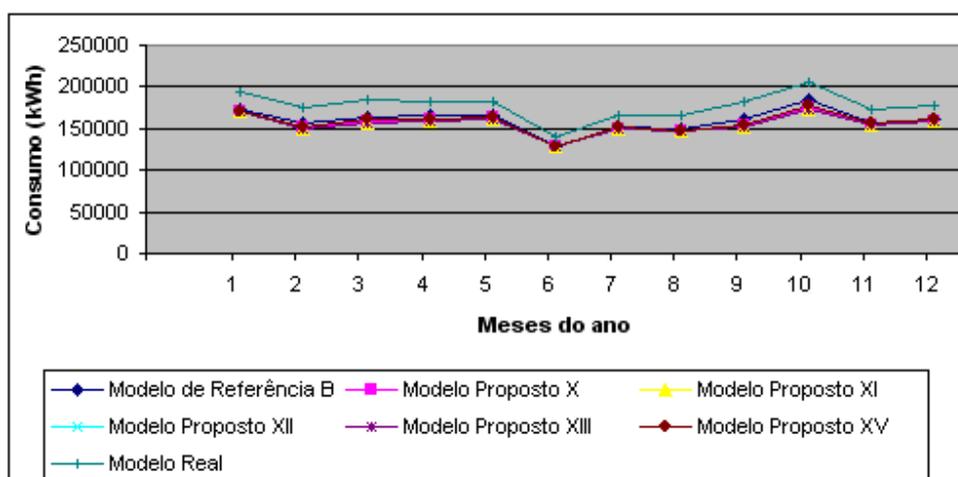


Figura 6.9- Comparação dos consumos de energia elétrica anual (Modelos propostos etiqueta B x Modelo real).

Analisando o gráfico de conforto pelo método de Fanger, Figura 6.10, o índice PMV indica que todos os modelos propostos apresentam um percentual de desconforto abaixo do limite recomendado (-0,5) pela norma ISO 7730, nos meses de novembro, dezembro e janeiro, mas ainda dentro do limite aceitável (20% de insatisfeitos), de acordo com a NBR 16401-2. A Figura 6.11 mostra a evolução da temperatura operativa durante o ano, demonstrando que em todos os casos as temperaturas se mantiveram dentro dos limites de temperatura de conforto sugeridos para ambientes condicionados pela NBR 16401-2, que seria de 21 - 24°C, no inverno e 22,5 - 26°C, no verão, com umidade relativa variando entre 44 e 60% (somente nos meses de janeiro, novembro e dezembro a umidade relativa variou entre 62,5 e 65%). Nos meses (parte de abril, maio, junho, julho e agosto) a temperatura variou entre 23,5 e 24,3°C. Nos outros meses a temperatura ultrapassa os 24°C (temperatura de *setpoint*), sendo, portanto, acionado o ar condicionado.

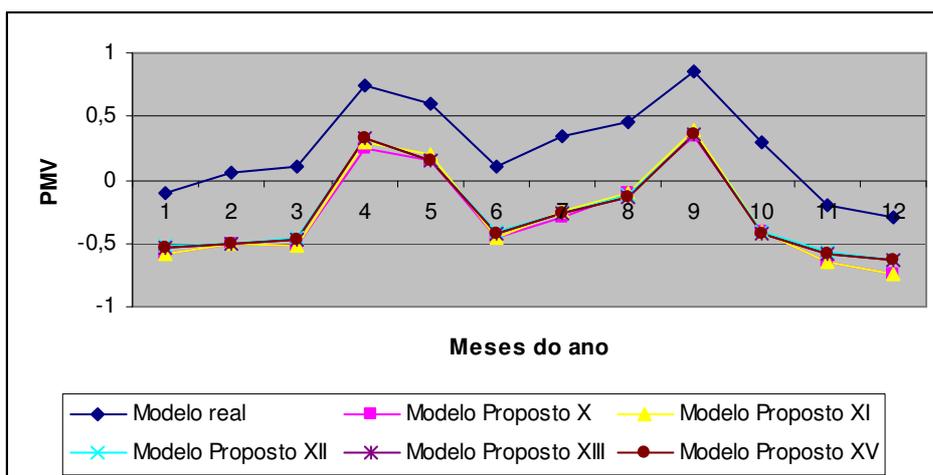


Figura 6.10- Gráfico do PMV (voto médio predito) das propostas etiqueta B.

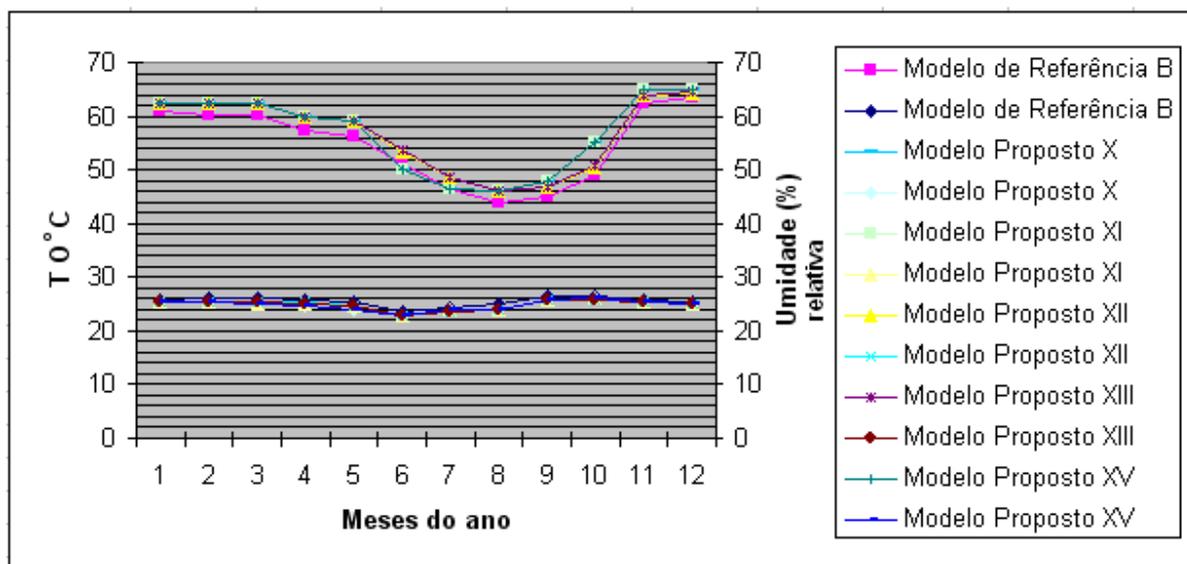


Figura 6.11- Variação anual da temperatura operativa e umidade relativa das propostas etiqueta B.

O modelo proposto X é similar ao modelo proposto VII, sendo alterado a especificação do vidro: foi acrescentada película de controle solar refletiva prata nos vidros das esquadrias da fachada oeste. Nesta proposta é testado a inclusão de parede interna à esquadrias externas em EPS (85cm) + cobertura com isolamento + vidro com película (esquadrias externas). Esta proposta reduz o consumo anual de energia elétrica em 252.512 kWh (11,87%), em relação ao modelo real (etiqueta E).

O modelo XI foi desenvolvido a partir do modelo proposto I, sendo que internamente a parede a ser executada é piso teto, meio painel EPS (1,10cm) meio vidro, intercalada por uma câmara de ar com 5cm. Esta proposta reduz o consumo anual de energia elétrica em 267.324 kWh (12,56%), em relação ao modelo real (etiqueta E).

O modelo XII é similar ao modelo proposto XI, sendo alterado a câmara de ar para 10cm. Esta proposta reduz o consumo anual de energia elétrica em 267.383 kWh (12,56%), em relação ao modelo real (etiqueta E).

O modelo XIII é similar ao modelo proposto XI, sendo alterado a altura do peitoril da parede para 85cm e o vidro da esquadria interna por vidro laminado com 6mm (vidro incolor + PVB + vidro Cool Lite prata). A alteração provoca aumento no consumo de energia elétrica em relação a proposta anterior. Esta proposta reduz o consumo anual de energia elétrica em 267.230 kWh (12,55%), em relação ao modelo real (etiqueta E).

No modelo proposto XV é alterado o material construtivo da parede com 85 cm (EPS) por painel Wall. O aumento do consumo de energia elétrica indica a melhor performance

do painel em EPS para a execução da parede dupla. Esta proposta reduz o consumo anual de energia elétrica em 241.577 kWh (11,35%), em relação ao modelo real (etiqueta E).

A Figura 6.12 demonstra a redução da carga térmica a ser retirada pelo sistema de condicionamento de ar pela diminuição da carga térmica que incide por radiação solar de ondas curtas através das janelas, para os modelos propostos com etiqueta B.

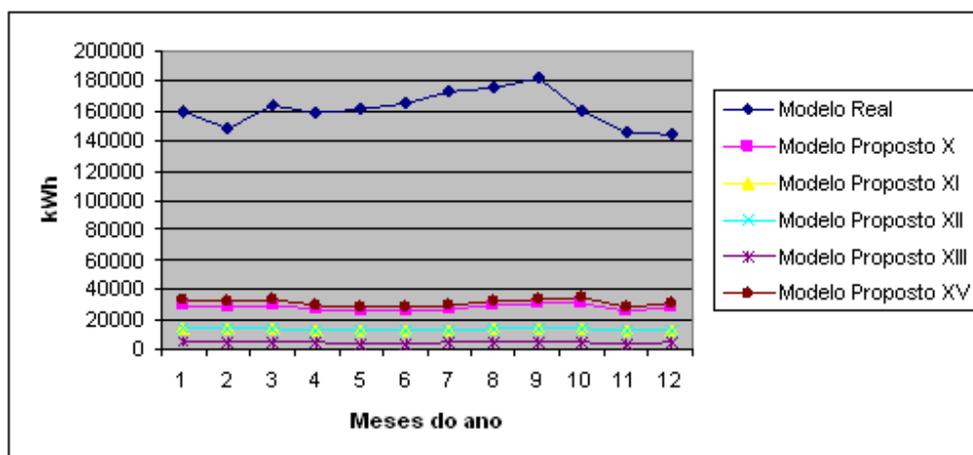


Figura 6.12- Redução dos ganhos de calor por insolação dos modelos propostos com etiqueta B em relação ao modelo real calibrado.

Modelo Proposto - Etiqueta A

Realizada a análise dos resultados, o modelo proposto XIV foi classificado com a etiqueta A do RTQ-C (ENCE) visto seu consumo anual de energia elétrica ter sido menor que o do modelo de referência A, conforme demonstra a Tabela 6.5 e a Figura 6.13.

Tabela 6.5 - Resultados de consumo de energia elétrica mensal e anual do modelo proposto com etiqueta A.

Data (meses do ano)	Modelo de Referência A	Modelo Proposto XIV
1	167.646	169.500
2	148.963	148.825
3	157.394	157.343
4	159.785	159.581
5	162.278	161.778
6	126.653	128.055
7	148.595	149.755
8	146.395	146.645
9	154.945	151.819
10	178.489	173.083
11	152.404	154.269
12	156.808	159.591
Total (kWh)	1.860.354	1.860.242

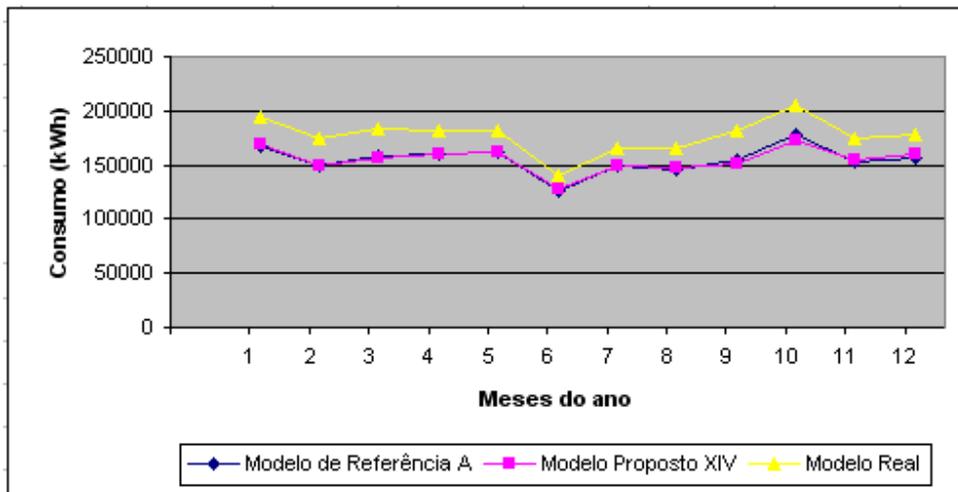


Figura 6.13- Comparação dos consumos de energia elétrica anual (Modelo proposto etiqueta A x Modelo real).

Analisando o gráfico de conforto pelo método de Fanger, Figura 6.14, o índice PMV indica que o modelo proposto XIV apresenta um percentual de desconforto abaixo do limite aceitável (-0,5) pela norma ISO 7730, nos meses de novembro, dezembro e janeiro, mas ainda dentro do limite aceitável (20% de insatisfeitos), de acordo com a NBR 16401-2. A Figura 6.15 mostra a evolução da temperatura operativa durante o ano, demonstrando que em todos os casos as temperaturas se mantiveram dentro dos limites de temperatura de conforto sugeridos para ambientes condicionados pela NBR 16401-2, que seria de 21 - 24°C, no inverno e 22,5 - 26°C, no verão, com umidade relativa variando entre 44 e 60% (somente nos meses de janeiro, novembro e dezembro a umidade relativa variou entre 62,5 e 65%). Nos meses abril, maio, junho, julho e agosto a temperatura variou entre 23,5 e 24,3°C. Nos outros meses a temperatura ultrapassa os 24°C (temperatura de setpoint), sendo, portanto, acionado o ar condicionado.

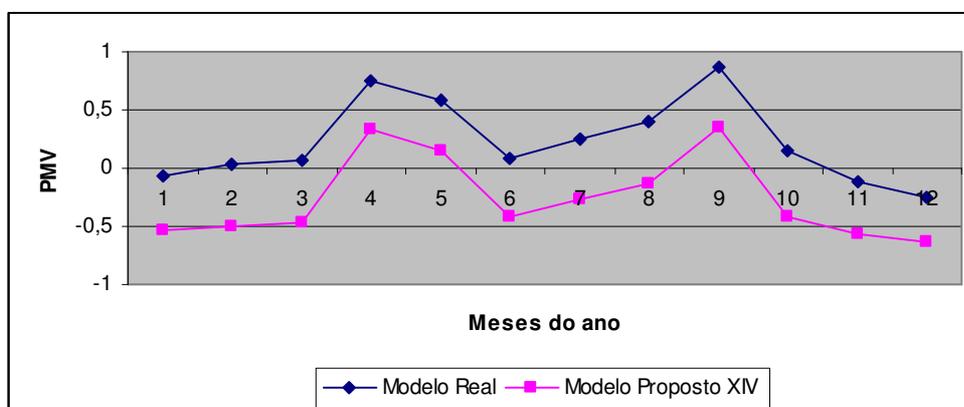


Figura 6.14- Gráfico do PMV (voto médio predito) da proposta etiqueta A.

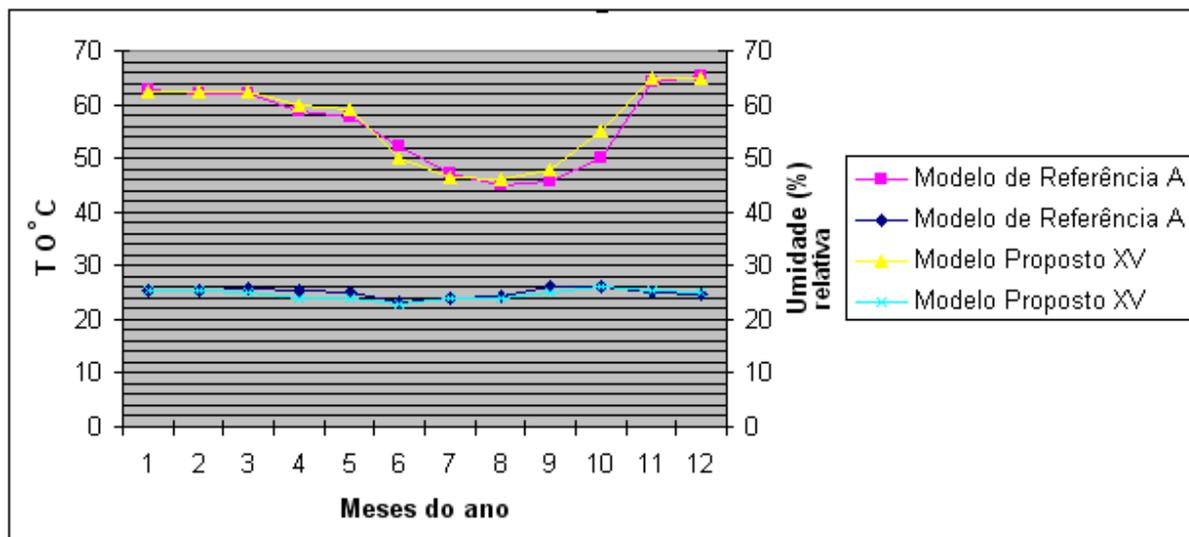


Figura 6.15- Variação anual da temperatura operativa e umidade relativa da proposta etiqueta A.

O modelo XIV é similar ao modelo proposto XIII, sendo alterado a espessura do peitoril da parede (EPS) para 90mm e a câmara de ar para 10cm. Esta proposta reduz o consumo anual de energia elétrica em 267.495 kWh (12,57%), em relação ao modelo real (etiqueta E), comprovando a eficácia da solução construtiva proposta.

A Figura 6.16 demonstra a redução da carga térmica a ser retirada pelo sistema de condicionamento de ar pela diminuição da carga térmica que incide por radiação solar de ondas curtas através das janelas, para o modelo proposto com etiqueta A.

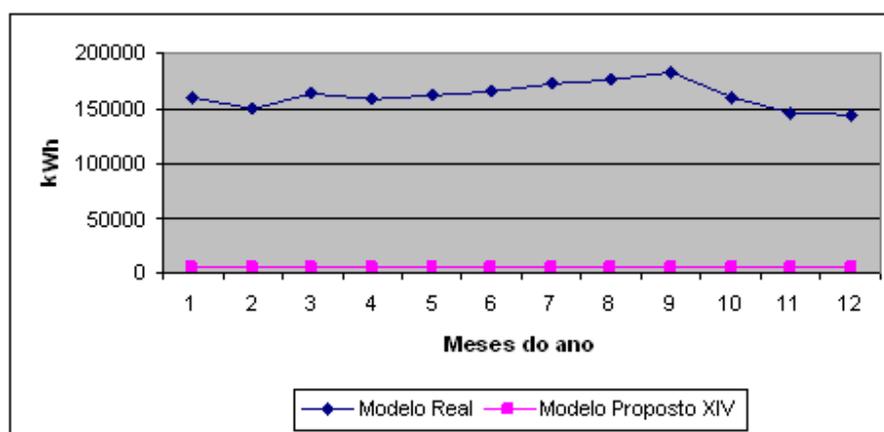


Figura 6.16- Redução do ganho de calor por insolação do modelo proposto com etiqueta A em relação ao modelo real calibrado.

6.3. Análise econômica das alternativas de *retrofit*

Após a classificação e etiquetagem das propostas de *retrofit*, foi realizado o levantamento dos custos diretos e indiretos das alterações propostas para cada modelo proposto. Foram orçadas as propostas de *retrofit* que reberam as etiquetas A, B e C visto se tratarem de alternativas que apresentaram significativa redução do consumo de energia elétrica. Além disso, pela metodologia prescritiva o edifício analisado foi classificado com o nível de eficiência D, sendo cabível neste estudo somente a avaliação de alternativas que apresentem melhores níveis de eficiência.

A Tabela 6.6 apresenta o valor do orçamento das propostas de *retrofit*, sendo o custo total estimado pela soma dos custos diretos mais o BDI de 35%, pelo fato de se tratarem de reformas que têm como princípios a racionalização e a industrialização do processo construtivo (MARQUES, 2008).

Tabela 6.6- Tabela demonstrativa dos investimentos a serem realizados pelas propostas de *retrofit*.

Modelo	Investimento(R\$)
Modelo Real	-
Modelo Proposto XIV (Etiqueta A)	1.120.151,13
Modelo Proposto XI (Etiqueta B)	870.311,00
Modelo Proposto XII (Etiqueta B)	870.311,00
Modelo Proposto X (Etiqueta B)	594.357,35
Modelo Proposto XIII (Etiqueta B)	1.110.151,13
Modelo Proposto XV (Etiqueta B)	1.033.533,00
Modelo Proposto I (Etiqueta C)	258.292,35
Modelo Proposto II (Etiqueta C)	352.167,43
Modelo Proposto VI (Etiqueta C)	929.988,30
Modelo Proposto VII (Etiqueta C)	1.023.863,38
Modelo Proposto VIII (Etiqueta C)	939.658,30

A seguir, aplicando a metodologia da ANEEL para projetos de eficiência energética, foi calculado o índice RCB (Relação Custo-Benefício) para avaliação da viabilidade financeira de cada proposta.

Na Tabela 6.7 é demonstrado a redução no consumo de energia elétrica, o percentual de redução e o custo total da energia elétrica evitada de cada proposta de *retrofit*. Na Tabela 6.8 são apresentados os índices RCB (Relação custo-benefício) encontrados para cada proposta.

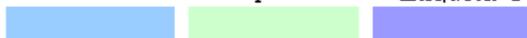
Tabela 6.7 - Comparação dos resultados de consumo anual (kWh) e custo total de energia evitada (R\$) das propostas de *retrofit*.

Modelo	Consumo anual			Custo Total		
	MWh	EE(MWh)	EE%	R\$	CEE(R\$/MWh)	EE X CEE (R\$)
Modelo Real	2.127,74	-		590.659,70		-
Modelo Proposto XIV	1.860,24	267,50	12,57	516.402,99	277,60	74.258,05
Modelo Proposto XI	1.860,41	267,33	12,56	518.423,00	277,60	74.208,55
Modelo Proposto XII	1.860,36	267,37	12,56	516.437,03	277,60	74.221,91
Modelo Proposto X	1.875,23	252,51	11,86	520.562,46	277,60	70.096,77
Modelo Proposto XIII	1.860,51	267,23	12,55	516.476,46	277,60	74.182,88
Modelo Proposto XV	1.886,16	241,58	11,35	523.597,73	277,60	67.062,60
Modelo Proposto I	2.005,62	122,12	5,74	556.759,27	277,60	33.900,51
Modelo Proposto II	1.990,59	137,15	6,44	552.588,05	277,60	38.072,84
Modelo Proposto VI	1.987,28	140,46	6,60	551.668,09	277,60	38.991,69
Modelo Proposto VII	1.985,14	142,59	6,70	551.075,70	277,60	39.582,98
Modelo Proposto VIII	1.983,74	143,99	6,76	550.687,34	277,60	39.971,63

Tabela 6.8 - Valores dos índices RCB (Relação custo-benefício) das propostas de retrofit

Modelos Propostos	XIV	XI	XII	X	XIII	XV	I	VI	VI	VII	VIII
RCB	1,32	1,03	1,03	0,75	1,31	1,36	1,14	1,23	2,21	2,40	2,18

Etiqueta A Etiqueta B Etiqueta C



Modelos Propostos - Etiqueta A

A única proposta de *retrofit* contemplada com a etiqueta A foi a representada pelo modelo proposto XIV. Esta proposta reduz o consumo anual de energia elétrica em 267.495 kWh (12,57%), em relação ao modelo real (etiqueta E). Para a implementação da proposta será necessário um investimento de R\$ 1.120.151,13. Neste valor estão incluídos: a instalação de película de controle solar prata refletiva, na fachada oeste e a instalação nas fachadas leste e oeste de parede interna constituída de painel EPS com 9cm (com 85cm) e esquadria de correr com vidro Cool Lite 120-PR-5.5.1, da marca Cebrace. Entretanto, pelo alto custo da implementação de tais medidas, a RCB (Relação custo-benefício) foi de 1,32, ficando acima do valor máximo permitido pela ANEEL para projetos de eficiência energética, que seria de 0,80, tornando a proposta inviável.

Modelos Propostos - Etiqueta B

O modelo proposto XII reduz o consumo anual de energia elétrica em 267.324 kWh (12,56%), em relação ao modelo real (etiqueta E). Para a implementação da proposta será necessário um investimento de R\$ 870.311,00. Neste valor estão incluídos: a instalação de película de controle solar prata refletiva, na fachada oeste e a instalação, nas fachadas leste e oeste, de parede interna constituída de painel EPS com 7cm (com 110cm) e esquadria de correr com vidro Reflecta Float incolor, com 6mm. Entretanto, pelo alto custo da implementação de tais medidas, a RCB (Relação custo-benefício) foi de 1,03, ficando acima do valor máximo permitido pela ANEEL para projetos de eficiência energética, que seria de 0,80, tornando a proposta inviável.

A diferença entre o modelo proposto XI e o XII esta na espessura da câmara de ar ventilada que separa a parede interna da esquadria externa. Nesta proposta, ela foi modelada com 10 cm, enquanto que na anterior com 5 cm. O modelo proposto XI reduz o consumo anual de energia elétrica em 267.383 kWh (12,56%), em relação ao modelo real (etiqueta E). Para a implementação da proposta será necessário um investimento de R\$ 870.311,00. Neste valor estão incluídos: a instalação de película de controle solar prata refletiva na fachada oeste e a instalação, nas fachadas leste e oeste, de parede interna constituída de painel EPS com 7cm (com 110cm) e esquadria de correr com vidro Reflect Float incolor, com 6mm. Entretanto, pelo alto custo da implementação de tais medidas, a RCB (Relação custo-benefício) foi de 1,03,

ficando acima do valor máximo permitido pela ANEEL para projetos de eficiência energética, que seria de 0,80, tornando a proposta inviável

O modelo proposto X reduz o consumo anual de energia elétrica em 252.512 kWh (11,86%), em relação ao modelo real (etiqueta E). Para a implementação da proposta será necessário um investimento de R\$ 594.354,35. Neste valor estão incluídos: o isolamento da cobertura com painel EPS de 35mm e a instalação de telhado em fibrocimento, a instalação de película de controle solar prata refletiva na fachada oeste e a instalação, nas fachadas leste e oeste, de meia parede interna constituída de painel EPS com 7cm, com 85 cm. A RCB (Relação custo-benefício) foi de 0,75, ficando abaixo do valor máximo permitido pela ANEEL para projetos de eficiência energética, que seria de 0,80, tornando a proposta viável. Através do cálculo do Payback, o retorno do investimento se dará a partir do oitavo ano.

O modelo proposto XIII reduz o consumo anual de energia elétrica em 267.230 kWh (12,55%), em relação ao modelo real (etiqueta E). Para a implementação da proposta será necessário um investimento de R\$ 1.110.151,13. Neste valor estão incluídos: a instalação de película de controle solar prata refletiva na fachada oeste e a instalação, nas fachadas leste e oeste, de parede interna constituída de painel EPS com 7cm (com 110cm) e esquadria de correr com vidro laminado Cool Lite 5.5.1, com 10mm. Entretanto, pelo alto custo da implementação de tais medidas, a RCB (Relação custo-benefício) foi de 1,31, ficando acima do valor máximo permitido pela ANEEL para projetos de eficiência energética, que seria de 0,80. Pela análise dos resultados obtidos, concluiu-se que esta alternativa também não é viável.

O modelo proposto XV reduz o consumo anual de energia elétrica em 241.577 kWh (11,35%), em relação ao modelo real (etiqueta E). Para a implementação da proposta será necessário um investimento de R\$ 1.033.533,00. Neste valor estão incluídos: a substituição dos vidros existentes pelos vidros laminados Cool Lite PR 120 4.4.1 Prata, a instalação, nas fachadas leste e oeste, de meia parede interna constituída de painel Wall com 40mm (com 85cm), o isolamento da cobertura com painel EPS de 35mm e a instalação de telhado em fibrocimento. Entretanto, pelo alto custo da implementação de tais medidas, a RCB (Relação custo-benefício) foi de 1,36, ficando acima do valor máximo permitido pela ANEEL para projetos de eficiência energética, que seria de 0,80. Pela análise dos resultados obtidos, concluiu-se que esta alternativa também não é viável.

Modelos Propostos - Etiqueta C

O modelo proposto I reduz o consumo anual de energia elétrica em 122.120 kWh (5,74%), em relação ao modelo real (etiqueta E). Para a implementação da proposta será necessário um investimento de R\$ 258.292,35. Neste valor está incluída: a instalação de película de controle solar prata refletiva na fachada oeste. Entretanto, pela pequena redução no valor anual da conta de energia elétrica, a RCB (Relação custo-benefício) foi de 1,14, ficando acima do valor máximo permitido pela ANEEL para projetos de eficiência energética, que seria de 0,80. Concluindo-se portanto que a proposta analisada não é viável.

O modelo proposto II reduz o consumo anual de energia elétrica em 137.146 kWh (6,45%), em relação ao modelo real (etiqueta E). Para a implementação da proposta será necessário um investimento de R\$ 352.167,43. Neste valor está incluída: Neste valor estão incluídos: o isolamento da cobertura com painel EPS de 35mm e a instalação de telhado em fibrocimento, a instalação de película de controle solar prata refletiva na fachada oeste. Entretanto, pela pequena redução no valor anual da conta de energia elétrica, a RCB (Relação custo-benefício) foi de 1,23, ficando acima do valor máximo permitido pela ANEEL para projetos de eficiência energética, que seria de 0,80. Concluindo-se portanto que a proposta analisada também não é viável.

O modelo proposto III reduz o consumo anual de energia elétrica em 137.146 kWh (6,45%), em relação ao modelo real (etiqueta E). Para a implementação da proposta será necessário um investimento de R\$ 352.167,43. Neste valor está incluída: Neste valor estão incluídos: o isolamento da cobertura com painel EPS de 35mm e a instalação de telhado em fibrocimento, a instalação de película de controle solar prata refletiva na fachada oeste. Entretanto, pela pequena redução no valor anual da conta de energia elétrica, a RCB (Relação custo-benefício) foi de 1,23, ficando acima do valor máximo permitido pela ANEEL para projetos de eficiência energética, que seria de 0,80. Concluindo-se portanto que a proposta analisada também não é viável.

O modelo proposto VI reduz o consumo anual de energia elétrica em 140.460 kWh (6,60%), em relação ao modelo real (etiqueta E). Para a implementação da proposta será necessário um investimento de R\$ 929.988,30. Neste valor estão incluídos: a substituição dos vidros das fachadas leste e oeste, por vidros laminados Cool Lite 120 PR 4.4.1, e a instalação interna às esquadrias da fachada leste e oeste, intercalado por uma câmara de ar com 5 cm, de meia parede em painel EPS com 70mm (com 85cm) reduzindo o W.W.R. Entretanto, pelo alto custo da implementação de tais medidas e pela pequena redução no valor anual da conta de

energia elétrica, a RCB (Relação custo-benefício) foi de 2,21, ficando acima do valor máximo permitido pela ANEEL para projetos de eficiência energética, que seria de 0,80. Pela análise dos resultados obtidos, concluiu-se que esta alternativa também não é viável.

O modelo proposto VII reduz o consumo anual de energia elétrica em 142.594 kWh (6,70%), em relação ao modelo real (etiqueta E). Para a implementação da proposta será necessário um investimento de R\$ 1.023.863,38. Neste valor estão incluídos: a substituição dos vidros das fachadas leste e oeste, por vidros laminados Cool Lite 120 PR 4.4., a instalação interna às esquadrias da fachada leste e oeste, intercalado por uma câmara de ar com 5 cm, de meia parede em EPS com 70mm (com 85cm) reduzindo o W.W.R e o isolamento da cobertura com painel de EPS com 35mm e telhado de fibrocimento. Entretanto, pelo alto custo da implementação de tais medidas e pela pequena redução no valor anual da conta de energia elétrica, a RCB (Relação custo-benefício) foi de 2,40, ficando acima do valor máximo permitido pela ANEEL para projetos de eficiência energética, que seria de 0,80. Pela análise dos resultados obtidos, concluiu-se que esta alternativa também não é viável.

O modelo proposto VIII reduz o consumo anual de energia elétrica em 143.993 kWh (6,77%), em relação ao modelo real (etiqueta E). Para a implementação da proposta será necessário um investimento de R\$ 939.658,30. Neste valor estão incluídos: a substituição dos vidros das fachadas leste e oeste, por vidros laminados Cool Lite 120 PR 4.4.1 e a instalação interna às esquadrias da fachada leste e oeste, intercalado por uma câmara de ar com 5 cm, de meia parede em painel Wall com 40mm (com 85cm) reduzindo o W.W.R. Entretanto, pelo alto custo da implementação de tais medidas e pela pequena redução no valor anual da conta de energia elétrica, a RCB (Relação custo-benefício) foi de 2,18, ficando acima do valor máximo permitido pela ANEEL para projetos de eficiência energética, que seria de 0,80. Pela análise dos resultados obtidos, concluiu-se que esta alternativa também não é viável.

Capítulo 7 – Conclusões

Neste capítulo são expostas as considerações finais e as recomendações para trabalhos futuros.

7.1. Considerações finais

A escolha de um dos Ministérios da Esplanada, em Brasília, projetado por Oscar Niemeyer, exemplo da produção modernista no Brasil, como estudo de caso deste trabalho, representou um desafio. Este edifício envidraçado, sem elementos de proteção solar adequados para garantir a eficiência do controle da entrada de sol nos ambientes, é representativo também de uma tipologia marcante na cidade, a dos edifícios de escritórios.

O edifício analisado, como também todos os outros existentes com as mesmas características arquitetônicas, exige intervenções que garantam o conforto térmico de seus usuários, reduzindo sua dependência da energia elétrica, para obtenção de conforto ambiental. Entretanto, nos edifícios dos Ministérios predomina a natureza de bem cultural, nesse caso as intervenções devem ser conduzidas observando o conceito de Reabilitação, que é definido como ato ou processo de possibilitar um uso eficiente e compatível de uma propriedade, através de reparações, alterações e acréscimos, preservando ao mesmo tempo, as partes ou características que transmitem os seus valores histórico, cultural e arquitetônico.

Cumprindo esta premissa, este trabalho analisou as alternativas de *retrofit* da envoltória de um dos edifícios dos Ministérios, de modo a otimizar o seu desempenho térmico e energético. Para esta avaliação foi utilizado o Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos - RTQ-C, através das metodologias prescritiva e da simulação.

Na metodologia prescritiva do RTQ-C, a etiqueta da envoltória original assumiu o intervalo de eficiência D. Procedendo-se a análise de sensibilidade dos parâmetros da equação do Índice de Consumo da envoltória - RTQ-C conclui-se que para Brasília, situada na zona bioclimática 4, tipologias consideradas representativas de edifícios de escritórios, como é o caso do edifício analisado, que possui 10 pavimentos (Fator Altura) com largura bem diferenciada do comprimento (Fator Forma), variações no percentual de abertura das fachadas

(PAFt) e no fator solar (FS) dos vidros provocam alterações consideráveis nos resultados e que a redução destes valores repercute em melhores níveis de eficiência energética

Na metodologia da simulação do RTQ-C foram testadas, parametricamente, variáveis arquitetônicas que se apresentaram potencialmente viáveis para aplicação em *retrofit* de envoltória de edifícios de escritórios, tendo como premissa a busca da qualidade ambiental, a mínima interferência na fachada, a organização e a limpeza na execução da reforma, facilidade de manutenção, possibilidade de instalação em edifícios existentes, e sobretudo melhorias nas condições de conforto dos ambientes e em consequência na sua performance energética.

Na etapa de análise de sensibilidade dos ganhos de calor, realizada na calibração do edifício real, verificou-se que 40% do valor total dos ganhos de calor correspondiam a radiação solar de ondas curtas incidente através das janelas externas, seguido da iluminação artificial com 18%. Desta maneira, deduziu-se que a envoltória (janelas) é a maior fonte de ganhos térmicos desta edificação, sendo portanto o parâmetro de maior influência do modelo base.

Verificou-se, portanto, que a análise de sensibilidade dos parâmetros da equação do Índice de Consumo da envoltória (metodologia prescritiva/ RTQ-C) e da calibração do modelo (metodologia da simulação/ RTQ-C) apontaram os mesmos resultados, ou seja, que variações no percentual de abertura das fachadas (PAFt) e no fator solar (FS) dos vidros provocam alterações consideráveis nos resultados. Com base nestes resultados, analisou-se os ganhos e as perdas de calor pelos fechamentos opacos e transparentes da edificação, através de análise da influência das alterações de parâmetros construtivos que se mostraram tecnicamente viáveis para aplicação em *retrofit* de envoltória de edifícios existentes.

As melhores alternativas propostas foram classificadas, recebendo as etiquetas (ENCE) A, B e C, demonstrando através das simulações termo-energéticas, que a redução do PAF, com a instalação interna às esquadrias de painel EPS TI, a redução do fator solar dos vidros e da transmitância térmica dos componentes opacos da envoltória e o isolamento da cobertura, podem melhorar a performance energética da edificação. Pode-se verificar que é possível alcançar uma redução da ordem de 27% na potência de refrigeração e por consequência deste índice, uma redução de até 12,57% no consumo elétrico (modelo proposto etiqueta A).

Foi comparado o desempenho do modelo real calibrado com o modelo de referência D. Percebeu-se que o primeiro tem o valor de consumo anual superior ao segundo, portanto contrariando a metodologia prescritiva do RTQ-C, que conferiu a etiqueta D ao edifício real, a

metodologia da simulação conferiu a etiqueta E ao edifício real (edifício dos Ministérios). Entretanto, como a diferença entre os dois valores (Modelo Calibrado e Modelo de Referência D) corresponde a 0,47% (menor que a margem de erro anual de 5% prevista pela metodologia da calibração do modelo), neste trabalho foi adotada a classificação do nível de eficiência energética da envoltória do edifício dos Ministérios pela metodologia prescritiva, portanto etiqueta D.

Na análise financeira das propostas de *retrofit* de envoltória foi possível notar uma expressiva diferença no valor do investimento a favor da proposta que utiliza película de controle solar, reduz em 30% o percentual de abertura nas fachadas, através da utilização de isolantes térmicos (EPS) internamente às esquadrias dos fechamentos externos e propõe o isolamento térmico da cobertura, representando um investimento total de R\$ 594.354,35. Esta proposta etiqueta B, representada pelo modelo proposto X, foi a única com o custo-benefício considerado viável (menor que 0,80) pela ANEEL para projetos de eficiência energética, apresentando o retorno do investimento em oito anos. Nesta alternativa, as medidas conjuntamente simuladas geraram uma redução da ordem de 25% na potência de refrigeração e de 11,86% no consumo elétrico. As propostas que tiveram como uma das alternativas testadas a substituição dos vidros existentes ou a construção de parede interna com vidros de alta performance energética demonstraram ser inviáveis pelo alto custo de implementação destas medidas.

A especificação de componentes construtivos adequados a cada realidade climática deve ser preferencialmente resolvida na elaboração do partido arquitetônico da edificação, entretanto, os edifícios existentes, em especial os de grande valor histórico e cultural representam desafios a serem vencidos na busca do conforto térmico e luminoso. A intervenção no objeto de estudo, com suas fachadas totalmente envidraçadas, demonstrou que a partir da identificação dos problemas ambientais e análise paramétrica de materiais e componentes construtivos, utilizando a simulação computacional, é possível reabilitar esses edifícios, garantindo condições mais favoráveis de conforto, menor dependência dos sistemas mecânicos de condicionamento de ar, níveis mais elevados de eficiência energética e preservação de sua arquitetura original.

A implementação do RTQ-C, através do estabelecimento dos níveis máximos de consumo de energia elétrica, deverá, em médio e longo prazos, retirar do mercado edifícios energeticamente ineficientes e promover a construção de edificações adaptadas às características climáticas de cada região e portanto mais eficientes. O avanço tecnológico necessário para se atingir estes níveis eficientes de consumo de energia deverá estimular

transformações no mercado, tendo em vista que novas tecnologias poderão promover mudanças não só em relação ao consumo de energia, mas à eficiência dos componentes e materiais construtivos nacionais e dos sistemas de uma maneira mais geral.

7.2. Recomendações para trabalhos futuros

Com base nos resultados deste trabalho, sugerem-se as seguintes opções de estudo:

- a) Analisar os resultados do desempenho térmico e energético de componentes construtivos aplicados em *retrofit* de envoltória em edifícios de escritórios não tombados;
- b) Analisar os resultados do desempenho térmico e energético de componentes construtivos aplicados em *retrofit* de envoltória em outras tipologias construtivas;
- c) Analisar os resultados do desempenho térmico e energético da fachada dupla ventilada em retrofit de envoltória de edifícios de escritórios existentes;
- d) Analisar o efeito de estratégias passivas, como ventilação natural, para este clima;
- e) Analisar o efeito das alternativas de *retrofit* de envoltória, testadas sem a simulação do ar condicionado, sobre o perfil da carga térmica.

Referências Bibliográficas

ASHRAE Fundamentals Handbook, Chapter 27, 1997.

AL-HOMOUD, M.S. **Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation material.** Building and Environment, v. 40, p. 353-366, 2005.

ALUCCI, M. P.; LONG Jr. C.C.; INOUE, M.M. **Banco de dados e procedimentos para utilização de vidros e policarbonatos na Arquitetura.** Projeto de pesquisa do Departamento de Tecnologia da FAU/USP, 2001.

AMORIM, C. N. D. **Desempenho Térmico de Edificações e Simulação Computacional no Contexto da Arquitetura Bioclimática: Estudo de Caso na Região de Brasília.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, UnB, Brasília, 1998.

AMORIM, C. N. D. **Iluminação natural, conforto ambiental e eficiência energética no projeto de arquitetura: estratégias projetuais e tecnológicas para climas tropicais.** Projeto de Pesquisa CNPq, 2003.

AMORIM, C.D.N., SPOSTO R. **Processos para etiquetagem de eficiência energética em edificações.** Disponível em http://189.74.17.217:8080/downloads/forum_2008/dia_07/claudia_supera_out_2008.ppt. Acessado em 25/03/2009.

ANDRADE, A.C.; SOUZA, U.E.L. **Críticas ao processo orçamentário tradicional e recomendações para a confecção de um orçamento integrado ao processo de produção de um empreendimento.** São Paulo, SP. 2003. 11 p. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 3., 2003. Anais... São Carlos, SP. P. 853-862.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR15220-2:** Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005. Rio de Janeiro, 2005.

_____**NBR 15220-3:** Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

_____**NBR 6401:** Instalações Centrais de Ar Condicionado para Conforto - Parâmetros Básicos de Projeto, 1980

BALTAR, M.G. **Redução da Demanda de Energia Elétrica utilizando Parâmetros Construtivos visando ao Conforto Térmico.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS, 2006.

BEJAN, A. **Tranferência de calor**. Editora Edgard Blücher Ltda. São PAULO, 1996.

BRAGA, D. K. **Arquitetura residencial das superquadras do Plano Piloto: aspectos do conforto térmico**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

BRASIL. Lei 10.295, de 17.out.01 – “Lei de Eficiência Energética”. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. D.O.U., Brasília, DF, 18.out.2001b.

BRASIL. Decreto 4.059 de 19.dez.01. Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001a, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. D.O.U., Brasília, DF, 20.dez.2001a.

_____. Brazilian cities. In: Seventh International IBPSA Conference, Building Simulation 2001, **Proceedings**... Rio de Janeiro: IBPSA, 2001. pp.1373-1379

Brasília Patrimônio Cultural (2001). Folheto informativo , IPHAN, Ministério da Cultura e Governo Federal, Brasília-DF.

BRUAND, Y. **Arquitetura Contemporânea no Brasil**. 3ª ed. São Paulo: Ed. Perspectiva,1999.

CARAM, R.M.; GILIO R. C. **Reflexão da Radiação Solar em Vidros e Películas Refletivas**. VI Encontro Nacional e III Encontro Latino Sobre Conforto no Ambiente Construído – ENCAC, São Pedro, SP, 2001.

CARAM, R. M. **Tese de doutorado Caracterização ótica de materiais transparentes e sua relação com o conforto ambiental em edificações**. Faculdade de Engenharia Civil, Unicamp, Campinas, 1998.

CARLO, J.C. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações Não- Residenciais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2008.

CARLO, J.; GHISI, E.; LAMBERTS, R.; MASCARENHAS, A. **Energy efficiency building code of Salvador, Brazil** In: 20th CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 2003, Santiago. Anais. [S.l.]: [S.n.], [2004?]. 1 CD. Acesso em: 10 jan. 2008.

CARLO, J. C., GHISI, E., LAMBERTS, R. **The use of computer simulation to establish energy efficiency parameters for a building code of a city in Brazil**. Eighth International Building Simulation, 2003.

CARPINTERO, A. C .C. **Brasília - prática e teoria urbanística no Brasil: 1956 – 1998**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). São Paulo: USP, 1998.

CARRIÈRES, K. R. M. **Desempenho térmico e consumo energético de edifícios de escritórios em São Carlos**, SP. -Campinas, SP: [s.n.], 2007.

CASTRO A. P. **Desempenho térmico de vidros utilizados na construção civil: estudo em células-teste**. Tese de Doutorado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Estadual de Campinas, 2006.

CAVALCANTI, L. **Quando o Brasil era Moderno**. Aeroplano, Rio de Janeiro, 2001.

CEOTTO, L. H. **A construção civil e o meio ambiente**. Notícias da construção: São Paulo, Sinduscon-SP, v. 51 a 54. São Paulo, 2007.

CLEDWYN-DAVIES, D. N. **Float in Glass Architecture**. Glass Technology, v.34, n.6, p.223-28, 1993.

CORREIA, P. **Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil: Pesquisa na Classe Comercial**. AT. Procel: 2007a. Disponível em: www.eletrobras.com/pci. Acesso em: 17/01/2008.

CÓTICA, M. S. **Análise do impacto da retirada da proteção externa na carga térmica e no consumo de energia elétrica de uma edificação**. Monografia em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS, 2004.

CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. K.; WILKELMANN, F. C.; BUHL, W.F.; HUANG, Y.J.; PEDERSEN, C. O.; STRAND, R. K.; LIESEN, R. J.; FISHER, D. E., WITTE, M. J.; GLAZER, J. **EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation**. In: Energy and Buildings. Oxford: Elsevier, 2001. v. 22 pp 319-331.

CROISSET, M. L. **Hygrothermique dans le Batiment. Confort thermique d'hiver et d'été Condensations**. Eyrolles Éditions, Paris, 1970

DESIGNBUILDER. **Design Builder Software Ltd**. 2008.

DIAS, P. R. V. **Engenharia de custos: uma metodologia de orçamentação para obras civis**. 4.ed. Curitiba: Copiare, 2001. 213 p.

ELETROBRAS. <http://www.eletrobras.com.br/procel>. Acessado em 14/06/2008.

ENERGYPLUS. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Office. Desenvolvido pelo governo dos Estados Unidos da América. Apresenta o programa EnergyPlus. Disponível em: <<http://energyplus.gov>> . Acesso em: 20 maio 2008.

EVANS, M. e SCHILLER, S. **Diseno Bioambiental y Arquitectura Solar**. Serie Ediciones Previas, Faculdade de Arquitetura, Buenos Aires, 1991.187 pp.

FERREIRA, P. C. **Alguns dados sobre o clima para a edificação em Brasília**. Dissertação de Mestrado em Arquitetura, FAU - UnB, Brasília, 1965. 103 pp. cópia reprográfica.

FICHER, S.; ACAYABA, M. M. **Arquitetura moderna brasileira**. São Paulo: Projeto Editores Associados Ltda, 1982.

FORMOSO, C. T. et al. **Estimativa de custos de obras de edificação**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 18 p. 1986. Caderno Técnico do curso de pós - graduação em Engenharia Civil.

FOSSATI M. **Metodologia para avaliação da sustentabilidade de Projetos de edifícios: o caso de escritórios em Florianópolis**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

FRANCO, L.S. **O projeto de vedações verticais: características e a importância para a racionalização do processo de produção**. In: I Seminário Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios: Vedações Verticais – São Paulo, 1998. Anais. EPEUSP/PCC, 1998. P221-236

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 5a edição, Studio Nobel, São Paulo, 2001.

GELLER, H.S. **Efficient electricity use: a development strategy for Brazil**. American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington, DC, 1991.

GHISI, E. **Desenvolvimento de uma metodologia para retrofit em sistemas de iluminação: estudo de caso na Universidade Federal de Santa Catarina**. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 246 p., 1997.

GHISI, E.; TINKER, J. **Optimizing energy consumption as a function of window area and room size**. Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, p. 1307-1314.

GIVONI, B. **Man, Climate and Architecture**. London: Elsevier, 1998.

GIVONI, B. **Comfort, climate analysis and building design guidelines**. In: Energy and building, vol.18, July/1992, p.11-23.

GOEDERT J.; BATIZ, E. C. **Avaliação do conforto térmico em postos de trabalho de motoristas de ônibus: estudo de caso**. Instituto Superior TUPY – SOCIESC, Congresso brasileiro de ergonomia, ABERGO, 2006.

GOULART, F. G. **A conservação do ambiente urbano na área tombada de Brasília**. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia, 2006.

GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades Brasileiras**, PW ed., São Paulo, 1997.

GOULART, S.; LAMBERTS, R. **Levantamento da experiência internacional - experiência nos Estados Unidos** Florianópolis, 2005. Relatório Técnico do LabEEE- 2005.

GRILLO J. C. S. **Reabilitação ambiental de edifício público moderno: O caso do Palácio Itamaraty**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

HAVES, P. **New tools for building simulation**. IV Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul. Anais... Curitiba: ASBRAV, 2004. Documento eletrônico. 15 p.

HERNANDEZ NETO, A.; TRIBESS, A.; FIORELLI, F.A.S. **Influência da envoltória no consumo de energia em edifício comercial com ocupação mista.** In: V ENCONTRO NACIONAL E II ENCONTRO LATINO AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1999, Fortaleza. Anais... Fortaleza: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC), 1999.

INCROPERA, F. P.; DEWITT D. P.; BERGMAN T. L.; LAVINE A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 6ª edição, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2008.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Sustainability criteria for the selection of materials and components: A developing world view.** Projeto Finep. abitações mais sustentáveis, 2006. Disponível em: <http://www.cc2540.pcc.usp.br/Material%202005/Sustaintability%20Criteria%20for%20the%20Selection%20of%20Materials%20and%20Components%20>- Acessado em: 22/07/2009.

KARASHIMA, T.M. **Avaliação de diferentes ferramentas para o cálculo de carga térmica e sua aplicação na análise energética de edifícios.** Monografia em Engenharia Mecânica. Faculdade de Tecnologia – Universidade de Brasília - UnB, 2006.

KLEIN, D.L; KLEIN, G.M.B; LIMA, R.C.A. **Sistemas Construtivos Inovadores: Procedimentos de Avaliação.** II Seminário de Patologias das Edificações: Novos Materiais e Tecnologias Emergentes. UFRGS, Porto Alegre, 2004.

KOHLSDORF, M. E. **As Imagens de Brasília.** In: “Aldo Paviani” (org.).Brasília, Ideologia e Realidade: o espaço urbano em questão. São Paulo: Ed. Projeto, 1985, pp. 161-190.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura.** 2ª edição. São Paulo: ProLivros, 2004.

LAMBERTS, R. **Desempenho Térmico de Edificações.** Apostila do curso de Pós-graduação do Curso de Engenharia Civil, UFSC, 2005.

LAMBERTS, R.; CARLO, J. **Uma discussão sobre a Regulamentação de Eficiência Energética em Edificações.** Artigo apresentado no Congresso de Condicionador de ar, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do MERCOSUL, 2007.

LEE, A.S.; WESTPHAL, F.S.; LAMBERTS, R. **Calibração de um modelo de simulação através de medições de curto prazo: estudo de caso no departamento de engenharia civil da UFSC.** ENTAC, 2002.

LIMA, T. B. S. **Uso da simulação computacional em projetos de iluminação interna.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2003.

LIMA, R.V.S. **A influência de decisões arquitetônicas na eficiência energética do Campus.** Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2007.

LIMA, T., AMORIM, C.D.N. **Levantamento das Características Tipológicas de Edifícios de Escritórios em Brasília.** In: ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Anais... Ouro Preto: ENCAC, 2007.

MACIEL, A. A. **Projeto Bioclimático em Brasília: Estudo de Caso em Edifício de Escritórios.** Florianópolis, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2002.

MANUAL PARA ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ANNEL. Disponível em: [http:// www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=27](http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=27). Acessado em 10/03/2009.

MARQUES DE JESUS, C.R. **Análise de custos para reabilitação e edifícios para habitação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

MASCARÓ, LÚCIA. **A iluminação do espaço urbano.** Masquatro Editora, Porto Alegre, 2006.

MEIER, A.; OLOFSSON, T.; LAMBERTS, R. **What Is an Energy-Efficiency Building?** In: IX ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Anais...Foz do Iguaçu: ENTAC, 2002.

MELHADO, S.B.; OLIVEIRA, L.A. **Projeto de fachadas leves: especificações de desempenho.** Revista do Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAU/USP, v. 25, p. 12-26, 2009.

MELO, A. P. **Análise da influência da transmitância térmica no consumo de energia de edificações comerciais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

MENDES, N.; LAMBERTS, R.; NETO, J.A.B.D. **Building simulation in Brazil.** Building Simulation, 2001.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balço Energético Nacional, 2009.** Disponível em <<http://www.mme.gov.br>> Acesso em: 18 de outubro de 2009.

OLGYAY, V. **Arquitectura y clima, manual de diseño bioclimatico para arquitectos e urbanistas.** Barcelona: Ed. Gustavo Gili S.A., 1998.

PAMPLONA N. M. **Análise do comportamento de painéis de chapas de aço como elementos estruturais e de vedação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil. Uberlândia, 19 de agosto de 2005.

PEDRINI, A. **Desenvolvimento de metodologia de calibração de modelos para simulações térmica e energética de edificações.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997. 186 p.

PEDRINI, A., LAMBERTS, R. **Influência do tamanho e forma sobre o consumo de energia de edificações de escritório em clima quente.** In: VII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído. Anais... Curitiba: ANTAC, 2003. pp. 209-216

PEDRINI, A.; SZOKOLAY, S. **Estimation of SHGC for glass with exterior shading device trough simulation.** PLEA. 2003.

PEREIRA, F.L.; BEYER, P. O.; SCHWIEDER, A. O. **Avaliação da Influência Termoenergética de Parâmetros Físicos em uma Edificação com Condicionamento de Ar.** In: ENCIT- 10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. Anais...Rio de Janeiro, ENCIT, 2004.

PEREIRA, F.L. **Avaliação da influência termo-energética do tipo de vidro utilizado na envoltória de edificações.** In: Eletrisol – Feira de Eletricidade e Eletroeletrônica – Fórum de Energia, 2003. Novo Hamburgo, Rio Grande do Sul. Anais... Eletrisol 2003 – Fórum de Energia, Novo Hamburgo, Rio Grande do Sul, 2003

QUALHARINI, E.L.; DUCAP, V.; ORIOLLI, A. **Considerações sobre Manutenção e Reabilitação Predial frente às Questões de Auto-Sustentabilidade.** Artigo no Congresso Construção 2000, Portugal, 2000.

REGULAMENTO TÉCNICO DA QUALIDADE PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS COMERCIAIS, DE SERVIÇOS E PÚBLICOS. Disponível em: www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001424.pdf. Acessado em 10/03/2009.

SCHOLZE, H. **Le Verre: Nature, Structure et Propriétés.** Institut du Verre, Paris, 1980.

SIGNOR, R.; WESTPHAL, F.; LAMBERTS, R. **Regression analysis of electric energy consumption and architectural variables of conditioned commercial buildings in 14.** In: Seventh International IBPSA Conference, Building Simulation 2001, Proceedings... Rio de Janeiro: IBPSA, 2001. pp.1373-1379

SILVA, J. S. **A Eficiência do Brise-Soleil em Edifícios Públicos de Escritórios: Estudo de Casos no Plano Piloto de Brasília.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SILVA, P. C. P. **Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Ramo de Processos e Gestão da Construção. Universidade do Minho. Lisboa, 2006.

SILVA, V. G. **Avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros: diretrizes e base metodológica.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2003. 210p.

SILVA, V.G.; AGOPYAN, V.; JOHN, V.M. **The role of architectural decision-making process in environmentally responsible buildings.** In: CIB Symposium on Construction and Environment: theory into practice. 23-24 de novembro de 2000. Sao Paulo, 2000.

STRAND, R.K. **Energypius: A new-generation energy analysis and calculation engine for building design.** Association of Collegiate Schools of Architecture Technology Conference, Cambridge, MA, July, 2000.

VALE, M. S. **Diretrizes para racionalização e atualização das edificações: segundo o conceito da qualidade e sobre ótica do retrofit.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ, 2006.

VERONESI, A. **Sistema de certificação da qualidade de edifícios de escritórios no Brasil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil e Urbana). Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, 2006.

WESTPHAL, F.; MARISNOSKI, D.L.; GUIZI, E.; LAMBERTS, R. **Proposta de retrofit para o sistema de iluminação artificial da UFSC.** ENTAC - Foz do Iguaçu, Paraná., 2002.

WESTPHAL, F. **Análise de incertezas e sensibilidade de modelos computacionais aplicada à simulação do desempenho energético de edificações comerciais.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Saanta Catarina - UFSC, Florianópolis, 2007.

SITES NA INTERNET:

http://abee.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=19&Itemid=27

<http://pvcdrom.pveducation.org/SUNLIGHT/TMY.HTM>

<http://www.jurisdoctor.adv.br/artigos/da-eng.htm>

<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/136/artigo95951-3.asp>

<http://www.usp.br/fau/deptecnologia/docs/bancovidros/low.htm>

<http://www.quintacidade.com/wp-content/uploads/2008/03/carta-de-burra.pdf>

<http://www.eere.energy.gov>

<http://www.designbuilder.co.uk>

<http://www.intercontrol.com.br/pvarquitetu2.asp>

http://www.friomaxsp.com.br/dica_005.htm

<http://www.eco.edp.pt/pt/eficiencia>

<http://www.trane.com.br/2006/files/literatura/pdf3/79.pdf>

http://correio.piniweb.com/userfiles/manual_eps.pdf?mace2_cod=6222

<http://www.construpor.com/01.htm>

www.ratingreviewni.gov.uk/eh_the_royal_institution_of_chartered_surveyors.pdf

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

Anexos

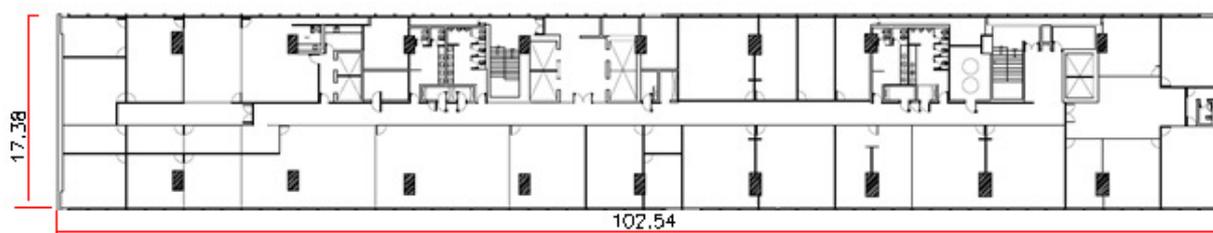
Anexo I

Itens observados nas visitas ao edifício analisado

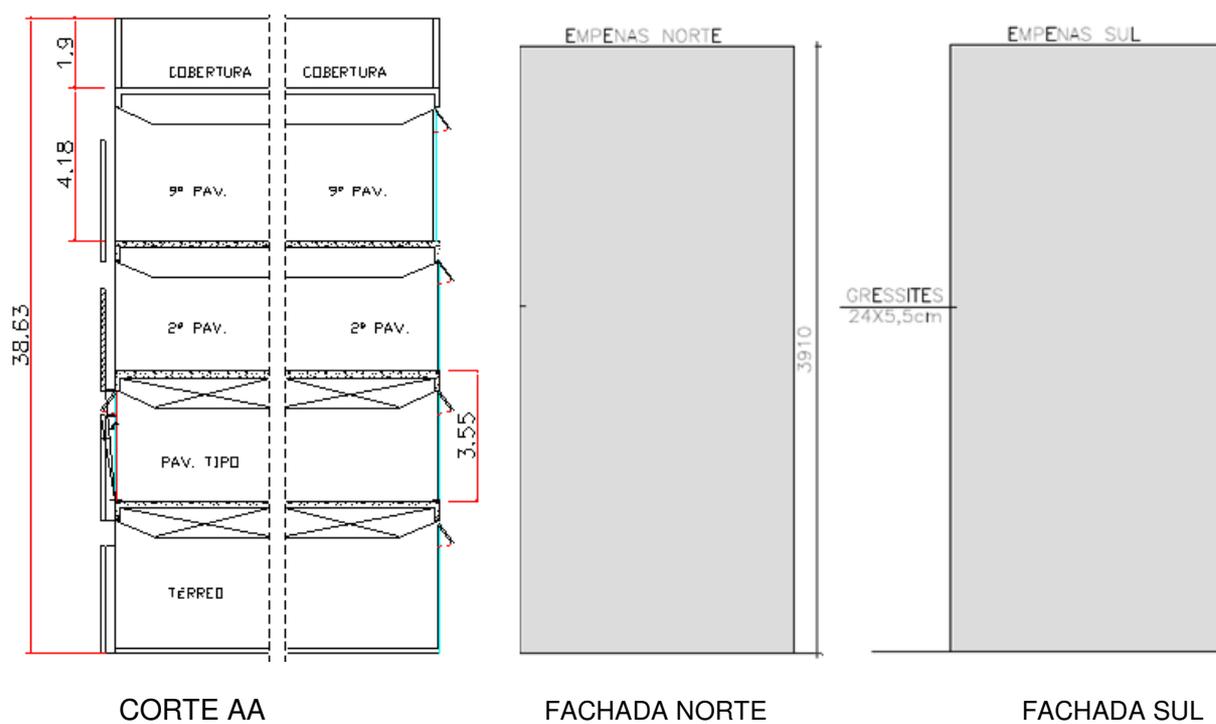
Dados Gerais	
Autor do projeto	
Ano de construção	
Informação sobre reformas/acréscimos	
Locação	
Presença de edifícios próximos	
Presença de árvores próximas	
Plantas de arquitetura	
Caracterização da edificação	
Orientação	
Forma/volume	
Pavimentos	
Materiais construtivos e de acabamento	
Detalhamento das esquadrias externas "in loco"	
Detalhamento do brises-soleil "in loco"	
Alterações nas fachadas: películas, papelão, etc	
Caracterização dos ambientes internos	
Modulação	
Quantidade de pessoas/m ²	
Modelo de mobiliário padrão	
Modelo de divisórias padrão	
Projeto de ambientação	
Rotina de ocupação	
Equipamentos de escritórios	
Tipos	
Quantidades	
Potência	
Rotina de uso	
Caracterização do sistema de iluminação artificial	
Modulação do sistema	
Tipo de luminária	
Tipo de lâmpadas e reatores	
Potência/m ²	
Iluminação de segurança	
Rotina de uso	
Caracterização do sistema de condicionamento de ar	
Sistema utilizado	
Locação	
Modelo	
Potência/ COP	
Rotina de uso	

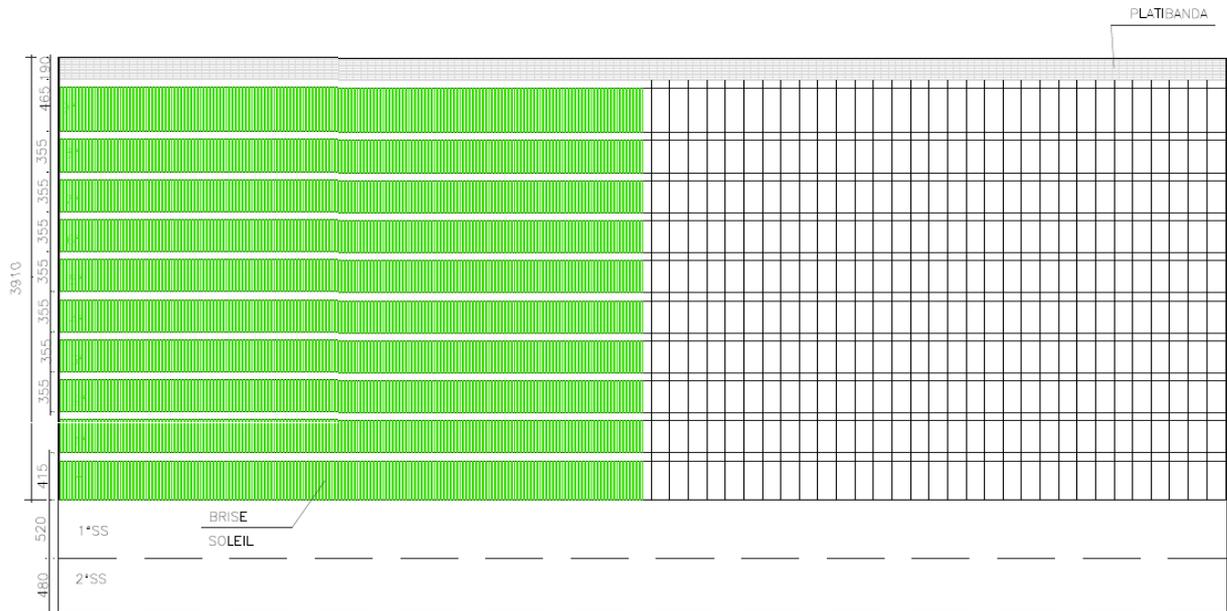
Anexo II

Plantas de arquitetura

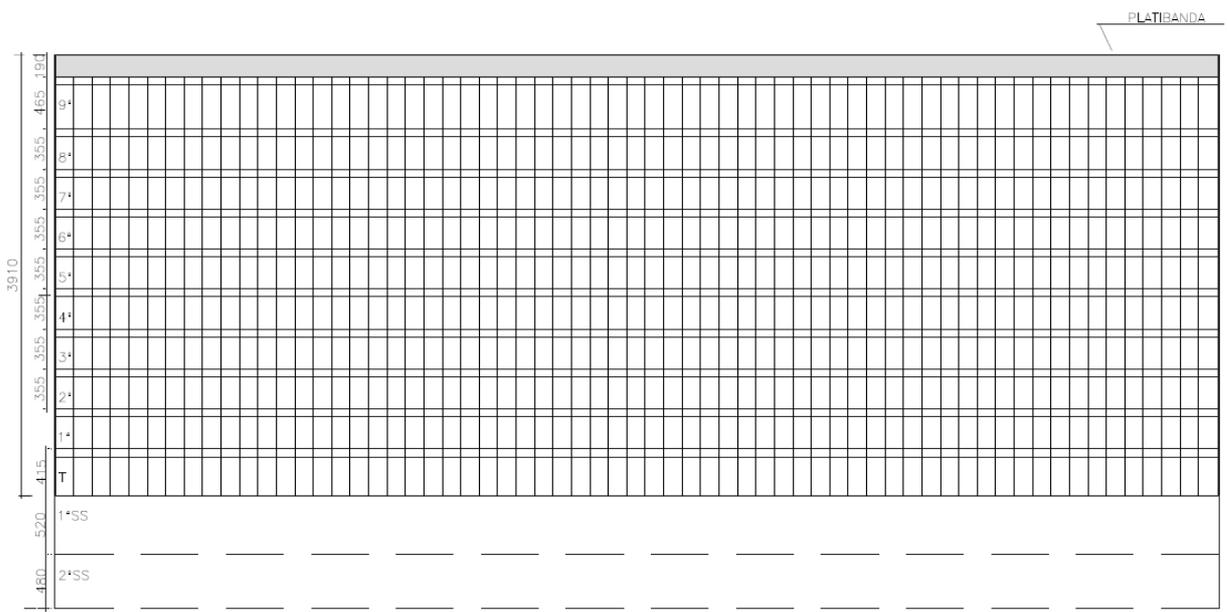


PLANTA BAIXA - PAVIMENTO TIPO





VISTA FRONTAL - FACHADA OESTE



VISTA FRONTAL - FACHADA LESTE

Anexo III

Resultados das simulações computacionais gerados pelo programa Designbuilder para o modelo calibrado e modelos propostos

Modelo Calibrado

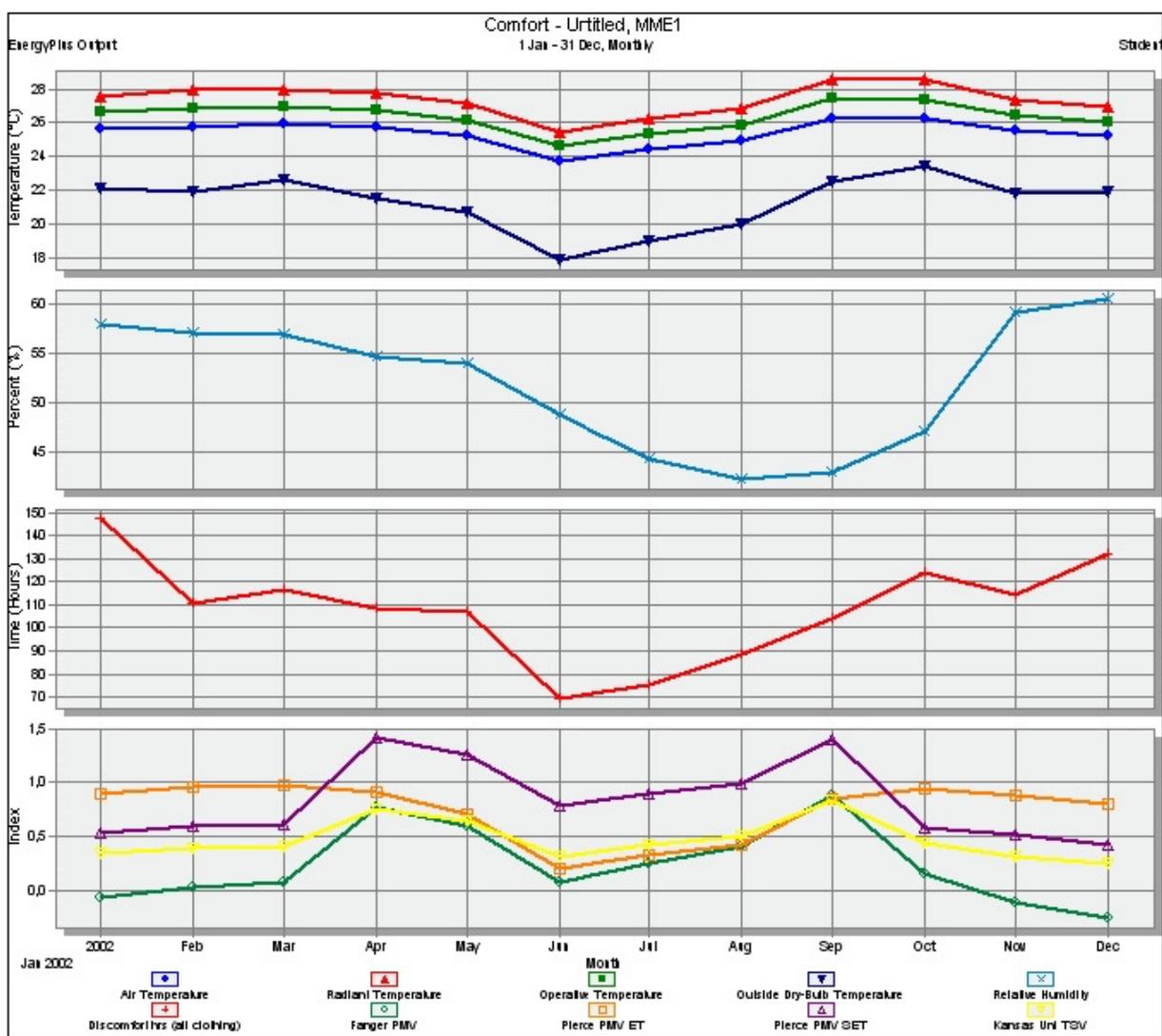


Figura 1- Análise de conforto térmico

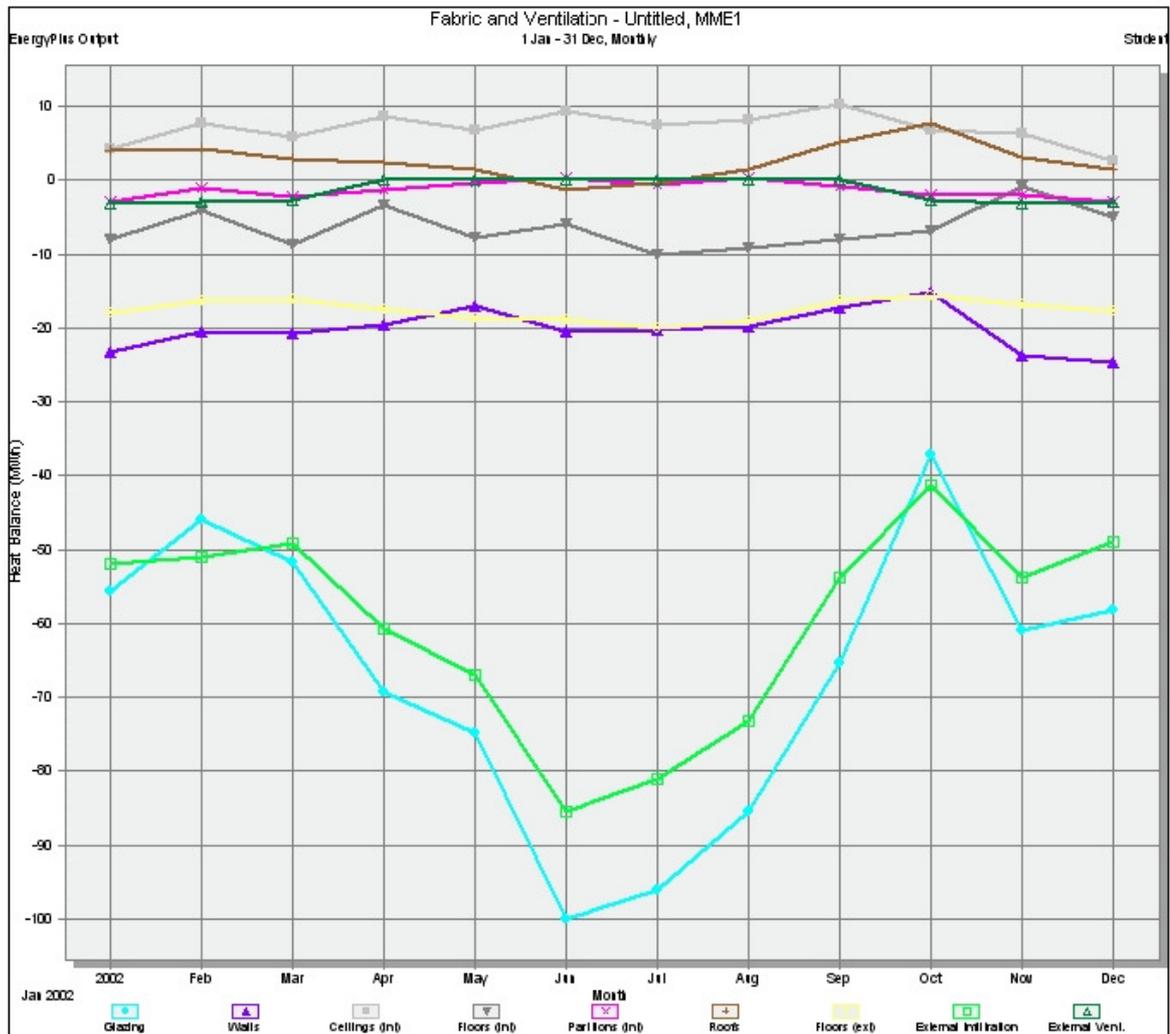


Figura 2- Ganhos e perdas térmicas

Date/Time	Room Electricity kWh	Lighting kWh	Chiller kWh
1/1/2008	23267,08	76364,81	93809,01
1/2/2008	20232,24	66404,19	88687,02
1/3/2008	21243,85	69724,4	93209,73
1/4/2008	22255,46	73044,6	86998,79
1/5/2008	23267,08	76364,81	82549,49
1/6/2008	20232,24	66404,19	53410,97
1/7/2008	23267,08	76364,81	65621,75
1/8/2008	22255,46	73044,6	70780,66
1/9/2008	21243,85	69724,4	90340,73
1/10/2008	23267,08	76364,81	106025,8
1/11/2008	21243,85	69724,4	82783,65
1/12/2008	22255,46	73044,6	82913,4

Figura 3- Consumo por uso final

Modelo Proposto I

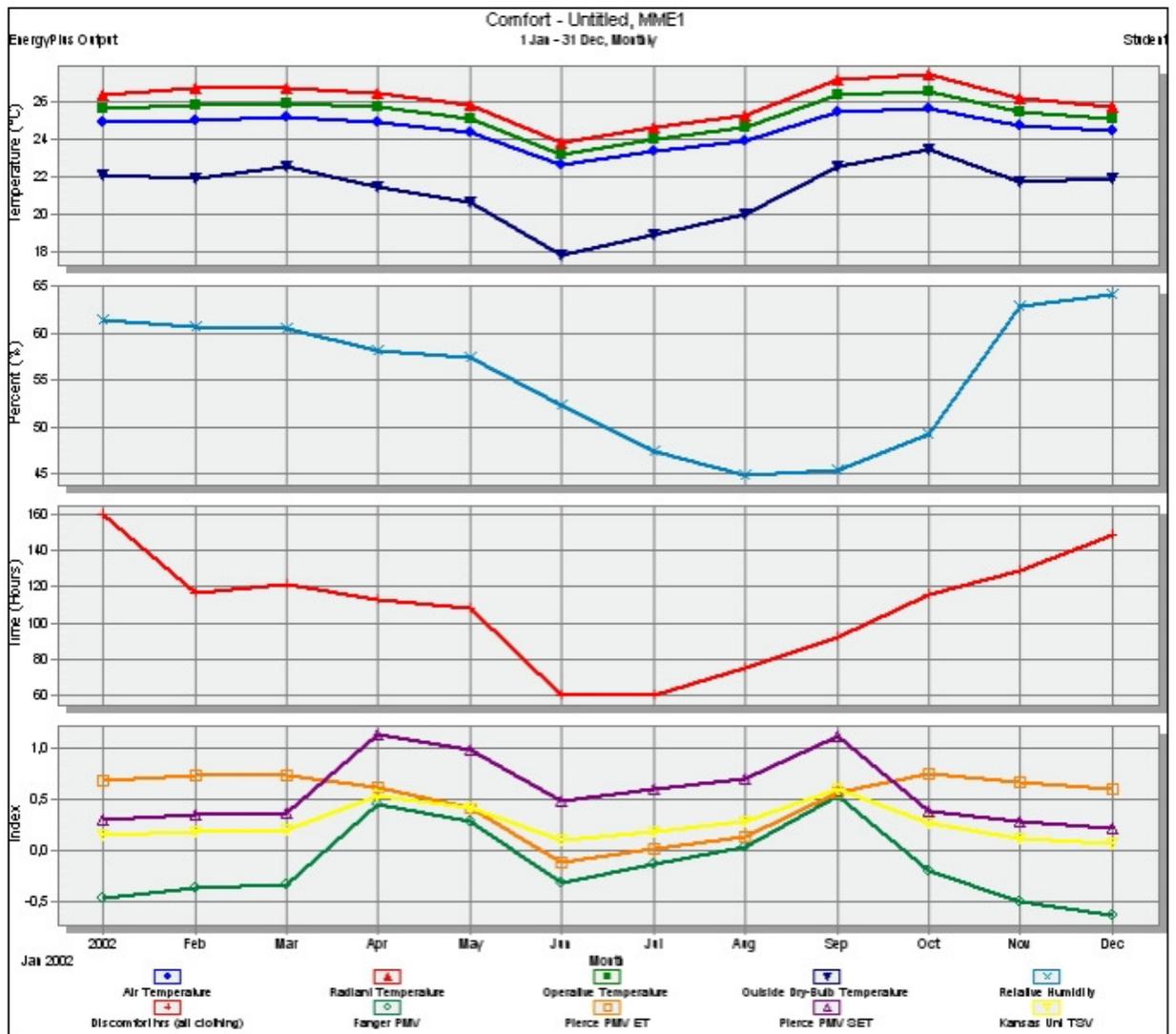


Figura 4- Análise de conforto térmico

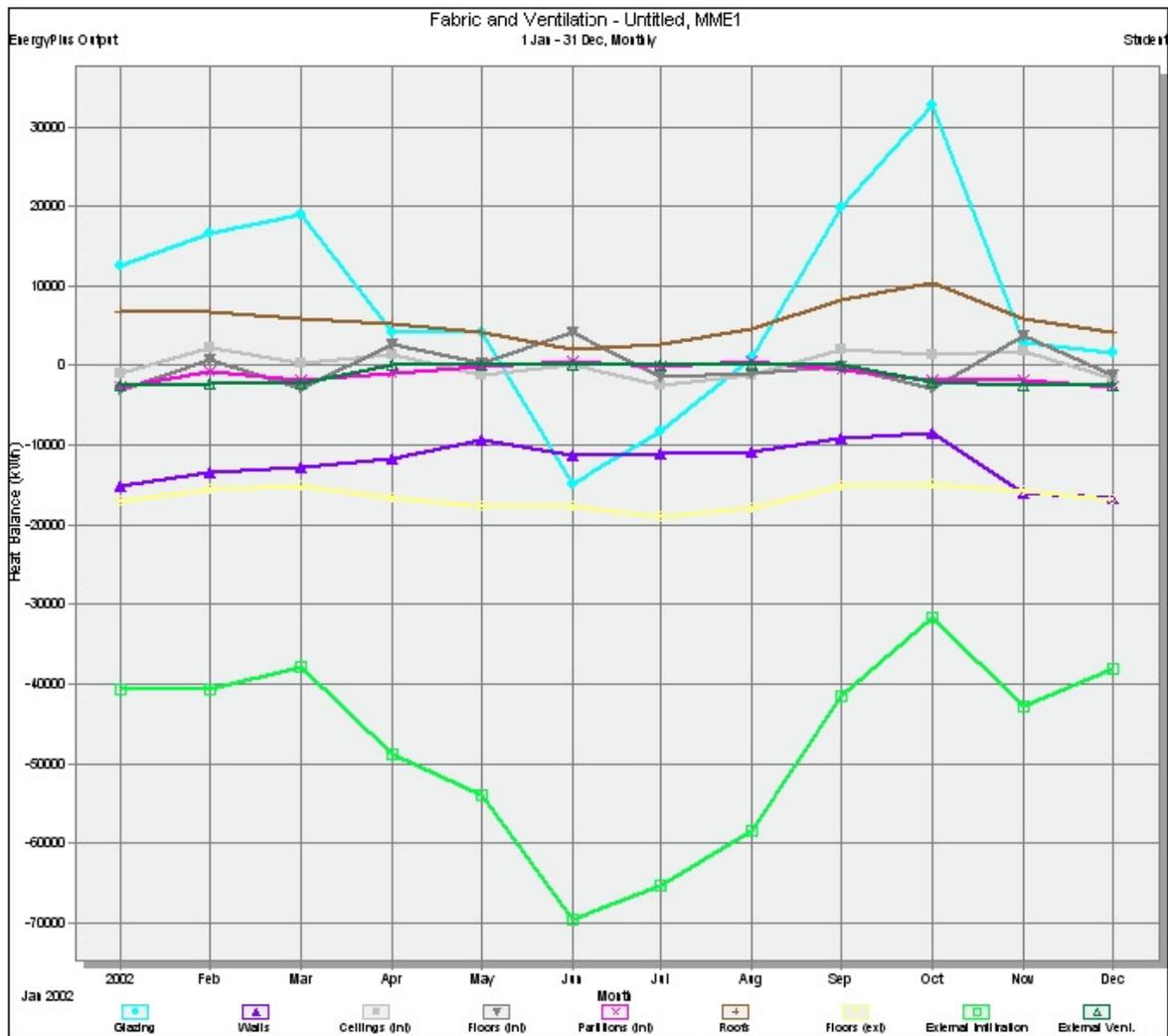


Figura 5- Ganhos e perdas térmicas

Date/Time	Room Electricity kWh	Lighting kWh	Chiller kWh	
1/1/2008	23267,08	76364,81	82101,2	181733,1
1/2/2008	20232,24	66404,19	77559,41	164195,8
1/3/2008	21243,85	69724,4	81072,42	172040,7
1/4/2008	22255,46	73044,6	76135	171435,1
1/5/2008	23267,08	76364,81	73544,66	173176,6
1/6/2008	20232,24	66404,19	46858,63	133495,1
1/7/2008	23267,08	76364,81	57616,77	157248,7
1/8/2008	22255,46	73044,6	61823,55	157123,6
1/9/2008	21243,85	69724,4	77885,8	168854,1
1/10/2008	23267,08	76364,81	94491,81	194123,7
1/11/2008	21243,85	69724,4	72885,33	163853,6
1/12/2008	22255,46	73044,6	73036,64	168336,7

Figura 6- Consumo por uso final

Modelo Proposto II

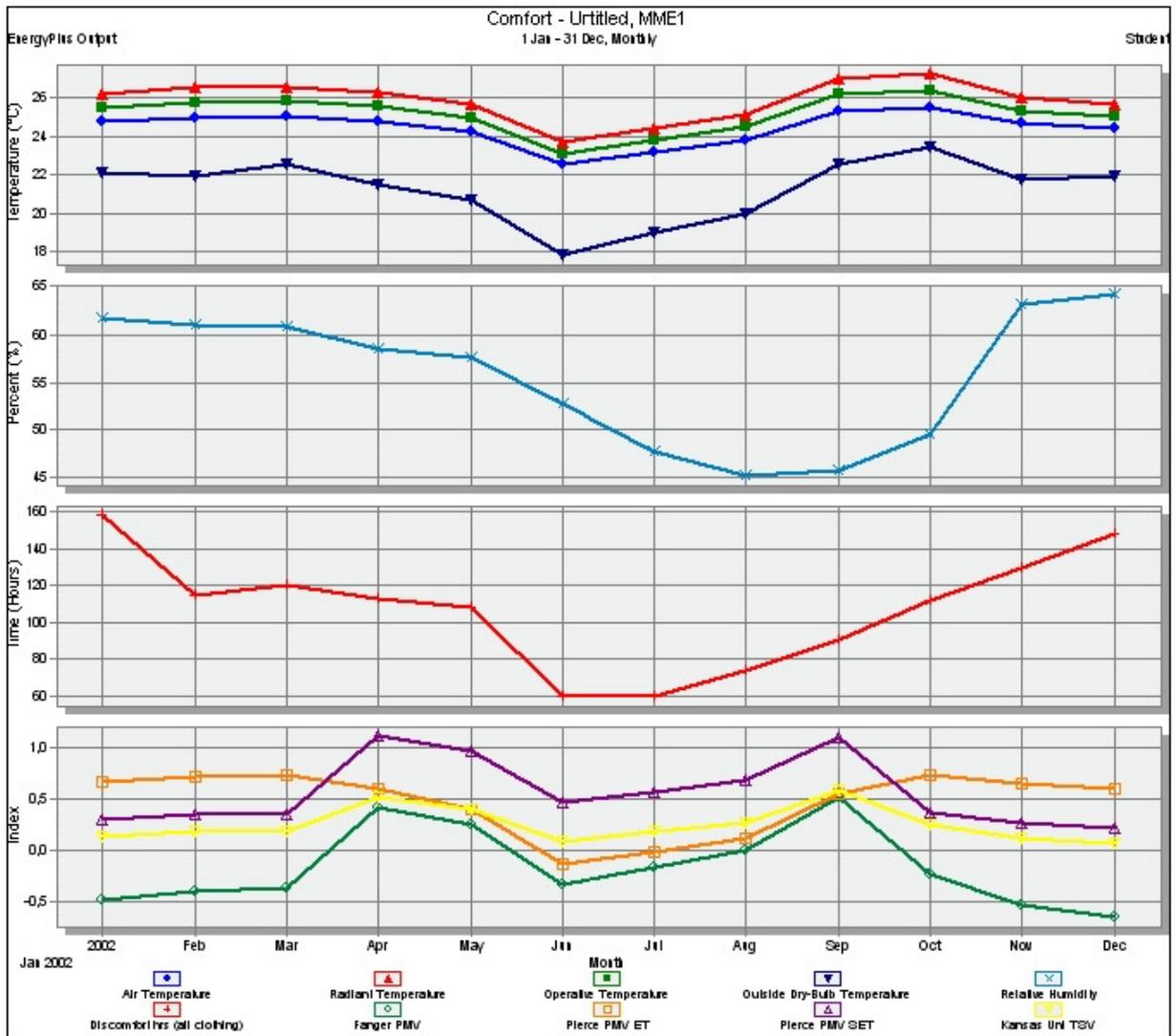


Figura 7- Análise de conforto térmico

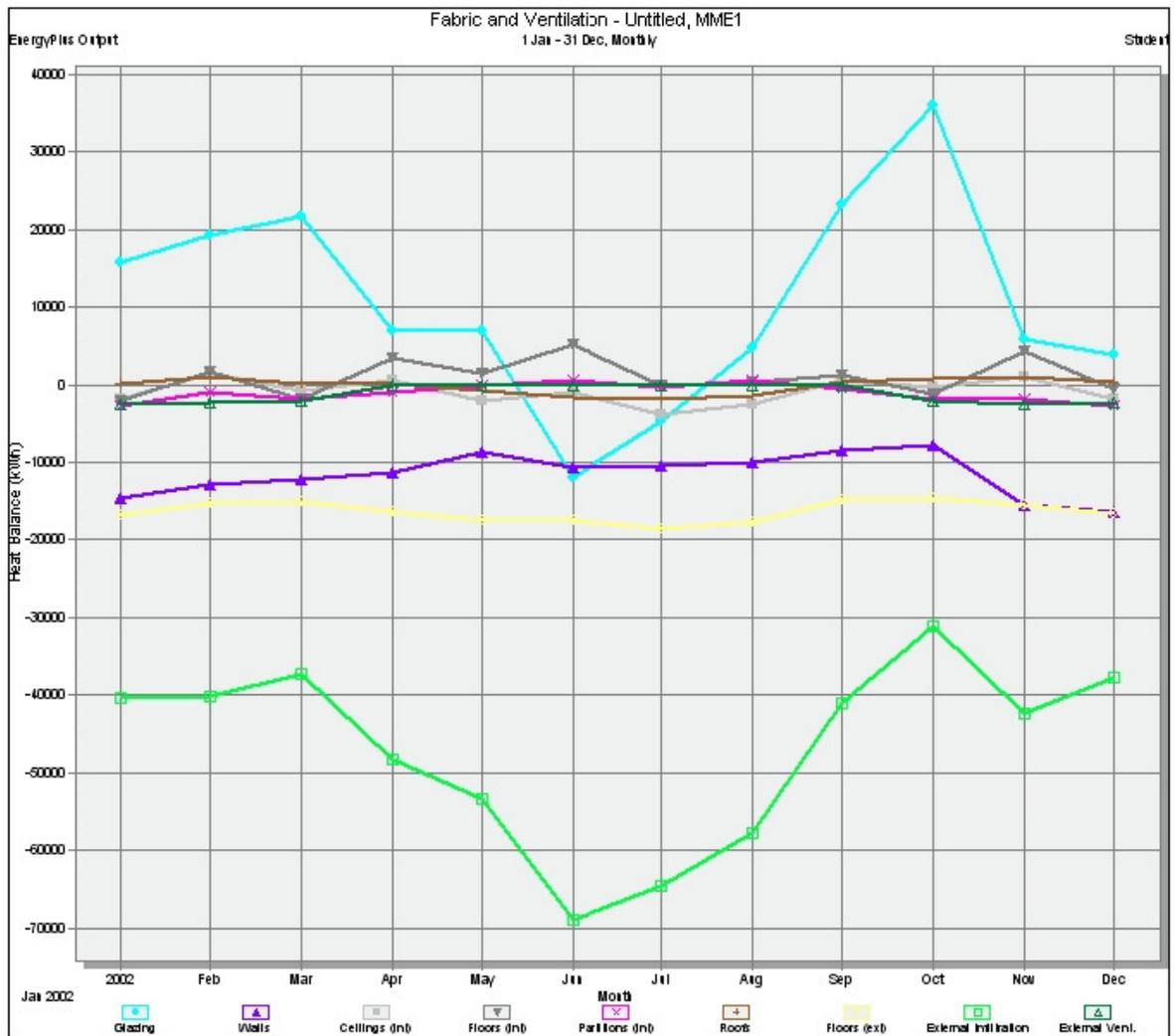


Figura 8- Ganhos e perdas térmicas

Date/Time	Room Electricity kWh	Lighting kWh	Chiller kWh
1/1/2008	23267,08	76364,81	80506,44
1/2/2008	20232,24	66404,19	76148,88
1/3/2008	21243,85	69724,4	79694,66
1/4/2008	22255,46	73044,6	74957,11
1/5/2008	23267,08	76364,81	72590,45
1/6/2008	20232,24	66404,19	46465,98
1/7/2008	23267,08	76364,81	57007,87
1/8/2008	22255,46	73044,6	60816,42
1/9/2008	21243,85	69724,4	75970,81
1/10/2008	23267,08	76364,81	92004,95
1/11/2008	21243,85	69724,4	71708,5
1/12/2008	22255,46	73044,6	72113,95

Figura 9- Consumo por uso final

Modelo Proposto III

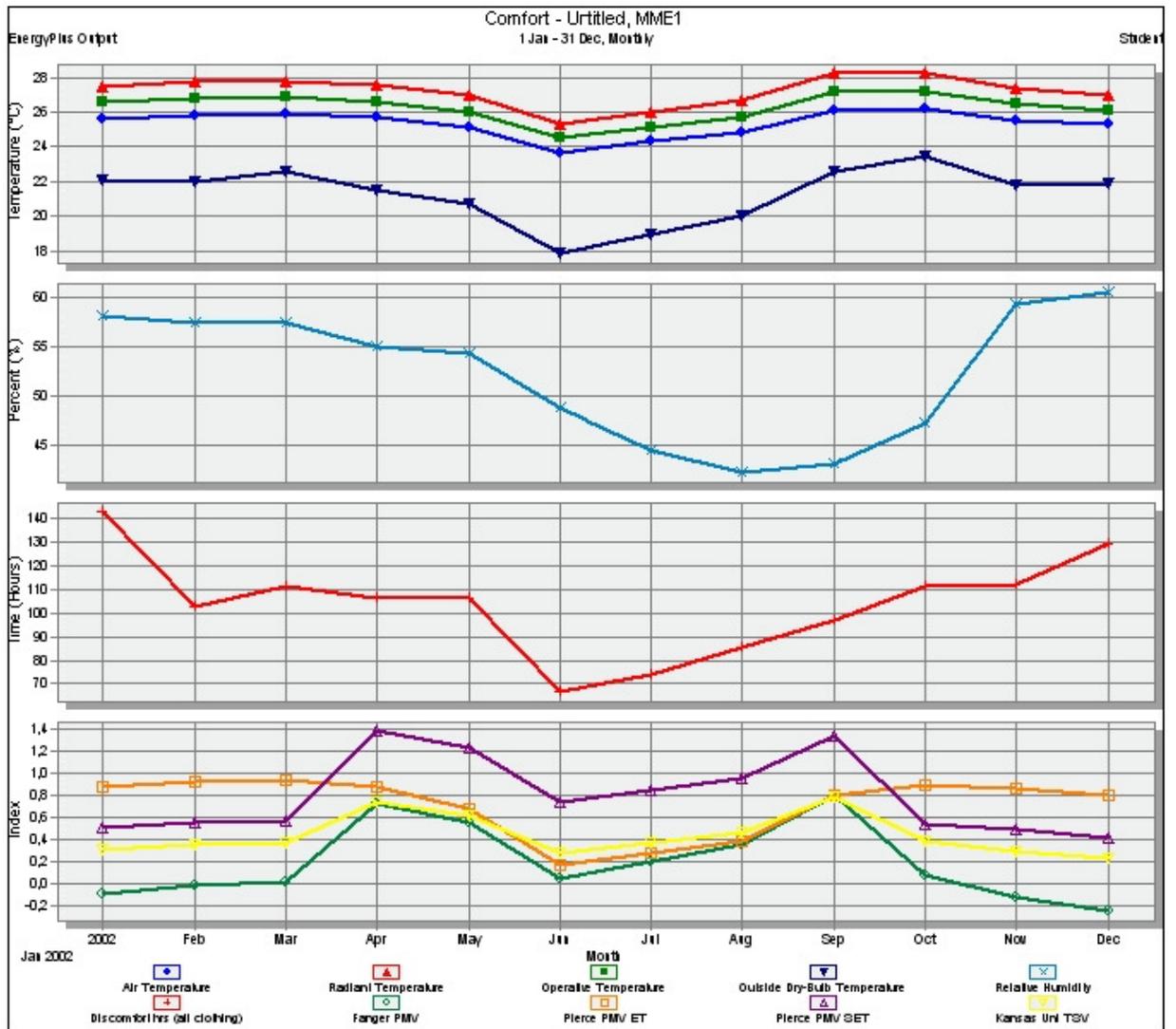


Figura 10- Análise de conforto térmico

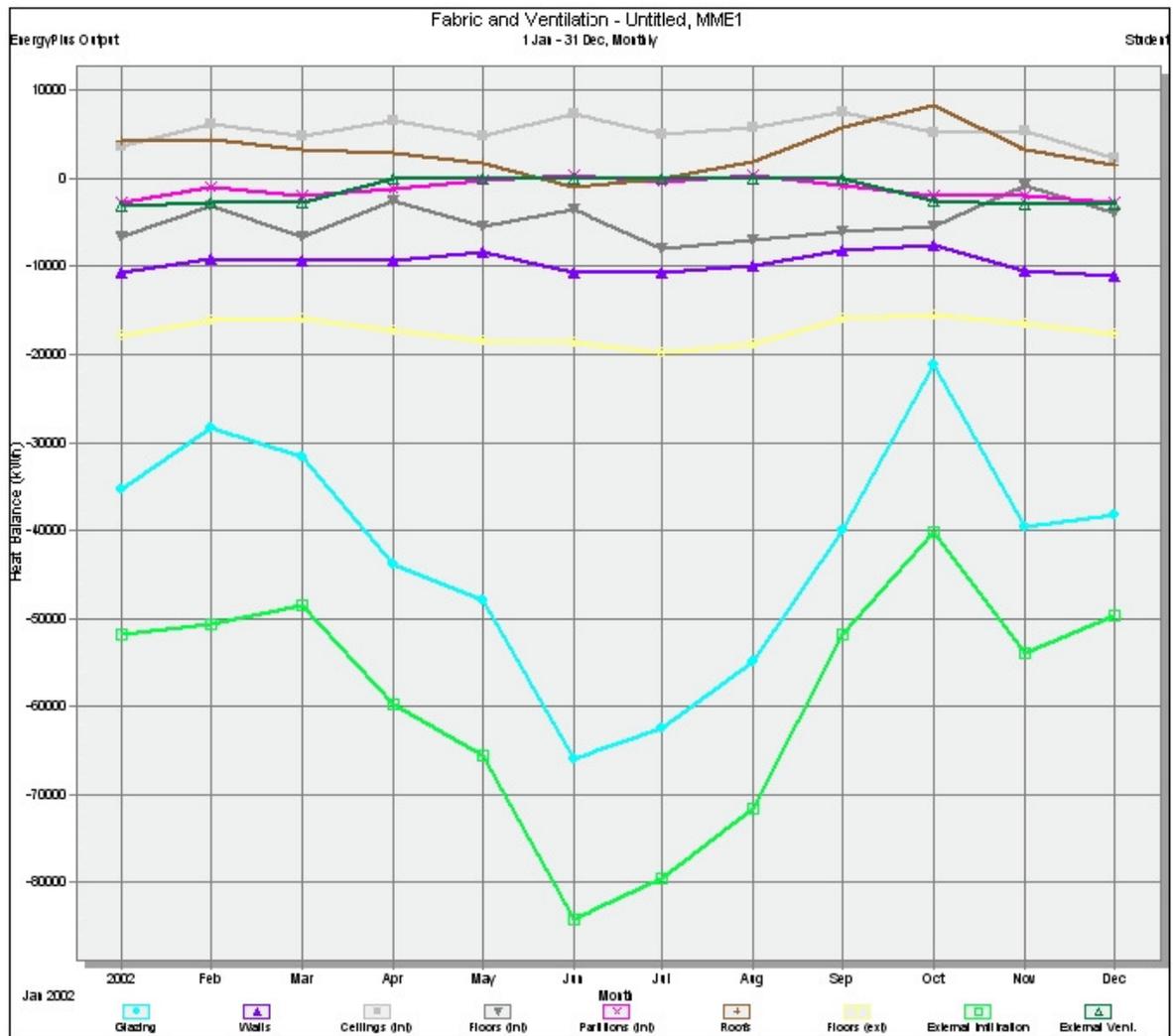


Figura 11- Ganhos e perdas térmicas

Date/Time	Room Electricity kWh	Lighting kWh	Chiller kWh
1/1/2008	23267,08	76364,81	88359,33
1/2/2008	20232,24	66404,19	82224,42
1/3/2008	21243,85	69724,4	86672,53
1/4/2008	22255,46	73044,6	81870,78
1/5/2008	23267,08	76364,81	78090,95
1/6/2008	20232,24	66404,19	51373,55
1/7/2008	23267,08	76364,81	62579,23
1/8/2008	22255,46	73044,6	66560,91
1/9/2008	21243,85	69724,4	83061,16
1/10/2008	23267,08	76364,81	97462,31
1/11/2008	21243,85	69724,4	78873,51
1/12/2008	22255,46	73044,6	79248,44

Figura 12- Consumo por uso final

Modelo Proposto IV

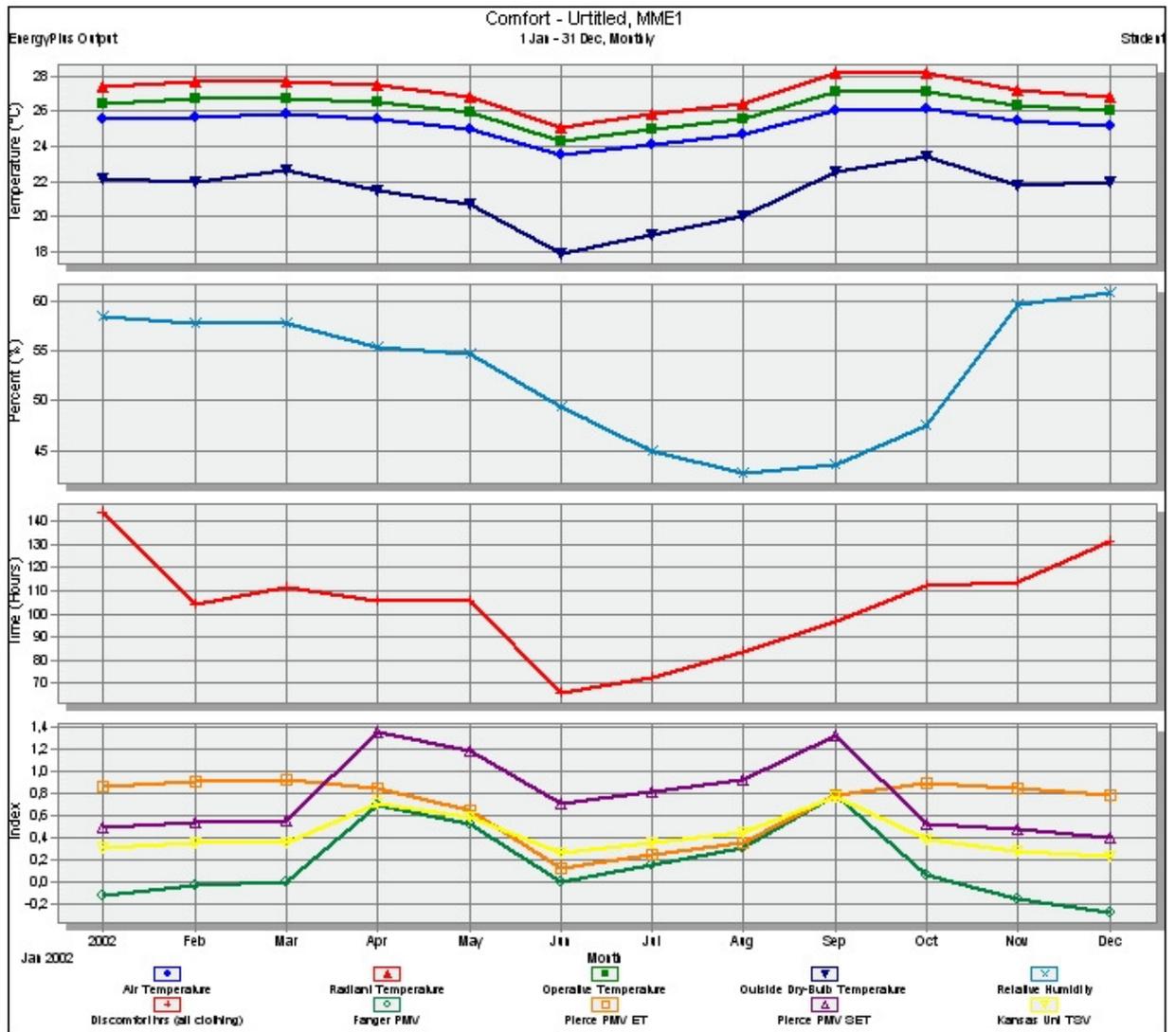


Figura 13- Análise de conforto térmico

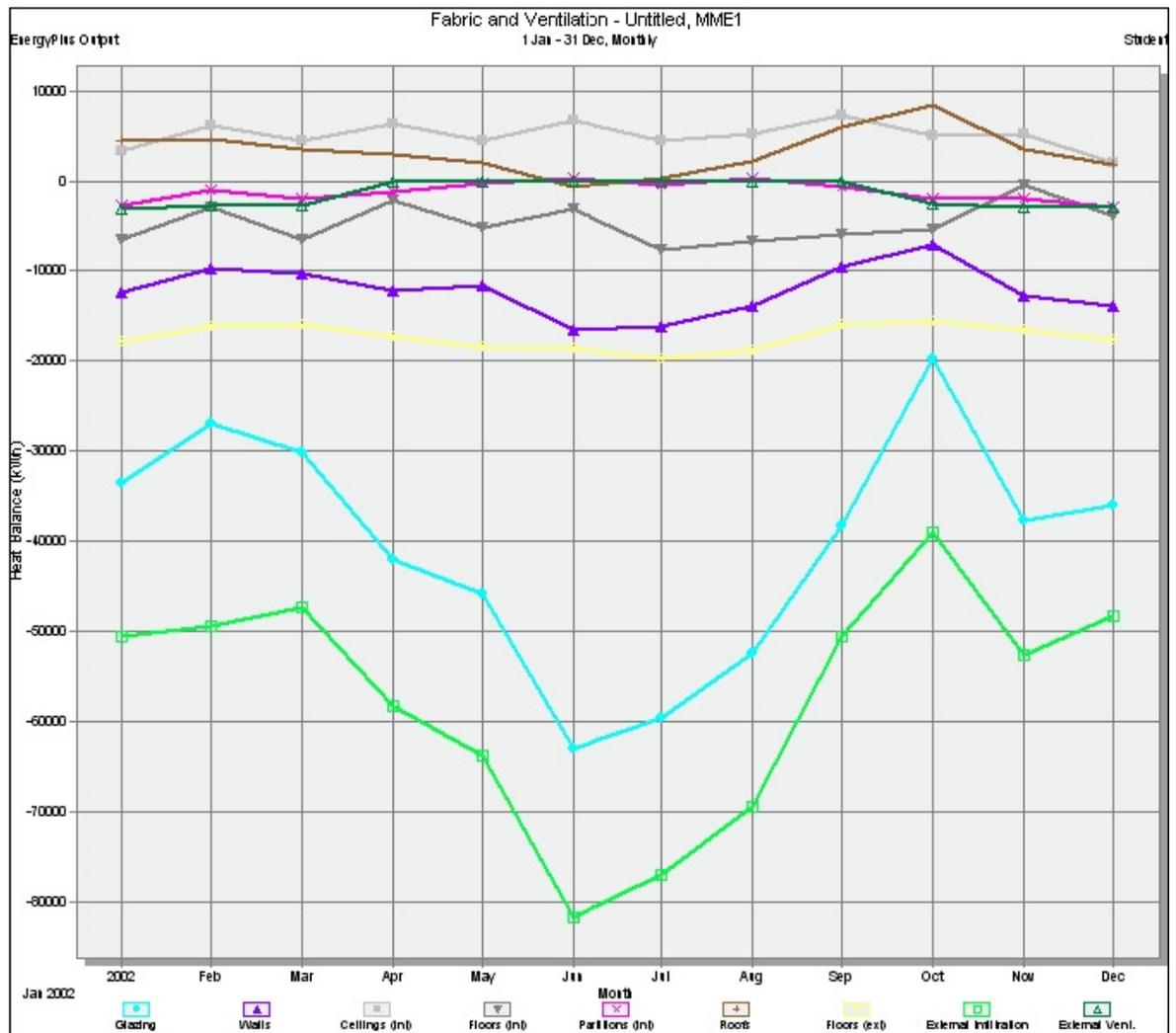


Figura 14- Ganhos e perdas térmicas

Date/Time	Room Electricity kWh	Lighting kWh	Chiller kWh
1/1/2008	23267,08	76364,81	88796,07
1/2/2008	20232,24	66404,19	83038,71
1/3/2008	21243,85	69724,4	87335,4
1/4/2008	22255,46	73044,6	82078,51
1/5/2008	23267,08	76364,81	78368,7
1/6/2008	20232,24	66404,19	51143,66
1/7/2008	23267,08	76364,81	62445,49
1/8/2008	22255,46	73044,6	66705,98
1/9/2008	21243,85	69724,4	83558,3
1/10/2008	23267,08	76364,81	98489,13
1/11/2008	21243,85	69724,4	79174,01
1/12/2008	22255,46	73044,6	79464,44

Figura 15- Consumo por uso final

Modelo Proposto V

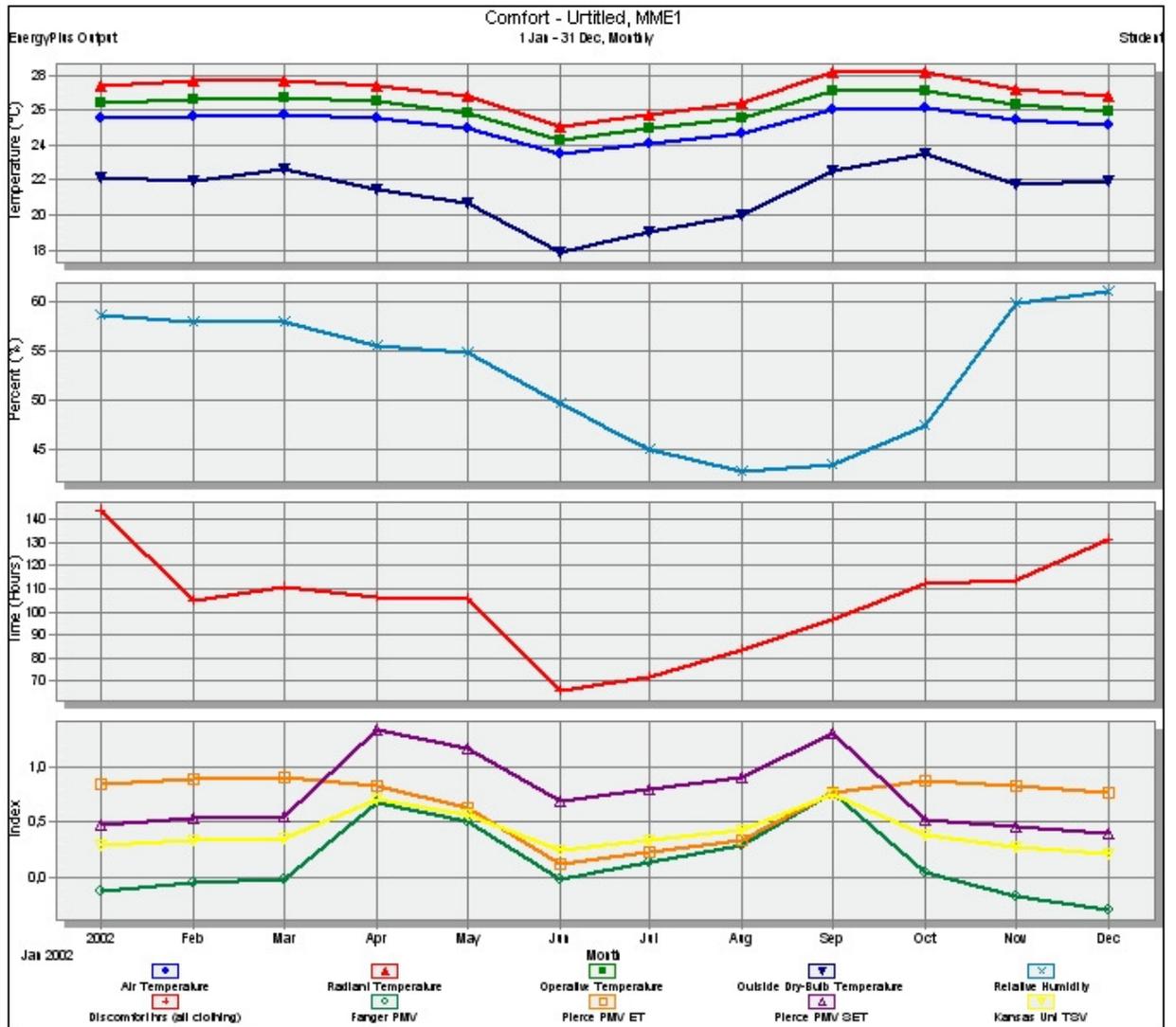


Figura 16- Análise de conforto térmico

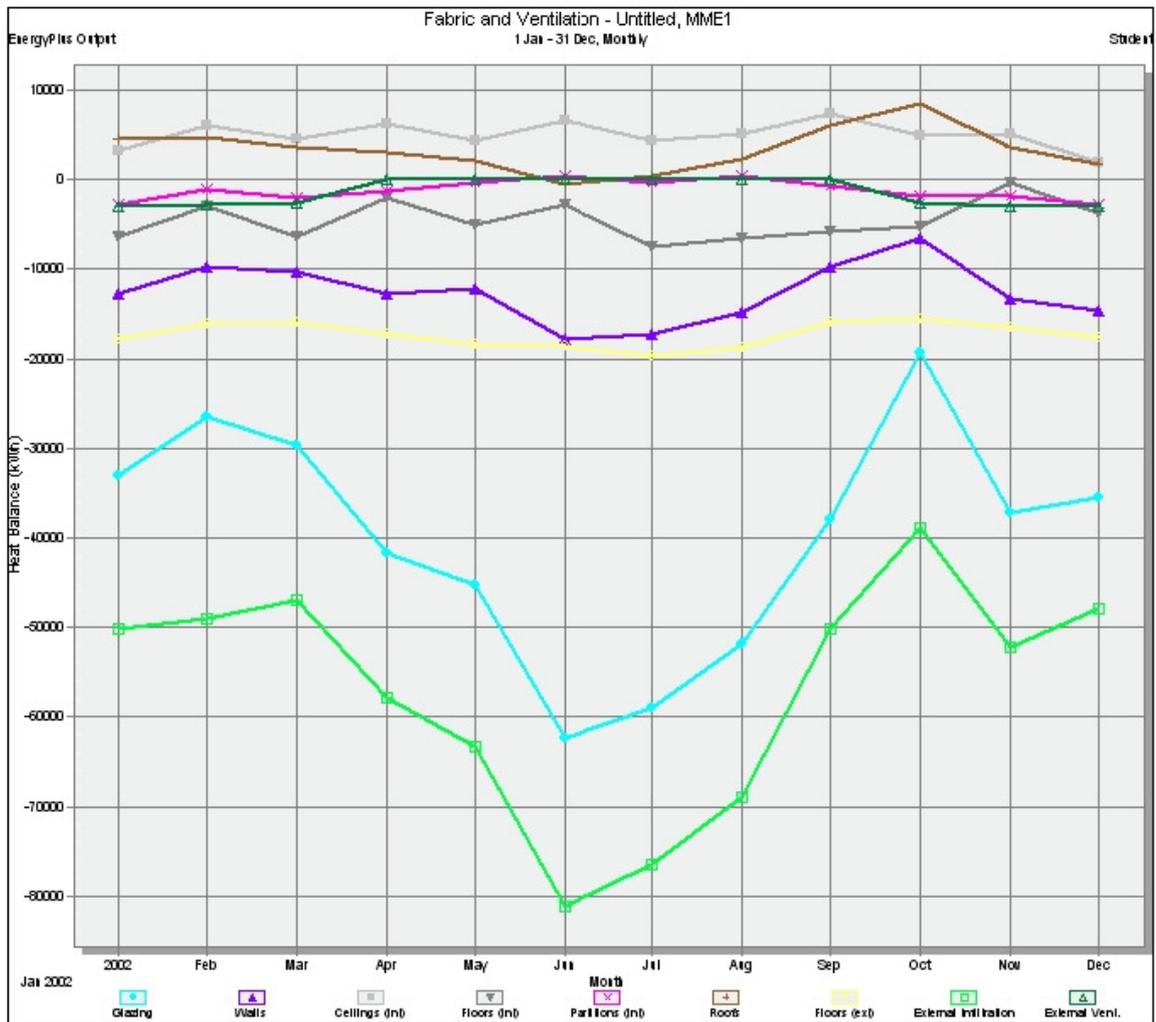


Figura 17- Ganhos e perdas térmicas

Date/Time	Room Electricity kWh	Lighting kWh	Chiller kWh
1/1/2008	23267,08	76364,81	88984,94
1/2/2008	20232,24	66404,19	83379,9
1/3/2008	21243,85	69724,4	87609,06
1/4/2008	22255,46	73044,6	82232,16
1/5/2008	23267,08	76364,81	78522,66
1/6/2008	20232,24	66404,19	51127,86
1/7/2008	23267,08	76364,81	62460,77
1/8/2008	22255,46	73044,6	66823,16
1/9/2008	21243,85	69724,4	83801,88
1/10/2008	23267,08	76364,81	98921,39
1/11/2008	21243,85	69724,4	79312,59
1/12/2008	22255,46	73044,6	79579,48

Figura 18- Consumo por uso final

Modelo Proposto VI

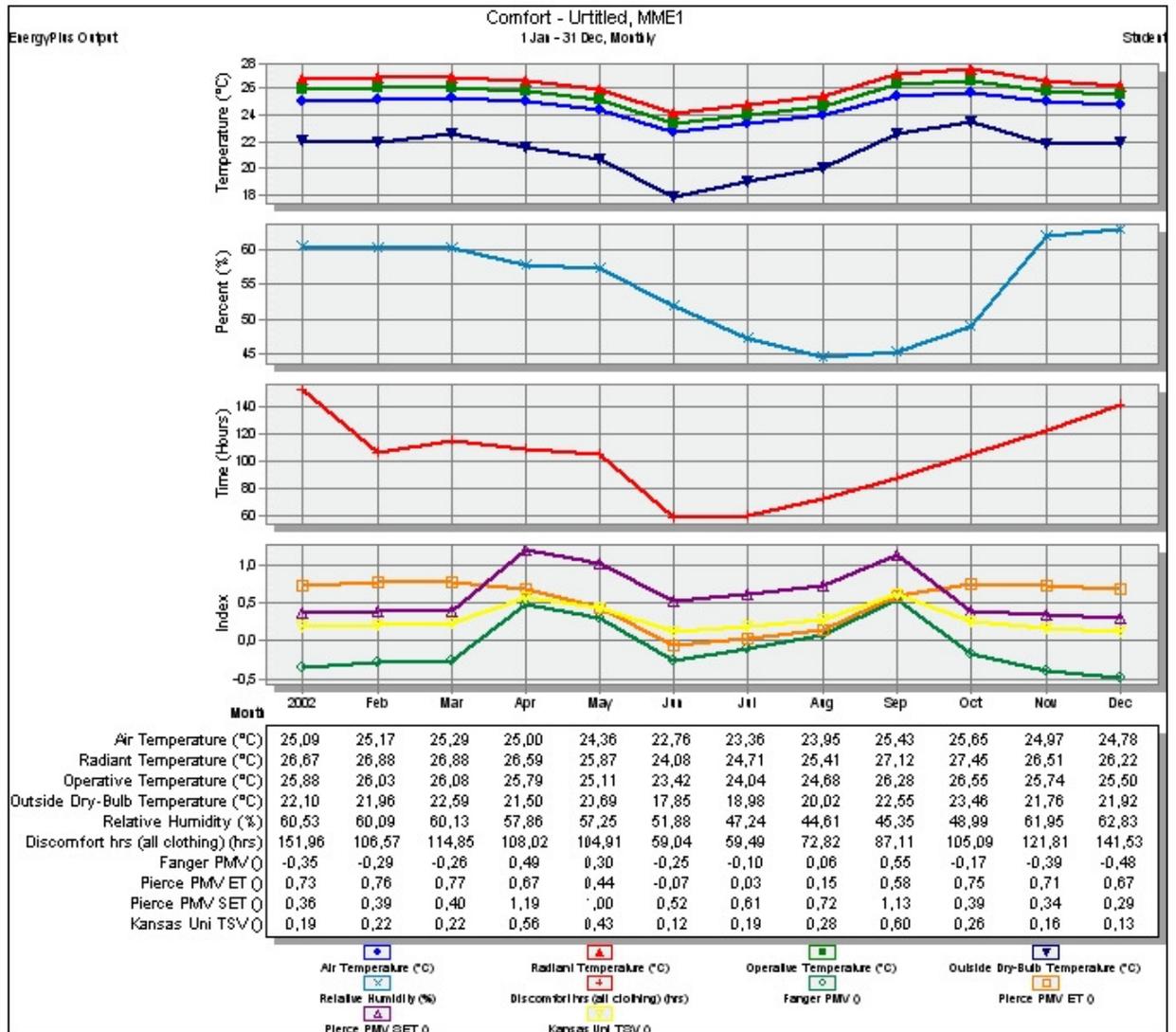


Figura 19- Análise de conforto térmico

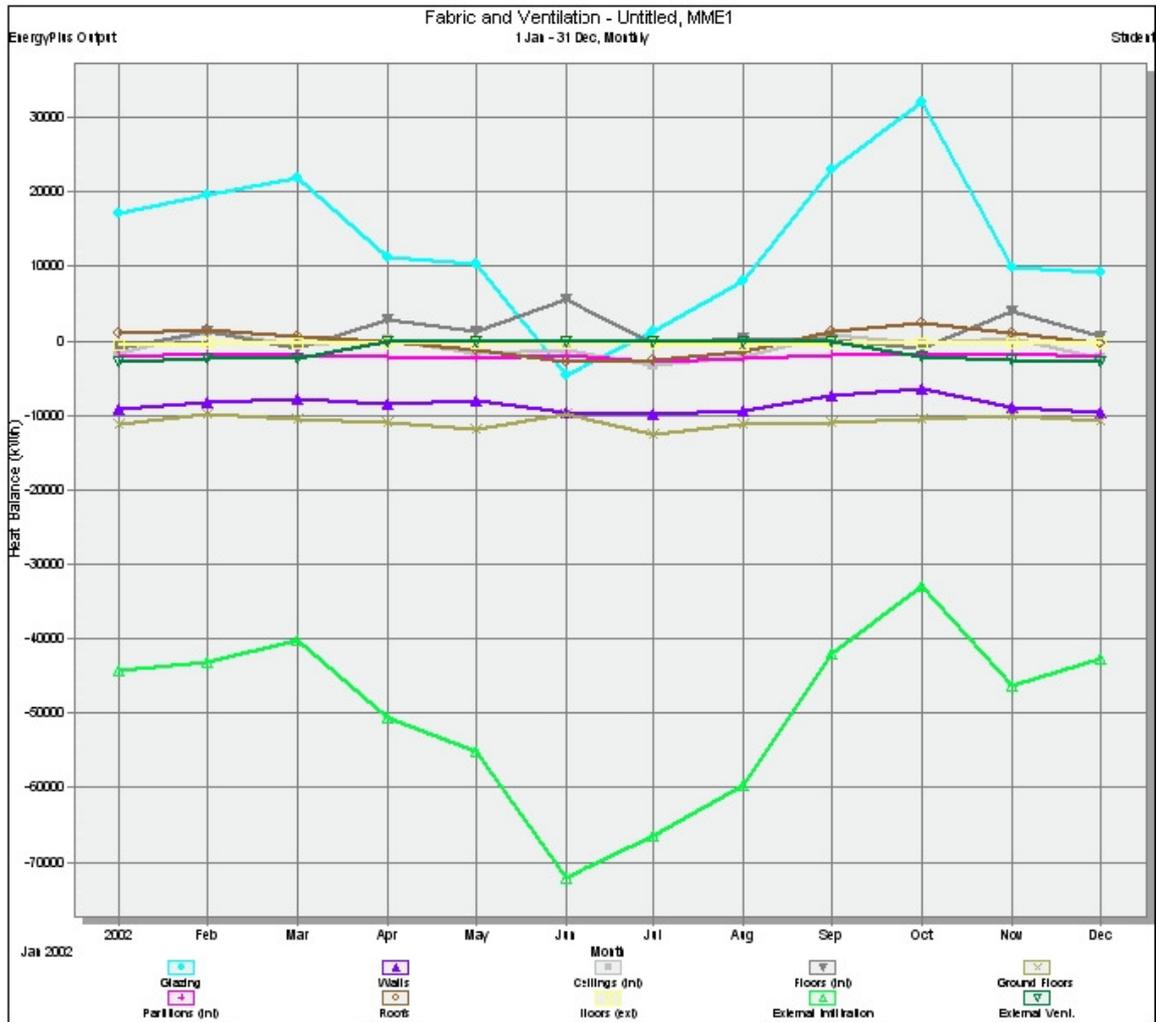


Figura 20- Ganhos e perdas térmicas

Date/Time	Room Electricity kWh	Lighting kWh	Chiller kWh
1/1/2008	23267,08	76364,81	81586,2
1/2/2008	20232,24	66404,19	75410,07
1/3/2008	21243,85	69724,4	79099,05
1/4/2008	22255,46	73044,6	74751,6
1/5/2008	23267,08	76364,81	71506,55
1/6/2008	20232,24	66404,19	47046,1
1/7/2008	23267,08	76364,81	56822,34
1/8/2008	22255,46	73044,6	60156,32
1/9/2008	21243,85	69724,4	73741,98
1/10/2008	23267,08	76364,81	89481,23
1/11/2008	21243,85	69724,4	72942,59
1/12/2008	22255,46	73044,6	74127,69

Figura 21- Consumo por uso final

Modelo Proposto VII

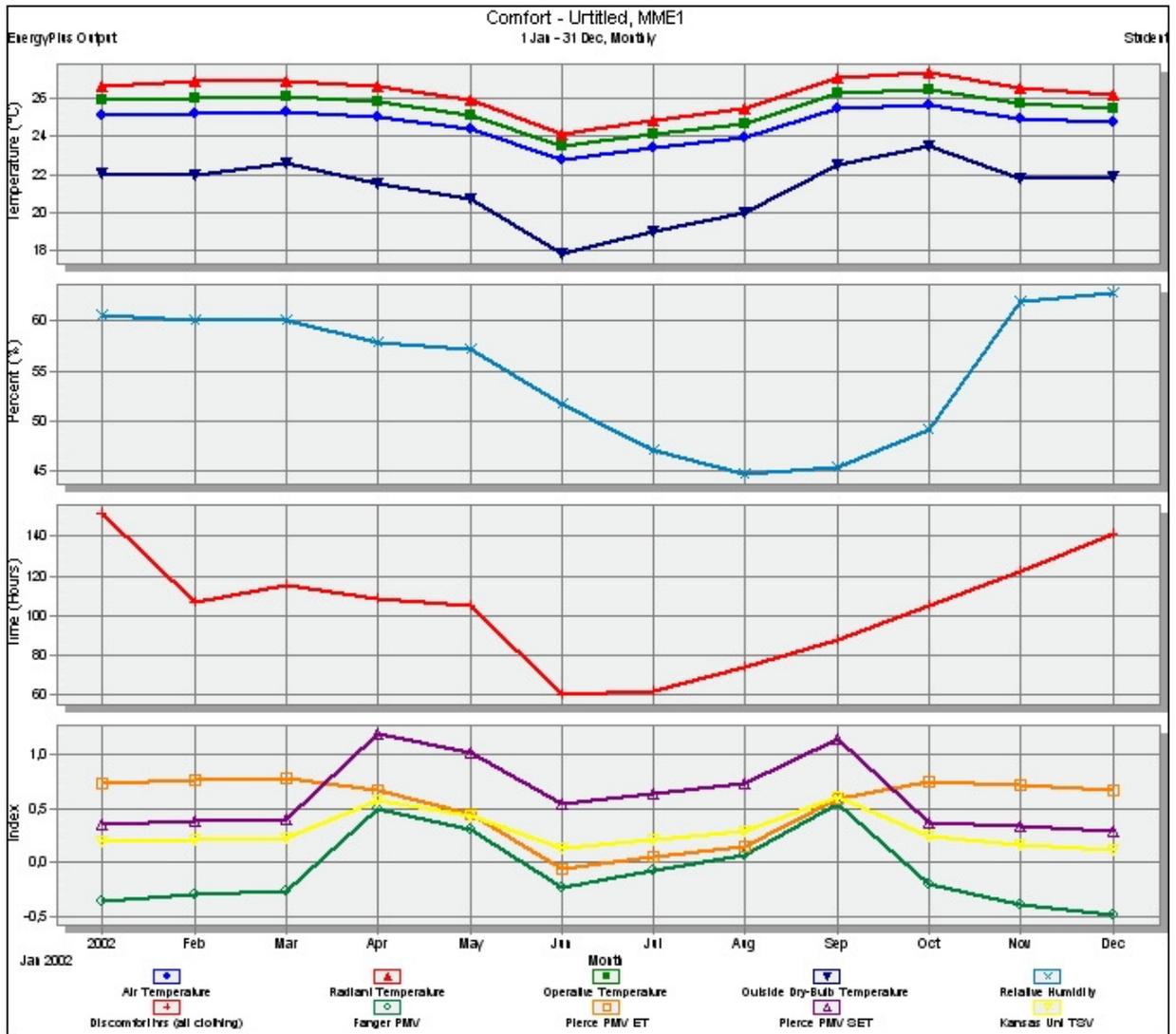


Figura 22- Análise de conforto térmico

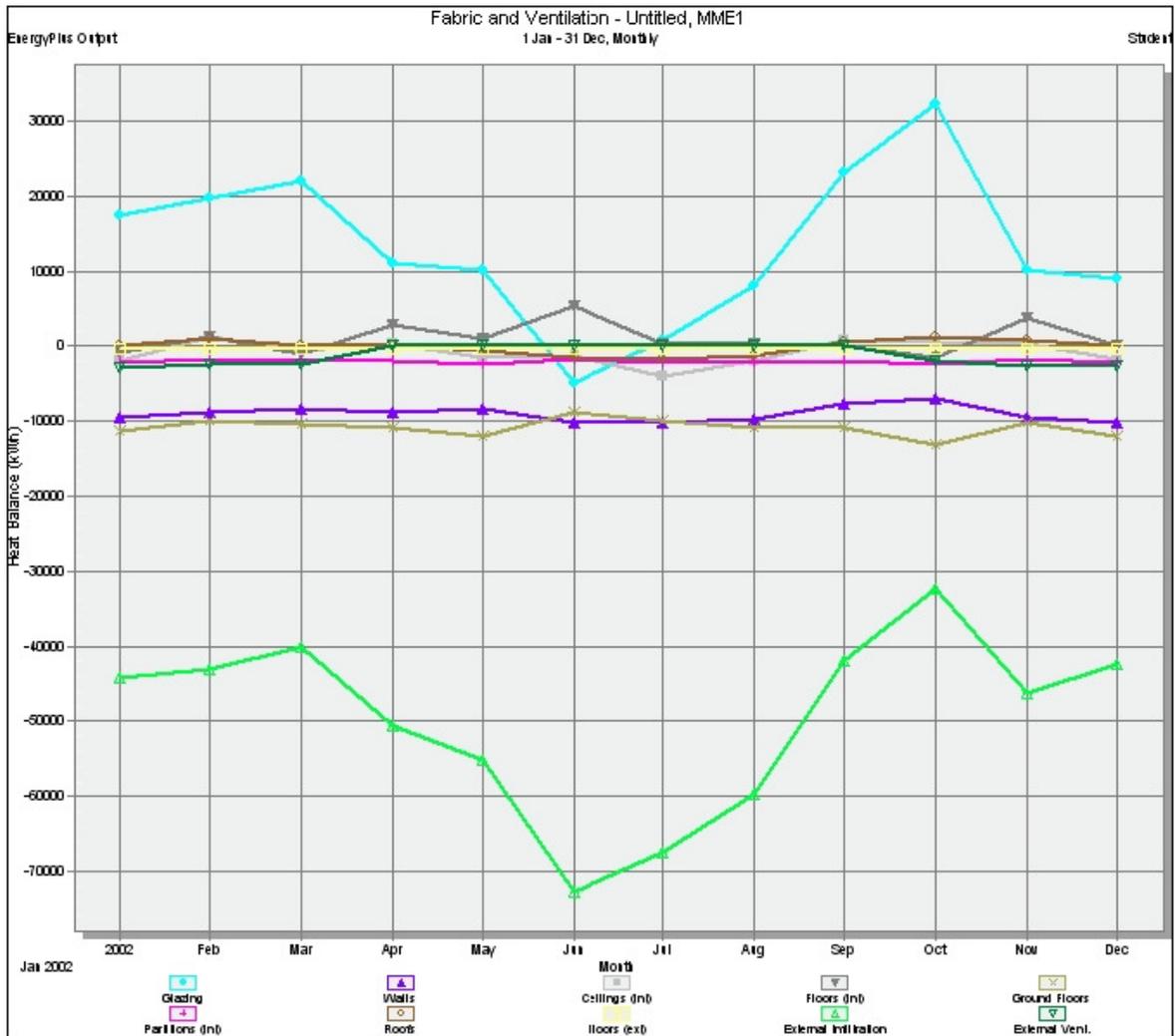


Figura 23- Ganhos e perdas térmicas

Date/Time	Room Electricity kWh	Lighting kWh	Chiller kWh
1/1/2008	23267,08	76364,81	81237,02
1/2/2008	20232,24	66404,19	75125,11
1/3/2008	21243,85	69724,4	78903,23
1/4/2008	22255,46	73044,6	74673,09
1/5/2008	23267,08	76364,81	71533,78
1/6/2008	20232,24	66404,19	47479,87
1/7/2008	23267,08	76364,81	57678,38
1/8/2008	22255,46	73044,6	60187,52
1/9/2008	21243,85	69724,4	73475,93
1/10/2008	23267,08	76364,81	88003,65
1/11/2008	21243,85	69724,4	72658,24
1/12/2008	22255,46	73044,6	73581,68

Figura 24- Consumo por uso final

Modelo Proposto VIII

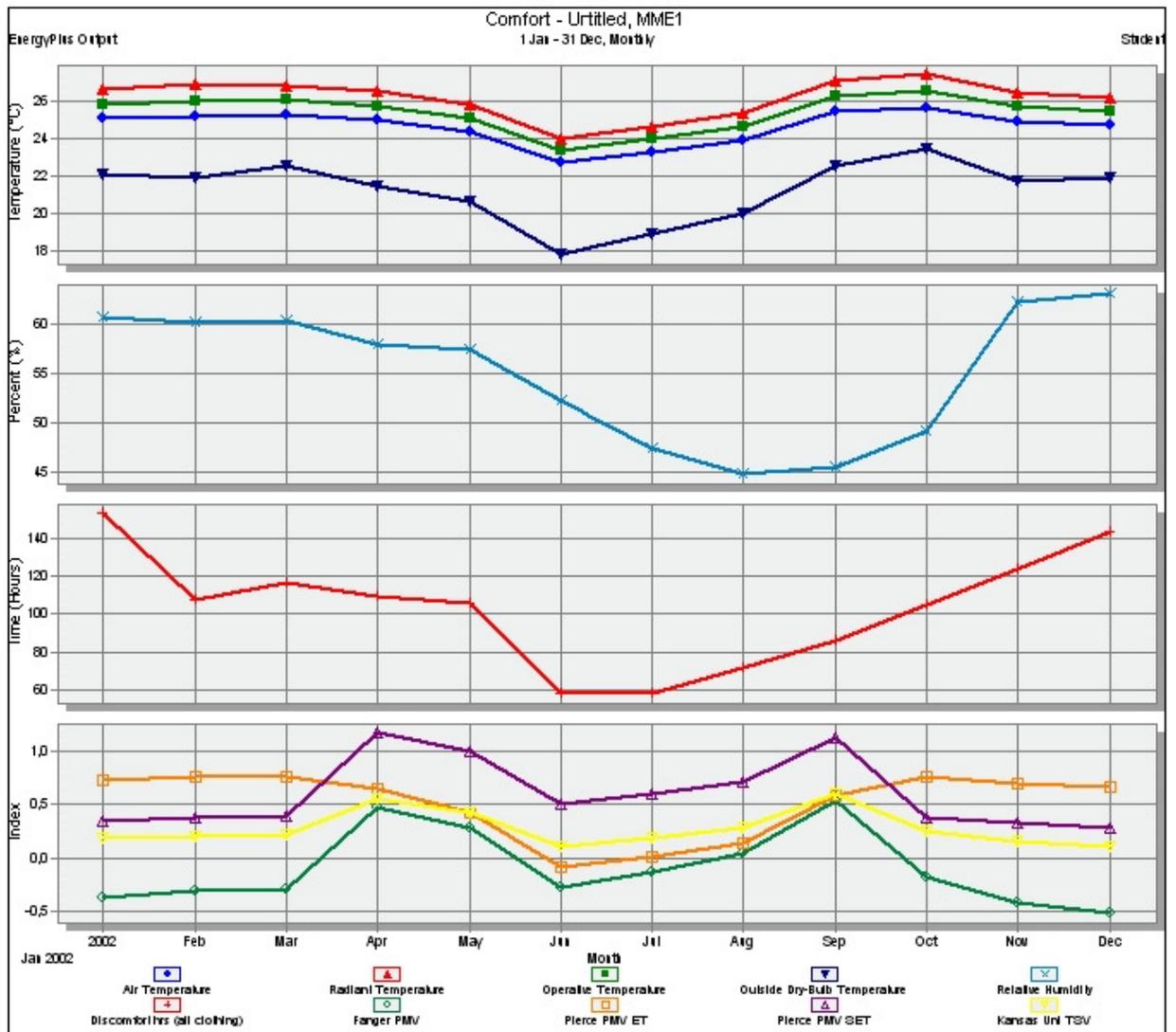


Figura 25- Análise de conforto térmico

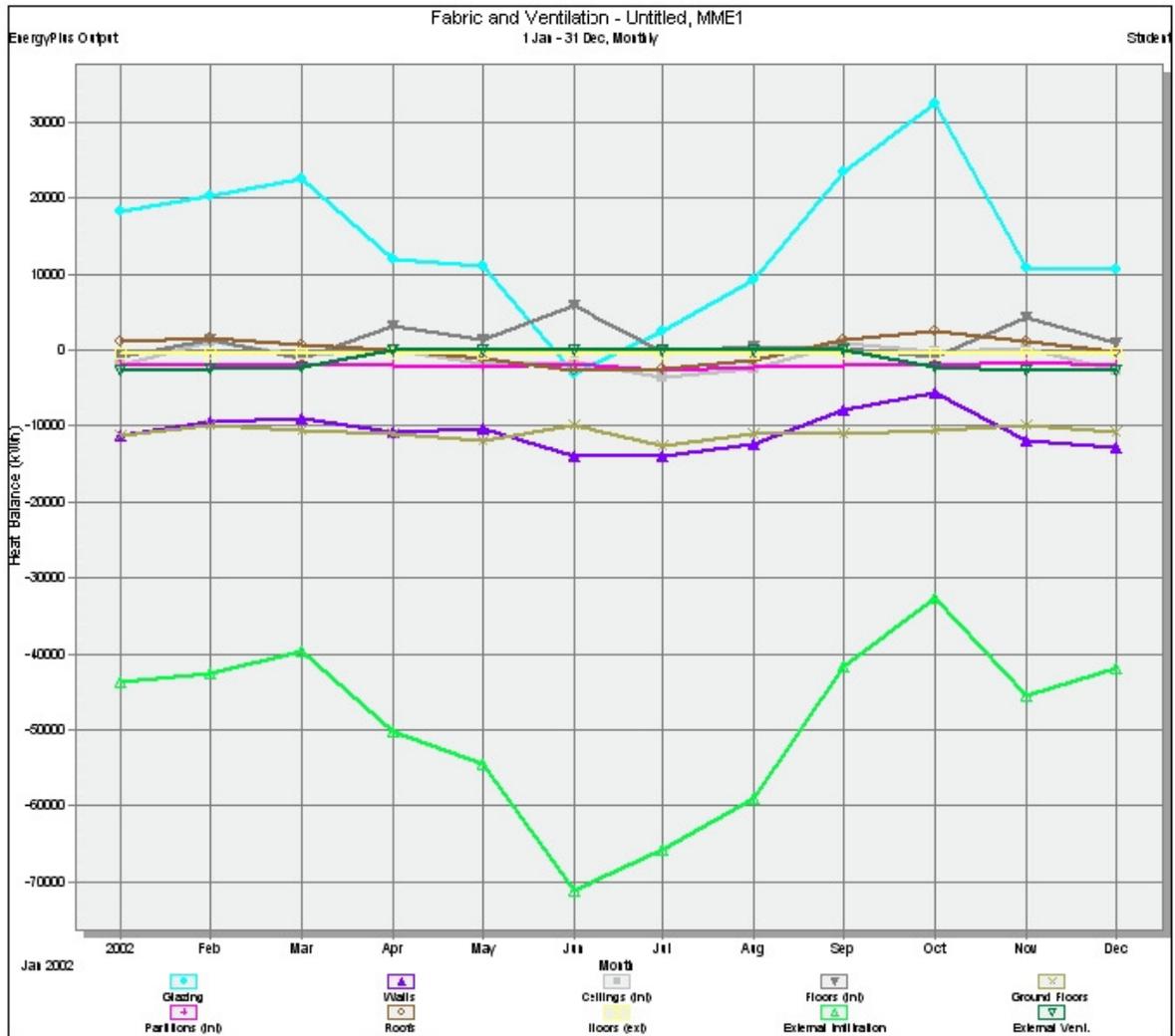


Figura 26- Ganhos e perdas térmicas

Date/Time	Room Electricity kWh	Lighting kWh	Chiller kWh
1/1/2008	23267,08	76364,81	81331,09
1/2/2008	20232,24	66404,19	75448,94
1/3/2008	21243,85	69724,4	79027,66
1/4/2008	22255,46	73044,6	74377,94
1/5/2008	23267,08	76364,81	71107,91
1/6/2008	20232,24	66404,19	46294,16
1/7/2008	23267,08	76364,81	56024,46
1/8/2008	22255,46	73044,6	59597,57
1/9/2008	21243,85	69724,4	73767,31
1/10/2008	23267,08	76364,81	89991,52
1/11/2008	21243,85	69724,4	72561
1/12/2008	22255,46	73044,6	73609,32

Figura 27- Consumo por uso final

Modelo Proposto IX

Tabela 1 - Análise de conforto térmico

Date/Time	Relative Hum %	Fanger PMV	Pierce PM	Pierce PM	Kansas Ur	Air Tempel °C	Radiant Te °C	Operative Tempe °C	Discomfort h hrs	Outside Dry °C
1/1/2008	55,62601	0,1624189	1,014843	0,657366	0,446164	26,14126	28,30139	27,22133	120,1019	22,10363
1/2/2008	55,26033	0,2222247	1,060941	0,705346	0,48478	26,22763	28,52312	27,37537	103,863	21,95565
1/3/2008	55,34608	0,2307458	1,062682	0,70743	0,488475	26,30956	28,46796	27,38876	105,0966	22,58858
1/4/2008	53,25586	0,8586817	0,998405	1,500329	0,840464	26,09241	28,21069	27,15155	103,5886	21,49931
1/5/2008	52,72781	0,680528	0,787445	1,329947	0,703607	25,51714	27,49463	26,50588	104,1894	20,68696
1/6/2008	46,84494	0,2382601	0,327686	0,892321	0,38849	24,28424	26,14167	25,21295	70,5956	17,84819
1/7/2008	43,0372	0,3603225	0,410729	0,969502	0,471219	24,78115	26,68026	25,73071	80,34628	18,98427
1/8/2008	40,85173	0,5111103	0,525008	1,076833	0,579643	25,29766	27,31907	26,30836	88,64113	20,02083
1/9/2008	42,25106	0,8962228	0,880836	1,414207	0,863149	26,43448	28,67847	27,55648	96,2878	22,55111
1/10/2008	45,90629	0,2523649	0,991019	0,636122	0,484556	26,51064	28,82576	27,6682	111,8378	23,45511
1/11/2008	56,99058	0,119677	1,000013	0,641487	0,424535	26,05217	28,11269	27,08243	103,3949	21,75833
1/12/2008	57,3933	7,28E-02	0,97223	0,611933	0,400524	25,95057	27,97092	26,96075	109,7315	21,92083

Tabela 2 – Ganhos de calor

Date/Time	General Lighting kWh	Miscellaneous kWh	Computer kWh	Occupancy kWh	Solar Gains Inte kWh	Solar Gains Exte kWh	Zone/Sys kWh
1/1/2008	74675,81	17570,78	5298,886	97935,45	9017,729	107191,9	-193226
1/2/2008	64935,49	15278,94	4607,727	85059,35	8556,902	105236,6	-179452
1/3/2008	68182,27	16042,89	4838,113	89207,3	9128,167	110169,3	-189207
1/4/2008	71429,04	16806,83	5068,5	93520,28	8196,649	99490,97	-176399
1/5/2008	74675,81	17570,78	5298,886	98178,55	7807,931	94260,91	-166324
1/6/2008	64935,49	15278,94	4607,727	86362,16	7703,739	94036,72	-113877
1/7/2008	74675,81	17570,78	5298,886	99100,97	8100,068	98770,7	-142118
1/8/2008	71429,04	16806,83	5068,5	94237,14	8673,716	106456,9	-157693
1/9/2008	68182,27	16042,89	4838,113	88992,48	9177,607	111143,2	-194926
1/10/2008	74675,81	17570,78	5298,886	97222,73	9256,942	111645,3	-225599
1/11/2008	68182,27	16042,89	4838,113	89422,88	8062,266	94000,8	-167756
1/12/2008	71429,04	16806,83	5068,5	93850,16	8560,933	101163,8	-175025

Tabela 3– Ganhos e perdas térmicas

Date/Time	Glazing kWh	Walls kWh	Ceilings (int) kWh	Floors (int) kWh	Ground Floors kWh	Partitions (int) kWh	Roofs kWh	Floors (ex) kWh	External Infiltr kWh	External V kWh
1/1/2008	-14793,8	-13224,8	3709,012	-5461,67	-11898,7	-2209,828	-1452,65	-607,222	-59426,46	-3529,21
1/2/2008	-13896,8	-12056,4	6483,731	-3997,92	-10450,65	-1822,726	-658,014	-557,423	-56842,41	-3065,52
1/3/2008	-13749,7	-11885,6	5129,09	-5955,14	-11183,09	-2018,753	-1766,64	-577,011	-54861,56	-2972,73
1/4/2008	-19133,7	-12278,7	5790,077	-2820,78	-11623,32	-2161,054	-2337,84	-556,668	-65800,75	0
1/5/2008	-20952,7	-12109,1	4376,689	-4488,36	-12622,53	-2457,454	-3586,97	-557,516	-71655,06	0
1/6/2008	-31649,2	-14739,3	5955,615	-2444,86	-10774,43	-2081,657	-5814,9	-623,952	-93191,23	0
1/7/2008	-28550,9	-14831,1	4295,644	-6874,69	-13399,25	-2843,695	-5508,6	-635,613	-86818,17	0
1/8/2008	-25195,1	-14207,6	5372,55	-6229	-11930,65	-2407,714	-4316,69	-642,295	-78988,77	0
1/9/2008	-14265,3	-11064,7	6823,787	-5701,67	-11653,92	-2128,444	-949,164	-542,945	-56038,53	0
1/10/2008	-8476	-9916,68	4924,043	-5250,63	-11150,04	-2007,965	528,6738	-485,472	-45335,3	-2791,94
1/11/2008	-17198,3	-12915,8	4590,536	-725,969	-10631,04	-1760,097	-1235,26	-571,18	-61327,16	-3327,43
1/12/2008	-17495,3	-14147	2652,475	-3923,36	-11397,2	-2199,583	-2986,57	-605,371	-59390,16	-3439,02

Modelo Proposto X

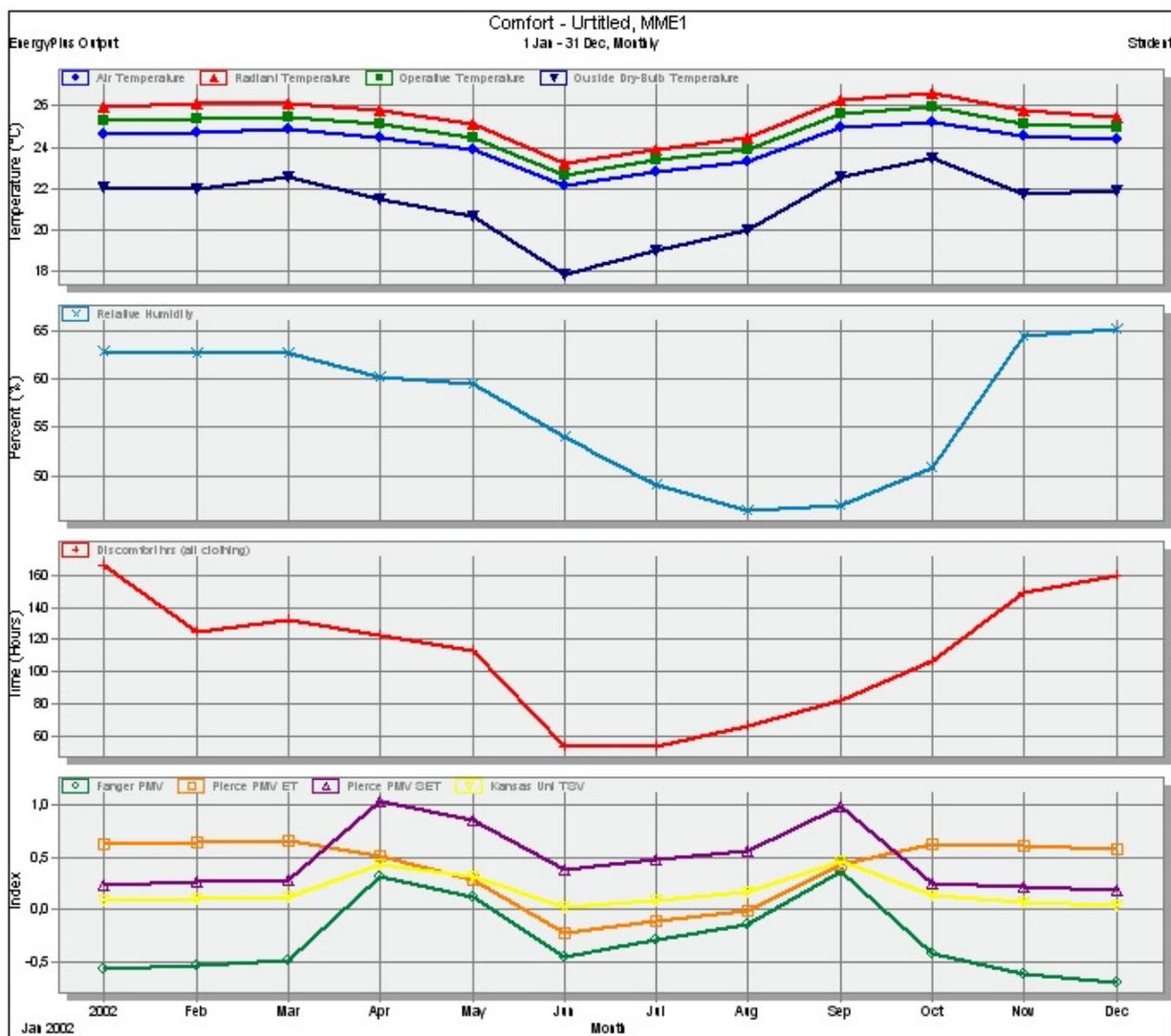


Figura 28- Análise de conforto térmico

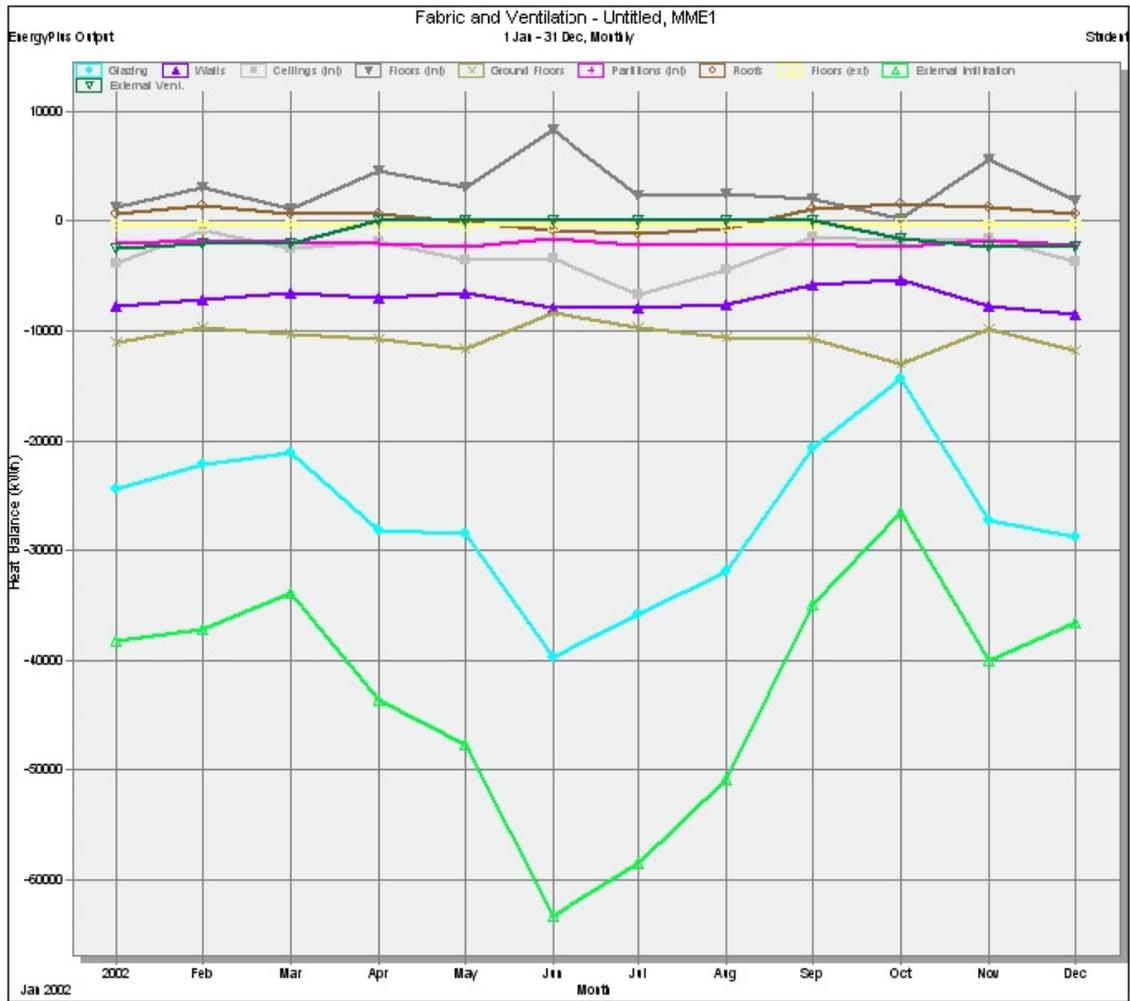


Figura 29- Ganhos e perdas térmicas

Date/Time	Room Electricity kWh	Lighting kWh	Chiller kWh
1/1/2008	23267,08	76364,81	70920,65
1/2/2008	20232,24	66404,19	64132,81
1/3/2008	21243,85	69724,4	68179,41
1/4/2008	22255,46	73044,6	65431
1/5/2008	23267,08	76364,81	63204,21
1/6/2008	20232,24	66404,19	41543,89
1/7/2008	23267,08	76364,81	50632,64
1/8/2008	22255,46	73044,6	52304,71
1/9/2008	21243,85	69724,4	63070,07
1/10/2008	23267,08	76364,81	76524,23
1/11/2008	21243,85	69724,4	64024,63
1/12/2008	22255,46	73044,6	64651,19

Figura 30- Consumo por uso final

Modelo Proposto XI

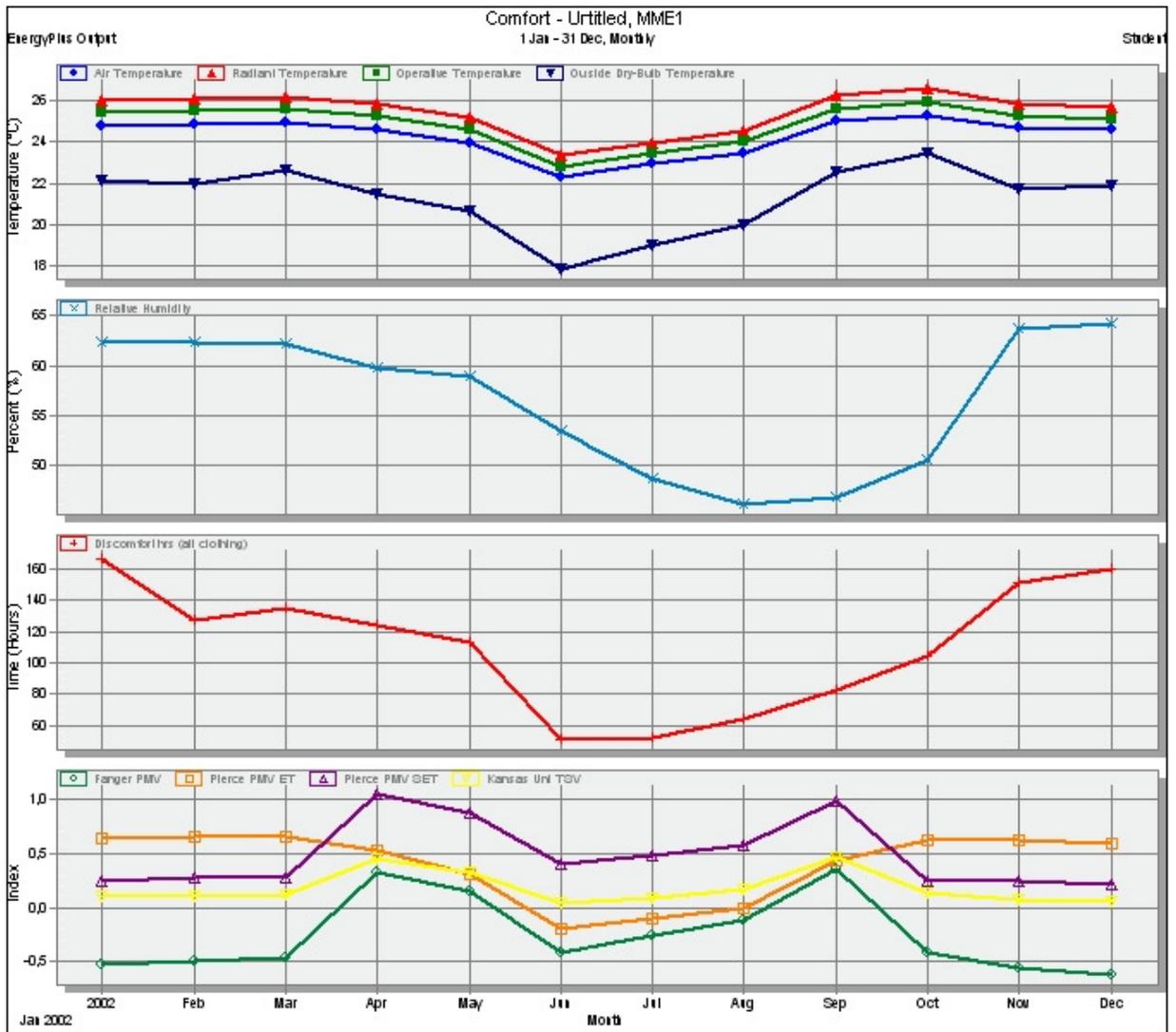


Figura 31- Análise de conforto térmico

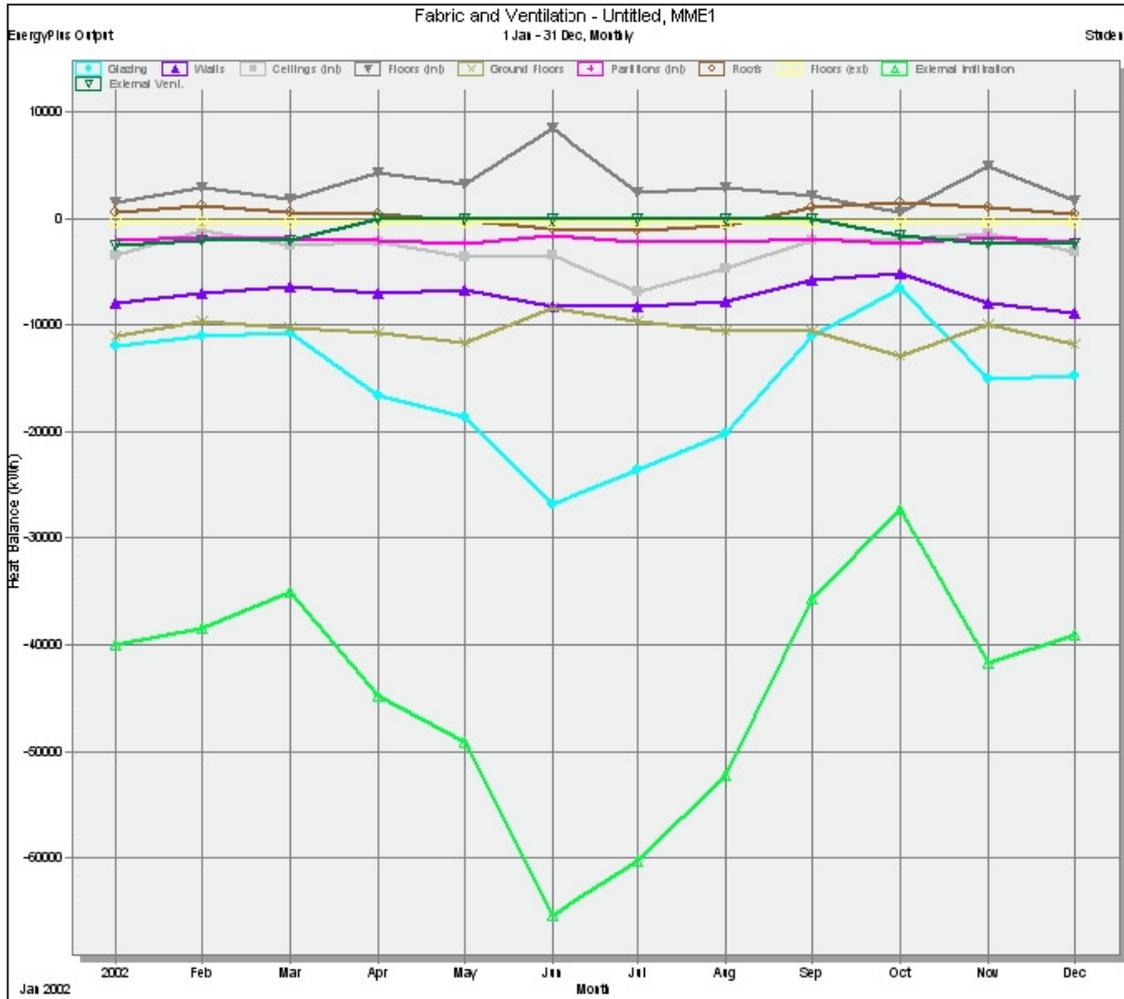


Figura 32- Ganhos e perdas térmicas

Date/Time	Room Electricity kWh	Lighting kWh	Chiller kWh	
1/1/2008	23267,08	76364,81	69840,55	169472,4
1/2/2008	20232,24	66404,19	62215,13	148851,6
1/3/2008	21243,85	69724,4	66395,96	157364,2
1/4/2008	22255,46	73044,6	64294,67	159594,7
1/5/2008	23267,08	76364,81	62130,25	161762,1
1/6/2008	20232,24	66404,19	41400,22	128036,7
1/7/2008	23267,08	76364,81	50090,13	149722
1/8/2008	22255,46	73044,6	51327,94	146628
1/9/2008	21243,85	69724,4	60948,66	151916,9
1/10/2008	23267,08	76364,81	73624,89	173256,8
1/11/2008	21243,85	69724,4	63264,7	154233
1/12/2008	22255,46	73044,6	64274,16	159574,2

Figura 33- Consumo por uso final

Modelo Proposto XII

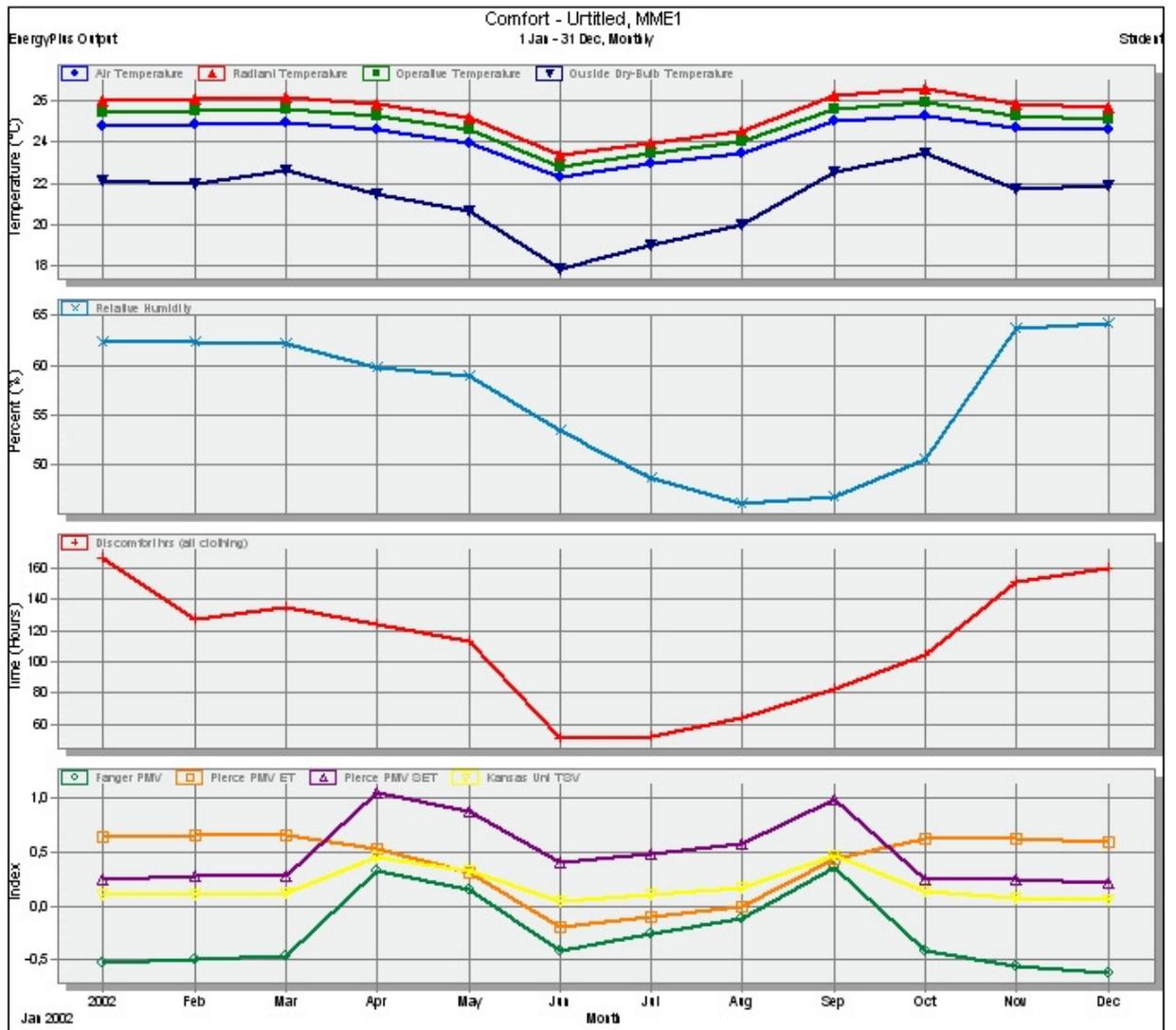


Figura 34- Análise de conforto térmico

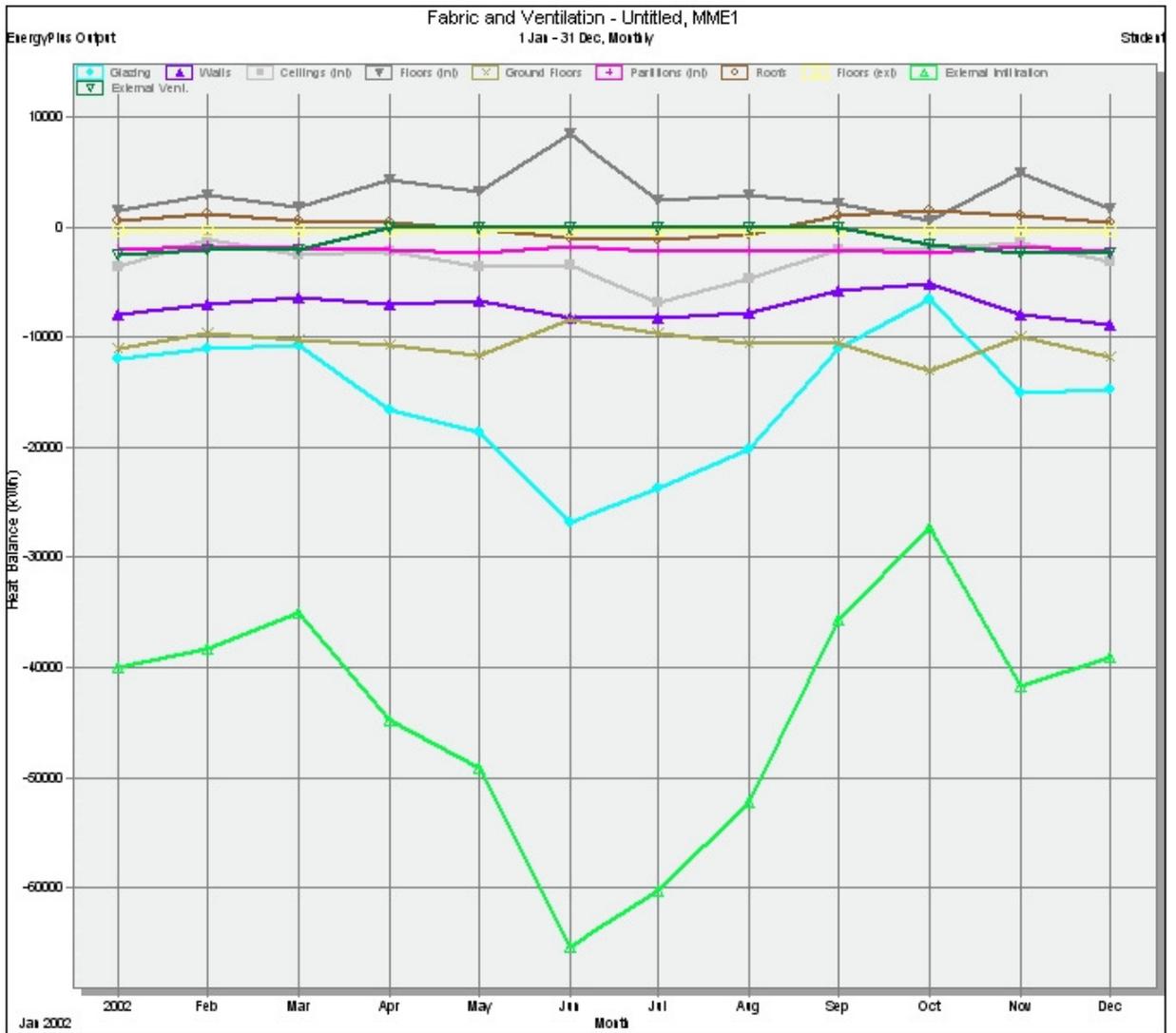


Figura 35- Ganhos e perdas térmicas

Date/Time	Room Electricity(KWh)	Lighting(KWh)	Chiller (KWh)
1/2/2008	20232,24	66404,19	62209,71
1/3/2008	21243,85	69724,4	66390,93
1/4/2008	22255,46	73044,6	64289,27
1/5/2008	23267,08	76364,81	62126,8
1/6/2008	20232,24	66404,19	41397,18
1/7/2008	23267,08	76364,81	50087,57
1/8/2008	22255,46	73044,6	51326,86
1/9/2008	21243,85	69724,4	60945,89
1/10/2008	23267,08	76364,81	73623,34
1/11/2008	21243,85	69724,4	63258,67
1/12/2008	22255,46	73044,6	64267,7

Figura 36- Consumo por uso final

Modelo Proposto XIII

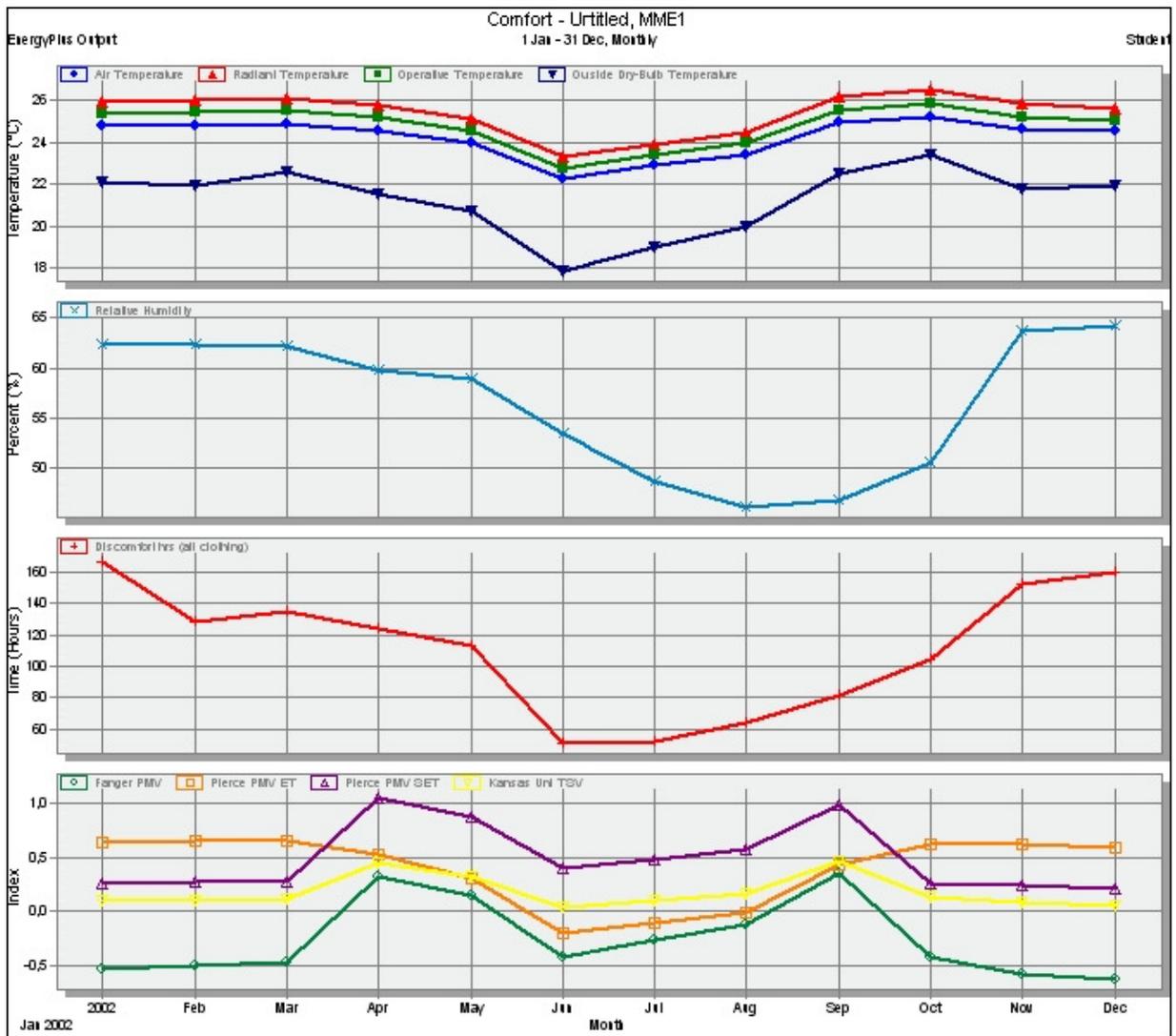


Figura 37- Análise de conforto térmico

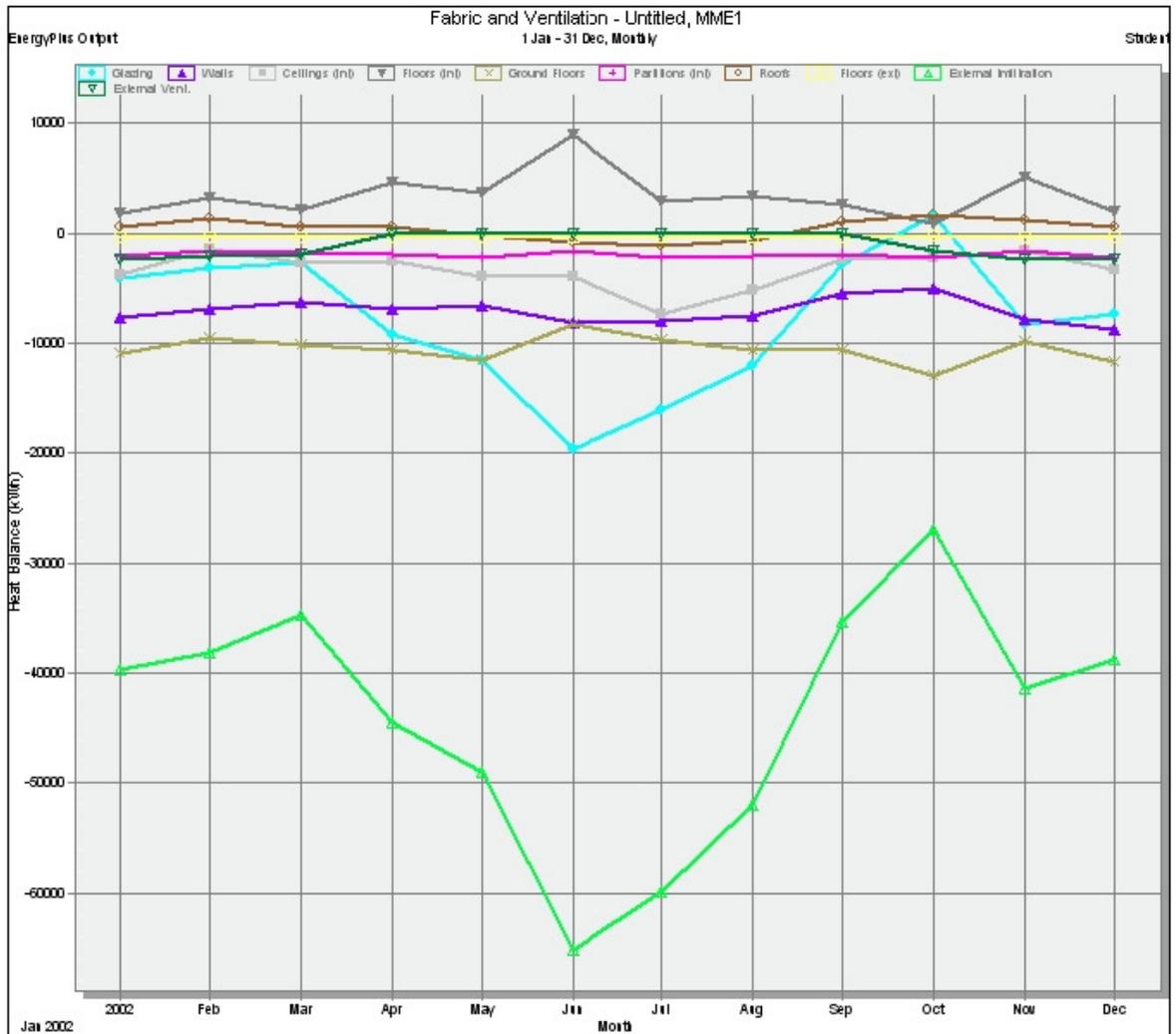


Figura 38- Ganhos e perdas térmicas

Date/Time	Room Electricity kWh	Lighting kWh	Chiller kWh	
1/2/2008	23267,08	76364,81	69861,53	169493,4
1/3/2008	20232,24	66404,19	62220,71	148857,1
1/4/2008	21243,85	69724,4	66384,11	157352,4
1/5/2008	22255,46	73044,6	64299,26	159599,3
1/6/2008	23267,08	76364,81	62182,06	161814
1/7/2008	20232,24	66404,19	41425,18	128061,6
1/8/2008	23267,08	76364,81	50140,9	149772,8
1/9/2008	22255,46	73044,6	51370,24	146670,3
1/10/2008	21243,85	69724,4	60923,22	151891,5
1/11/2008	23267,08	76364,81	73537,88	173169,8
1/12/2008	21243,85	69724,4	63288,83	154257,1

Figura 39- Consumo por uso final

Modelo Proposto XIV

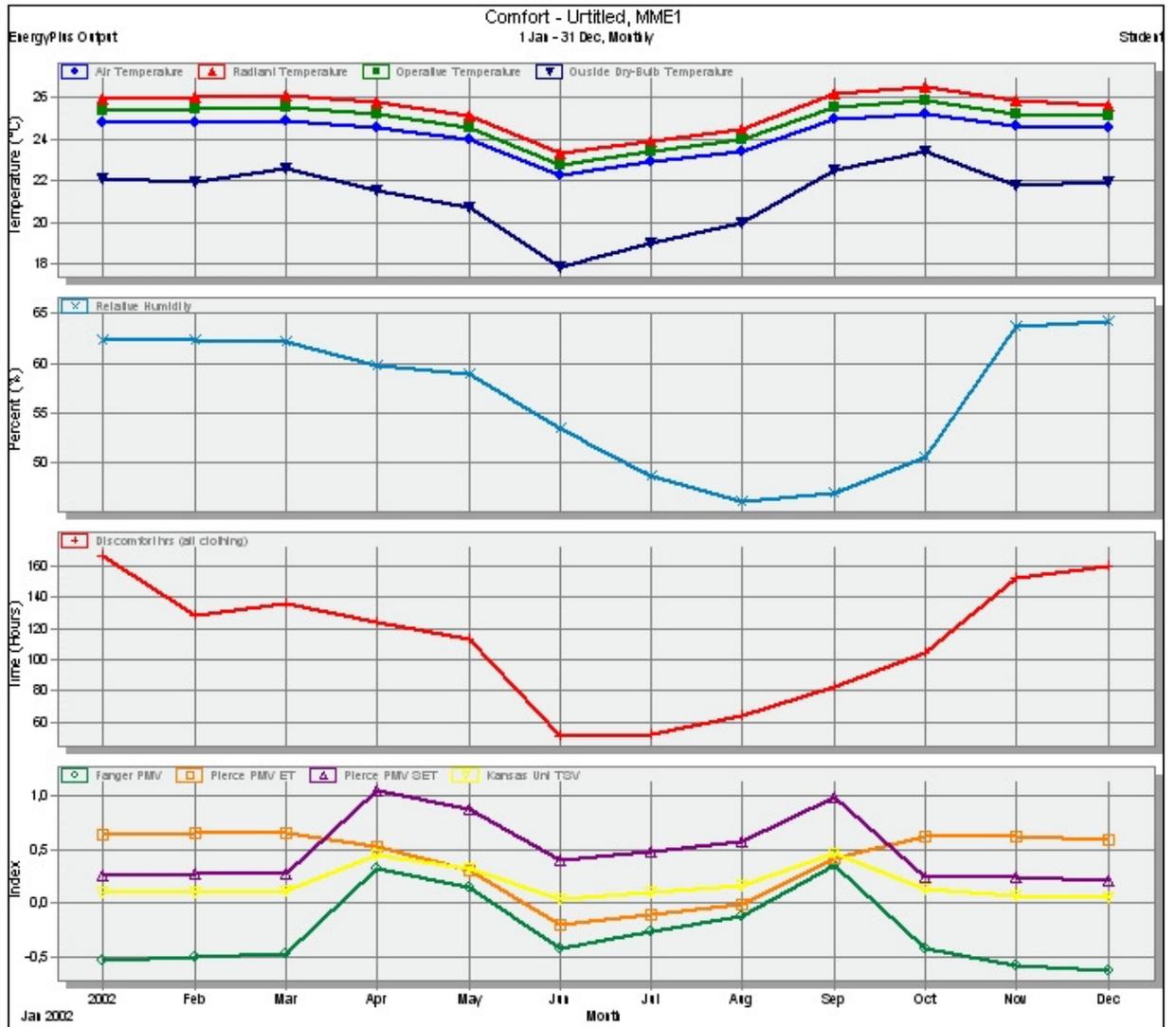


Figura 40- Análise de conforto térmico

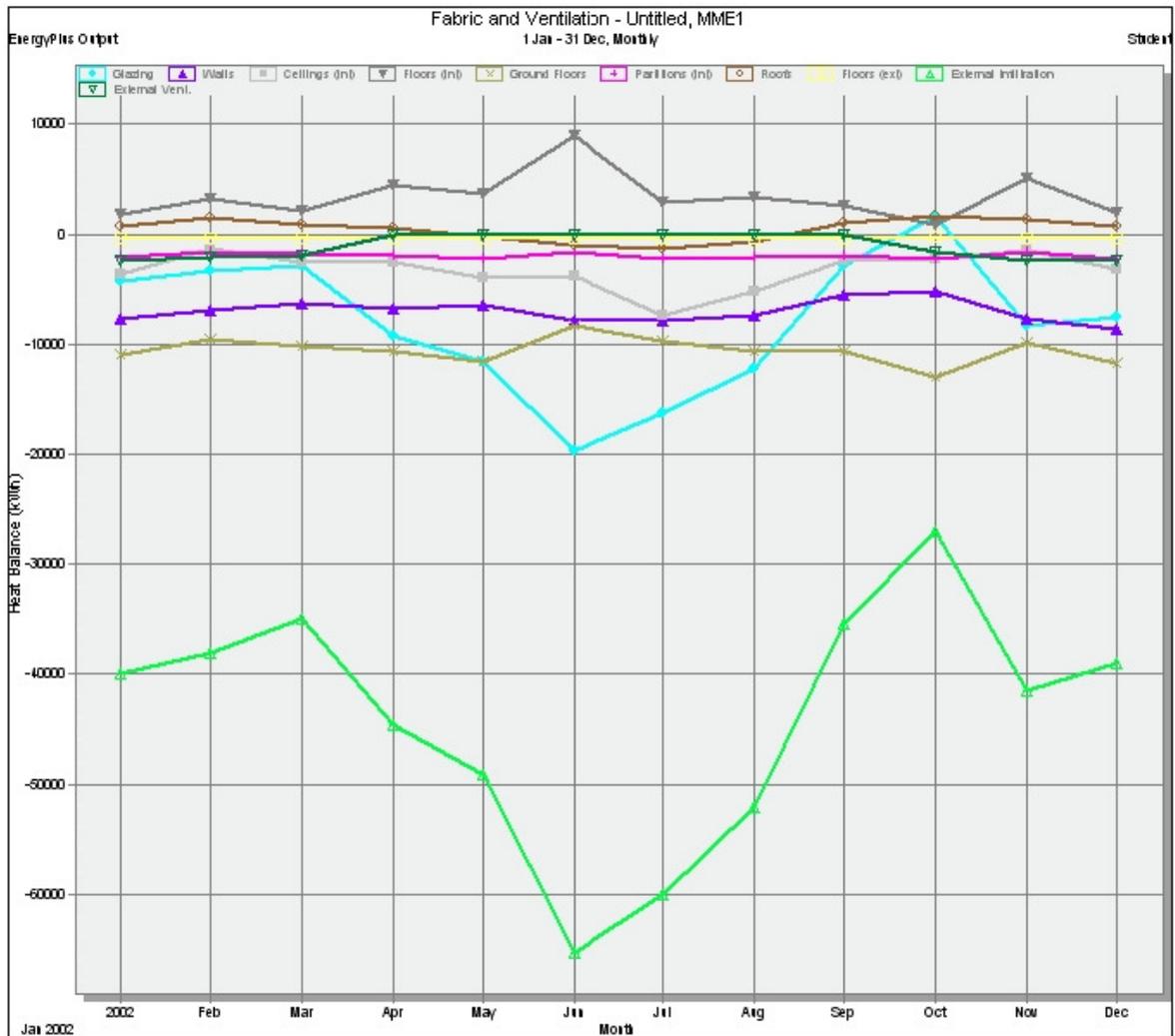


Figura 41- Ganhos e perdas térmicas

Date/Time	Room Electricity kWh	Lighting kWh	Chiller kWh
1/2/2008	23267,08	76364,81	69868,01
1/3/2008	20232,24	66404,19	62188,82
1/4/2008	21243,85	69724,4	66374,27
1/5/2008	22255,46	73044,6	64280,87
1/6/2008	23267,08	76364,81	62145,81
1/7/2008	20232,24	66404,19	41418,93
1/8/2008	23267,08	76364,81	50122,88
1/9/2008	22255,46	73044,6	51344,61
1/10/2008	21243,85	69724,4	60850,27
1/11/2008	23267,08	76364,81	73450,62
1/12/2008	21243,85	69724,4	63300,71

Figura 42- Consumo por uso final

Modelo Proposto XV

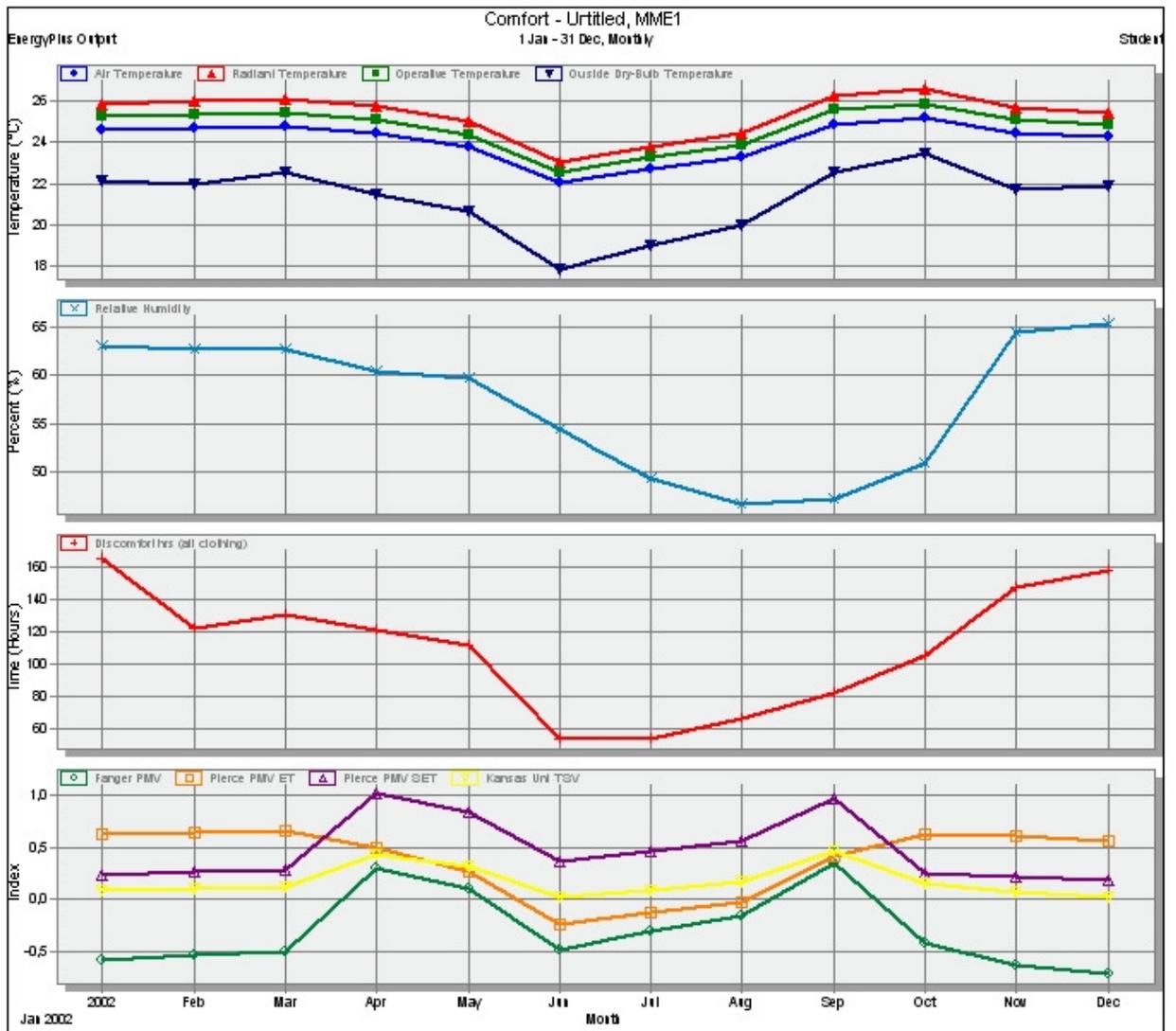


Figura 43- Análise de conforto térmico

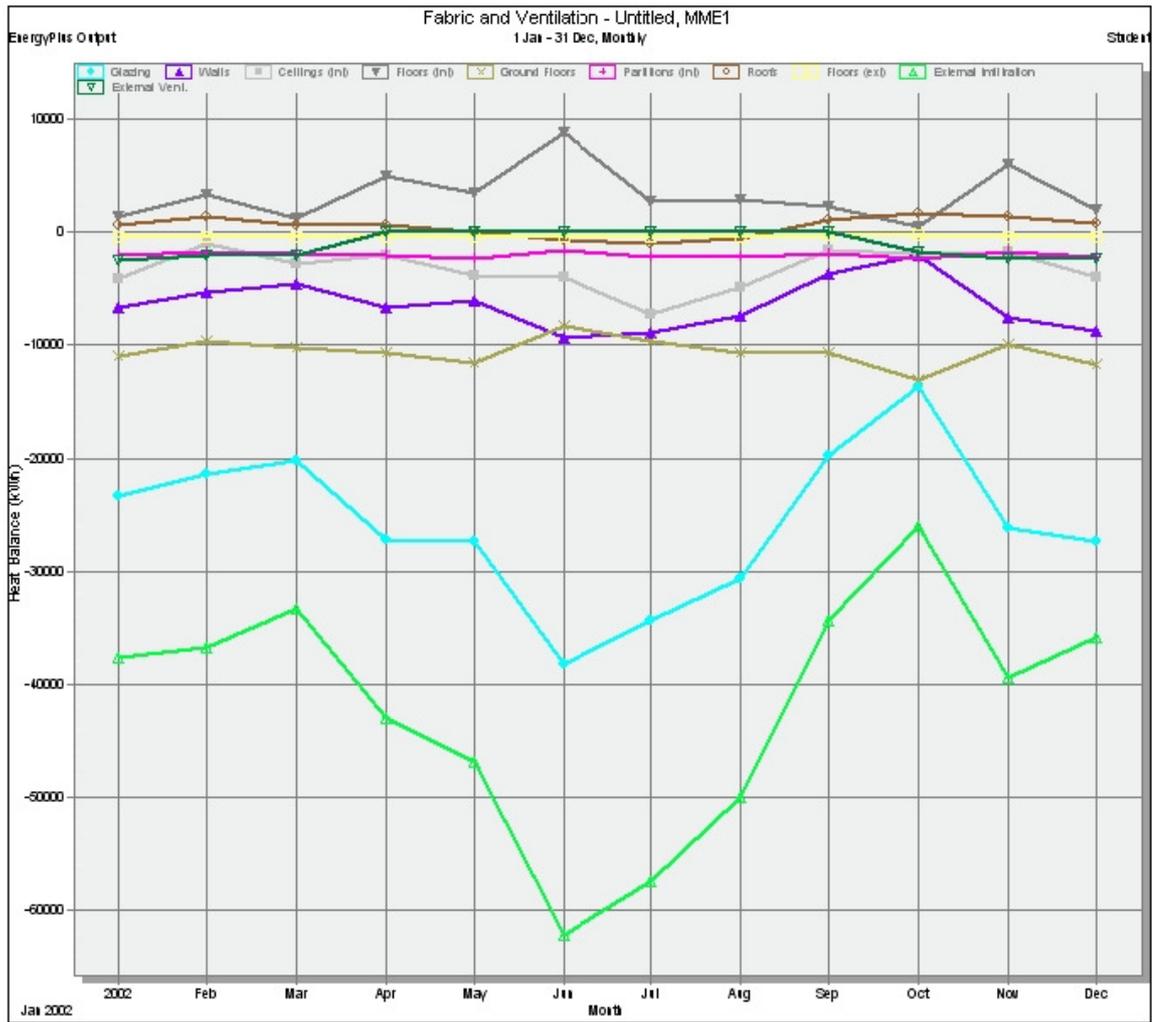


Figura 44- Ganhos e perdas térmicas

Date/Time	Room Electricity kWh	Lighting kWh	Chiller kWh
1/2/2008	23267,08	76364,81	71870,8
1/3/2008	20232,24	66404,19	65430,48
1/4/2008	21243,85	69724,4	69389,05
1/5/2008	22255,46	73044,6	66234,32
1/6/2008	23267,08	76364,81	64079,55
1/7/2008	20232,24	66404,19	41869,55
1/8/2008	23267,08	76364,81	51144,78
1/9/2008	22255,46	73044,6	53057,22
1/10/2008	21243,85	69724,4	64296,02
1/11/2008	23267,08	76364,81	78128,45
1/12/2008	21243,85	69724,4	64748,81

Figura 45- Consumo por uso final