



Universidade Federal de Santa Catarina
CTC – Centro Tecnológico
PPGEC – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envoltório de Edificações Não-residenciais

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, para a obtenção do Título de DOUTOR em Engenharia Civil

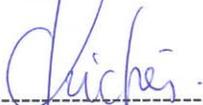
Joyce Correna Carlo

Florianópolis,
Fevereiro de 2008

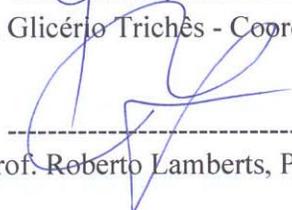
**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO ENVOLTÓRIO DE
EDIFICAÇÕES NÃO-RESIDENCIAIS**

JOYCE CORRENA CARLO

Tese julgada adequada para a obtenção do Título de DOUTOR em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

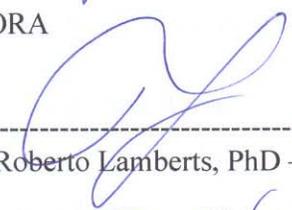


Prof. Glicério Trichês - Coordenador do PPGEC

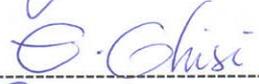


Prof. Roberto Lamberts, PhD - Orientador

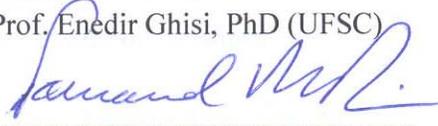
COMISSÃO EXAMINADORA



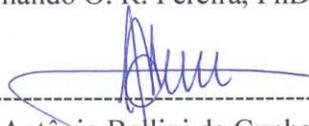
Prof. Roberto Lamberts, PhD – Moderador



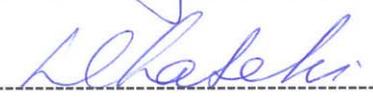
Prof. EneDIR Ghisi, PhD (UFSC)



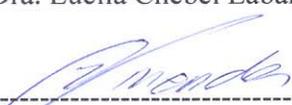
Prof. Fernando O. R. Pereira, PhD (UFSC)



Prof. Dr. José Antônio Bellini da Cunha Neto (UFSC)



Prof. Dra. Lucila Chebel Labaki (Unicamp)



Prof. Dr. Nathan Mendes (PUCPR)

Florianópolis, 29 de fevereiro de 2008

Agradecimentos

Aos meus pais, pelo apoio, carinho e confiança em minha capacidade, sem a força de vocês eu não teria segurança de ir tão longe;

Ao Prof. Roberto Lamberts, por todos os anos de orientação, disponibilidade e incentivo;

À Eletrobrás, pelo financiamento deste trabalho ligado à regulamentação para edificações eficientes;

Ao prof. Enedir, pela orientação na análise de custos;

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

A Márcio Sorgato e Miguel Pacheco, por manterem as regulamentações comercial e residencial em andamento nos 2 meses finais de redação da tese;

Aos amigos do LabEEE de longa data Catarina, Antônio César, Alexandra, Roberta, Isabel, Martin, Marina, Juliana, Priscila, Enedir, Trajano, Solange, Deivis, Cláudia, Vinícius, Augusto, e aos novos Clarissa, Lucio, Gabriel, Davi, Márcio, Miguel, Isis, Jair, Ana Paula, Andréa, Natália, Guilherme, Rogério, pelos almoços, cafés, encontros, passeios, festas e, é claro, discussões de trabalho;

Aos outros amigos Fábio, Helen, Camilo, Fernanda, Manuela, Daniela, Bárbara e todos os outros que passaram pela minha vida durante o desenvolvimento da tese;

Às bandas Angra, Bad Religion, Linkin Park, Metallica, Pearl Jam, System of a Down, The Doors e The Strokes pelo apoio na concentração durante a redação da tese.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS E QUADROS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
1 INTRODUÇÃO	
1.1 Justificativa	2
1.2 Objetivos	8
1.2.1 Geral	8
1.2.2 Específicos	8
1.3 Estrutura	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 Legislação em eficiência energética	11
2.1.1 Estados Unidos	11
2.1.2 Canadá	15
2.1.3 México	16
2.1.4 União Européia	16
2.1.5 Austrália	20
2.1.6 Hong Kong	21
2.1.7 Conclusão	21
2.2 Edificações energeticamente eficientes	23
2.2.1 Características que indicam a eficiência	23

2.2.2	<i>Benchmarks</i> e outros marcos de consumo	28
2.2.3	Considerações finais	33
2.3	Simulação do desempenho termo-energético de edificações	35
2.3.1	O programa EnergyPlus	36
2.3.2	Protótipos de edificações	37
2.3.3	Considerações finais	47
2.4	Análise de custos	49
2.4.1	Considerações finais	58
2.5	Considerações finais	60
3	ESTUDO DE CAMPO	
3.1	Introdução	63
3.2	Metodologia	65
3.2.1	Levantamento fotográfico	65
3.2.1.1	Limitações do levantamento	68
3.2.2	Levantamento <i>in loco</i>	69
3.3	Resultados	73
3.3.1	Levantamento fotográfico	73
3.3.2	Levantamento <i>in loco</i>	77
3.4	Considerações finais	88
4	SIMULAÇÃO	
4.1	Introdução	91
4.2	Metodologia	93
4.2.1	Protótipos representativos	93

4.2.2	Protótipos ineficientes	96
4.2.3	Parâmetros globais: características primárias	97
4.2.4	Análise de custos	103
4.2.4.1	Dados utilizados nas equações 11 a 15	106
4.2.5	Medidas de Conservação de Energia: características secundárias	108
4.2.6	Simulação das Medidas de Conservação de Energia	112
4.2.7	Desenvolvimento de equação para avaliação da eficiência	116
4.2.8	Avaliação da eficiência energética do envoltório	117
4.3	Resultados	119
4.3.1	Parâmetros globais: características primárias	119
4.3.2	Envoltório: simulação das Medidas de Conservação de Energia	129
4.3.2.1	Relevância das MCE	129
4.3.2.2	Consumo de energia elétrica	134
4.3.3	Desenvolvimento de equação para avaliação da eficiência	137
4.3.3.1	Limitações das equações	141
4.3.3.2	Variação das MCE do envoltório usando as equações	143
4.3.3.3	Exclusão da Transmitância Térmica das paredes	143
4.3.4	Análise de custos	150
4.3.5	Avaliação da eficiência energética do envoltório	158
4.3.5.1	Indicador de Consumo	158
4.3.5.2	Custo da Energia Conservada	159
4.3.5.3	Pay-back	161

4.3.5.4	Custo do Ciclo de Vida	162
4.3.5.5	Avaliação final dos indicadores	163
4.4	Considerações finais	165
5	CONCLUSÕES	169
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	176
	ANEXO 1	184
	ANEXO 2	186
	ANEXO 3	187
	ANEXO 4	190
	ANEXO 5	196

Lista de Figuras

Figura 1	Modelo de etiqueta de eficiência energética em Portugal.	20
Figura 2	Consumo de energia elétrica em função da transmitância térmica com paredes externas leves e pesadas.	26
Figura 3	Indicação de uma edificação comercial pouco eficiente na escala de análise do EMSD (<i>Energy Efficiency Office of the Electrical and Mechanical Services Department</i>) de Hong Kong.	30
Figura 4	Consumos típicos de energia de atividades comerciais e institucionais de Portugal.	32
Figura 5	Potencial de intervenção no desempenho de uma edificação durante as fases de projeto, construção e uso da edificação.	33
Figura 6	Classificação dos protótipos para verificação do potencial de uso de cogeração.	41
Figura 7	Protótipos de edificações utilizados em Hong Kong, sendo (a) escritórios, (b) hotel, (c) hospital e (d) lojas.	44
Figura 8	Curva de carga de uma loja de departamentos na área central de Curitiba.	46
Figura 9	Curva de carga de um edifício de escritórios na área central de Curitiba.	46
Figura 10	Questões iniciais a serem respondidas em uma avaliação de CCV.	53
Figura 11	Erros relativos do ECCV e do $(B/C)_{io}$.	54
Figura 12	ECCV e custo-benefício de algumas MCE.	56
Figura 13	Custo da Energia Conservada de 12 MCE.	57
Figura 14	Volumetrias representativas das atividades comerciais levantadas.	74
Figura 15	Frequência de ocorrência do PJF das edificações amostradas nas cinco cidades.	75
Figura 16	Frequência de ocorrência da cor dos vidros das edificações amostradas nas cinco cidades.	76
Figura 17	Frequência de ocorrência do AVS das edificações amostradas nas cinco cidades.	76
Figura 18	Frequência de ocorrência do AHS das edificações amostradas nas cinco cidades.	77

Figura 19	Diferença dos efeitos do PJJ para o PJJponderado.	94
Figura 20	Volumetrias simuladas para análise das variáveis globais.	100
Figura 21	Volumetria de edificações comerciais: exemplos gerais com ilustrações (azul) e edificações simuladas numeradas (laranja, vermelho e rosa).	102
Figura 22	Procedimento inicial de simulação das MCE, contendo 3 blocos pertencentes a um ciclo.	113
Figura 23	Procedimento de simulação das MCE, blocos de simulação 3 e 4 do mesmo ciclo da figura anterior.	114
Figura 24	Procedimento final de simulação pertencente a um ciclo: a alternativa mais eficiente encontrada é o Caso 6, composto do Caso 5 mais a última MCE de menor CEC.	115
Figura 25	Procedimento final de simulação pertencente a um ciclo: não há economia de energia, a edificação mais eficiente encontrada é o Caso 5, devido ao CEC inexistente nas simulações do Bloco 5. O Caso 5 possui vidros com Fator Solar igual ao caso-base.	115
Figura 26	Consumo anual de energia elétrica de alternativas e protótipos com DCI de 18,90 W/m ² (a) e DCI de 28,90 W/m ² (b). Três pontos idênticos e alinhados indicam, de cima para baixo: uso de envoltório do protótipo ineficiente, uso de envoltório do protótipo representativo e uso de envoltório eficiente.	120
Figura 27	Consumos anuais de energia elétrica pela área em função do número de pavimentos, usando edificações com ID 1 a 5, simuladas para o clima de Salvador (a) e Curitiba (b).	122
Figura 28	Consumos anuais de energia elétrica pela área em função do Fator de Forma, para as edificações com ID 1, 6 e 12 de 1 pavimento (a) e com ID 3, 8 e 13 de 5 pavimentos (b).	123
Figura 29	Gráfico base das representações da volumetria de edificações comerciais contendo o Fator Altura e o Fator de Forma.	124
Figura 30	Consumos anuais de energia elétrica pela área (kWh/m ²) de edificações de acordo com sua volumetria, para Salvador, condicionador de ar de eficiência A e DCI = 10,7 W/m ² .	124
Figura 31	Consumos anuais de energia elétrica pela área (kWh/m ²) de edificações de acordo com sua volumetria, para Curitiba, condicionador de ar de eficiência A e DCI = 10,7 W/m ² .	126
Figura 32	Consumos anuais de energia elétrica pela área (kWh/m ²) de edificações de acordo com sua volumetria, para Salvador, condicionador de ar de eficiência A e DCI = 34,4 W/m ² .	126

Figura 33	Consumos anuais de energia elétrica pela área (kWh/m^2) de edificações de acordo com sua volumetria, para Salvador, condicionador de ar de eficiência G e $\text{DCI} = 34,4 \text{ W/m}^2$.	127
Figura 34	CEC das alternativas simuladas com a maior fachada orientada a N-S, com $\text{DPI} = 10 \text{ W/m}^2$ e eficiência A do condicionador de ar.	131
Figura 35	Consumos anuais pela área de alternativas contendo diferentes MCE para os grandes escritórios no clima de Florianópolis.	134
Figura 36	Consumo anual de energia simulado e equacionado para edificações cuja área da planta é menor que 500 m^2 .	140
Figura 37	Consumo anual de energia simulado e equacionado para edificações cuja área da planta é maior que 500 m^2 .	140
Figura 38	Indicadores de consumo estimados com a Equação 16 em função do Fator de Forma de um universo de edificações com área de projeção inferior a 500 m^2 .	142
Figura 39	Indicadores de consumo estimados com a Equação 17 em função do Fator de Forma de um universo de edificações com área de projeção maior que 500 m^2 .	142
Figura 40	Fator de Forma válido para aplicação das equações (linha tracejada vermelha).	143
Figura 41	Indicador de consumo produzido pela equação para edificações com área de projeção $> 500 \text{ m}^2$ em função do Percentual de área de Janela na Fachada (PJF).	144
Figura 42	Indicador de consumo produzido pela equação em função do Fator Solar dos vidros (FS).	144
Figura 43	Indicador de consumo da equação para edificações com área de projeção $> 500 \text{ m}^2$ em função do Ângulo Vertical de Sombreamento da proteção horizontal.	145
Figura 44	Indicador de consumo da equação para edificações com área de projeção $> 500 \text{ m}^2$ em função do Ângulo Horizontal de Sombreamento da proteção vertical.	145
Figura 45	Indicador de consumo produzido pela equação para edificações com área de projeção menor que 500 m^2 em função da Transmitância Térmica da cobertura.	146
Figura 46	Consumo anual de energia elétrica pela área (kWh/m^2) para alternativas dos hotéis, simuladas em Curitiba, em função da U_{par} com uma Capacidade Térmica de $400 \text{ kJ/m}^2\text{K}$.	149
Figura 47	Consumo anual de energia elétrica pela área (kWh/m^2) para	149

alternativas dos grandes escritórios, simuladas em Curitiba, em função da U_{par} com uma Capacidade Térmica de $100 \text{ kJ/m}^2\text{K}$.

Figura 48	Consumo anual de energia elétrica pela área (kWh/m^2) para alternativas dos escritórios verticais, simuladas em Salvador, em função da U_{par} com uma Capacidade Térmica de $56 \text{ kJ/m}^2\text{K}$.	150
Figura 49	Consumo anual de energia elétrica pela área (kWh/m^2) para alternativas dos hotéis, simuladas em Salvador, em função da U_{par} com uma Capacidade Térmica de $225 \text{ kJ/m}^2\text{K}$.	150
Figura 50	Custo da Energia Conservada (CEC, $\text{R\$/kWh}$) em função do Consumo de Energia (kWh/m^2).	155
Figura 51	Pay-back (anos) em função do Consumo de Energia (kWh/m^2).	155
Figura 52	Taxa Interna de Retorno (%) em função do Consumo de Energia (kWh/m^2).	155
Figura 53	Custo do Ciclo de Vida (CCV, $\text{R\$/m}^2\text{/ano}$) em função do Consumo de Energia (kWh/m^2).	155
Figura 54	Custo da Energia Conservada (CEC, $\text{R\$/kWh}$) em função do Pay-back (anos).	157
Figura 55	Custo da Energia Conservada (CEC, $\text{R\$/kWh}$) em função da Taxa Interna de Retorno (TIR, %).	157
Figura 56	Taxa Interna de Retorno (TIR, %) em função do Pay-back (anos).	157
Figura 57	Correlação entre a Taxa Interna de Retorno (TIR, %) e o Pay-back (anos) da Figura 56.	157
Figura 58	Cinco escalas de <i>benchmarking</i> , cada atividade comercial separadamente, usando o Indicador de Consumo.	159
Figura 59	Custo da Energia Conservada (CEC, $\text{R\$/kWh}$) em função da Economia de Energia Elétrica (kWh/m^2) obtida por simulação das alternativas de grandes lojas.	160
Figura 60	Avaliação da eficiência energética de edificações usando a TIR (%) e o Pay-back (anos).	161
Figura 61	Escala de <i>benchmarking</i> para as grandes lojas usando o CCV.	163

Lista de Tabelas e Quadros

Quadro 1	Dados disponíveis para a elaboração dos protótipos.	38
Quadro 2	Variáveis observadas na modelagem dos protótipos.	38
Quadro 3	Informações obtidas no estudo de campo.	71
Tabela 1	Número de amostras por atividade comercial levantados em Curitiba.	45
Tabela 2	Número de amostras necessárias para representar uma população de edifícios.	67
Tabela 3	Número estimado de edificações na região metropolitana de Florianópolis que contêm somente uma atividade comercial em funcionamento em seu interior e o número de amostras necessárias para erro de 5% e 10%.	68
Tabela 4	Número de amostras fotografadas em cada cidade, segundo sua atividade.	73
Tabela 5	Parâmetros do modelo dos grandes escritórios.	78
Tabela 6	Parâmetros do modelo das grandes lojas.	79
Tabela 7	Parâmetros do modelo de pequenos escritórios.	81
Tabela 8	Parâmetros do modelo de pequenas lojas.	82
Tabela 9	Parâmetros do modelo de hotéis.	84
Tabela 10	Parâmetros do modelo de escritórios verticais.	86
Tabela 11	Tarifa média por atividade não-residencial e tarifa média total adotada, anos base de 2002 e 2003. Dados obtidos no ano de 2004.	87
Tabela 12	Características do envoltório dos protótipos representativos.	95
Tabela 13	Características do envoltório dos casos-base ineficientes.	97
Tabela 14	Densidades de carga interna originais e densidades alternativas.	98
Tabela 15	Alternativas de volumetrias para modelos de pavimento tipo de três protótipos.	100
Tabela 16	Índice Nacional da Construção Civil do IBGE.	107
Tabela 17	Evolução anual média do período $((ano_n - 1995)/n)$ das tarifas de energia elétrica do setor comercial no Brasil.	108

Tabela 18	Medidas de Conservação de Energia usadas nas simulações enfocando o envoltório.	110
Tabela 19	Parâmetros de envoltório dos modelos de referência.	118
Tabela 20	Ordem de incorporação das MCE nos casos de cada bloco do Ciclo 1 e 2, com condicionador de ar com etiqueta de eficiência energética A e G para orientação N-S.	130
Tabela 21	Custo da Energia Conservada, em R\$/kWh de todas as MCE do Bloco 0 e do Ciclo 1.	133
Tabela 22	Medidas de Conservação de Energia utilizadas nas simulações cujos resultados são mostrados na Figura 35.	135
Tabela 23	Indicadores de custos para as alternativas analisadas.	152
Tabela 24	Indicadores de consumo para <i>benchmarking</i> dos modelos referenciais de maior e menor eficiência e de alternativas selecionadas.	158

Lista de Abreviaturas e Siglas

A_{cob}	Área da cobertura
A_{env}	Área do envoltório
AHS	Ângulo Horizontal de Sombreamento
A_{proj}	Área de projeção da edificação
A_{tot}	Área total de piso
AVS	Ângulo Vertical de Sombreamento
BT	Baixa tensão
CCV	Custo do Ciclo de Vida
CEC	Custo da Energia Conservada
COP	<i>Coefficient of performance</i>
DCI	Densidade de Carga Interna
DPI	Densidade de Potência de Iluminação
ECCV	Economia no Custo do Ciclo de Vida
FA	Fator altura – A_{cob}/A_{tot}
FF	Fator de forma – A_{env}/V
FS	Fator Solar
GE	Grandes escritórios
GL	Grandes lojas
HO	Hotéis
IC	Indicador de Consumo
INCC	Índice Nacional da Construção Civil do IBGE
LPD	<i>Lighting Power Density</i>
MCE	Medida de Conservação de Energia
PE	Pequenos escritórios
PJF	Percentual de área de Janela na Fachada
PL	Pequenas lojas

PMV	<i>Predicted Mean Vote</i> (VMP – voto médio estimado)
TIR	Taxa Interna de Retorno
U_{cob}	Transmitância Térmica da cobertura
U_{parP}	Transmitância Térmica das paredes externas – paredes pesadas
U_{parL}	Transmitância Térmica das paredes externas – paredes leves

Entidades e Programas

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BCA	<i>Building Code of Australia</i>
BEN	Balanco Energético Nacional
CB ECS	<i>Commercial Building Energy Consumption Survey</i>
CTE	<i>Condiciones Térmicas em los Edifícios</i>
DOE	<i>Department of Energy - USA</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IECC	<i>International Energy Conservation Code</i>
NRC	<i>National Research Council</i>
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RECS	<i>Residential Building Energy Consumption Survey</i>
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
SINPHA	Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Consumo

Resumo

O racionamento de energia ocorrido em 2001 foi o marco para promulgação da chamada lei de eficiência energética, a Lei nº 10295 que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Ela foi regulamentada pelo Decreto nº 4059 de 19 de dezembro de 2001 que estabeleceu 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. O decreto também criou o “Grupo Técnico para Eficientização de Energia nas Edificações no País” para propor uma forma de regulamentar as edificações construídas no Brasil visando o uso racional da energia elétrica. Em face destas condicionantes, esta tese tem por objetivo elaborar metodologia de avaliação da eficiência energética do envoltório de edificações comerciais e institucionais.

Inicialmente, um estudo de campo foi realizado para sanar a ausência de dados de características de edificações comerciais e institucionais e de uso da energia e formar bases para a criação de modelos representativos de certas atividades. Foram selecionadas três atividades para formar cinco modelos de edificações: grandes e pequenos escritórios, grandes e pequenas lojas e hotéis. As características do envoltório como área de janela, tipo de vidro, existência de dimensões de proteções solares, proporção das menores fachadas em relação às maiores, número de pavimentos e forma foram observados em 1103 edificações distribuídas em cinco cidades brasileiras: Recife, Salvador, Belo Horizonte, São Paulo e Florianópolis. As características mais comuns encontradas para cada atividade formaram modelos representativos. Elas foram complementadas com características internas de edificações de Florianópolis que se assemelhavam aos modelos representativos. Um sexto modelo foi criado exclusivamente para complementar o desenvolvimento de uma equação de regressão linear multivariada.

Os modelos representativos foram adaptados para criar protótipos representativos e protótipos ineficientes para simulação computacional do desempenho energético no programa Energy Plus. Além destes modelos, alternativas contendo soluções mais eficientes também foram simuladas. Características primárias (Densidade de Carga Interna, eficiência do condicionamento de ar, orientação solar das edificações, volumetria) foram avaliadas através de simulação para verificar sua influência no

impacto do envoltório sobre o consumo de energia. Características secundárias do envoltório foram simuladas com a inclusão gradativa de Medidas de Conservação de Energia, MCE, aos protótipos ineficientes. O critério de simulação e de inclusão de MCE foi a seleção da alternativa cuja medida proporcionava o menor Custo da Energia Conservada, CEC.

As simulações cuja eficiência do condicionador de ar de janela era A e orientação das maiores fachadas era a N-S propiciaram o desenvolvimento de duas equações de regressão, relacionadas à volumetria da edificação a ser analisada. Elas contêm variáveis de Fator de Forma, FF ($A_{\text{envoltório}}/V$); Fator Altura, FA ($A_{\text{cobertura}}/A_{\text{tot}}$); Densidade de Carga Interna, DCI; padrão de uso; Percentual de Área de Janela na Fachada, PJF; Fator Solar, FS; Ângulo Vertical de Sombreamento, AVS; Ângulo Horizontal de Sombreamento, AHS; Transmitância Térmica da cobertura, U_{cob} ; sendo que a Transmitância Térmica das paredes foi eliminada da equação. Esta última apresentou uma complexidade que não pôde ser descrita por uma equação linear, visto que tem relação com o clima, com a volumetria da edificação, com a capacidade térmica das paredes externas e com as cargas internas. A Densidade de Carga Interna e o padrão de uso foram transformados em constantes, de forma que as equações focam o estudo do envoltório.

Após desenvolvidas as equações, o Indicador de Consumo obtido e os indicadores de custos: Pay-back, Taxa Interna de Retorno, Custo da Energia Conservada e Custo do Ciclo de Vida foram utilizados para avaliação da eficiência energética do envoltório. O Custo da Energia Conservada mostrou ser o mais adequado devido à sua simplicidade de cálculo, à redução das incertezas embutidas nas suas variáveis e à interpretação que fornece, combinado benefícios financeiros anuais à economia de energia que a medida proporciona. Todos estes indicadores, entretanto, podem ser utilizados para avaliações comparativas dentre o mesmo modelo de edifício, e podem ser adequados para a avaliação da eficiência de acordo com a análise a ser efetuada. Os objetivos de tese foram assim alcançados ao apresentar equações para avaliação da eficiência e indicadores de custos relacionados à eficiência do envoltório.

Abstract

The Brazilian electricity crisis of 2001 was the main event behind Law 10295, the so-called Energy Efficiency Law, which set up the basic rules for the National Politics on Energy Conservation. Decree 4059 established that energy efficiency reference parameters for buildings should be created, with “technical indicators and specific regulations” set as standards intended for a national policy of improved energy efficiency. Also, a Technical Group for Building Energy Efficiency was created to forward the basic standards for the rational use of energy in Brazilian buildings. This dissertation, a follow-up to these rulings, accounts for methods developed in a study that evaluated current efficiency of energy use in non-residential buildings envelopes.

Initially, a site survey was carried out to provide the inexistent basic data on the characteristics of non-residential buildings and their energy use and from them to create typified models. Three commercial building activities were used to come up with five building typical models: large and small office buildings, large and small stores, and for hotels. Data on the envelope characteristics, such as window-to-wall ratios, glazing types, solar protections and façades dimensions, floor numbers, and building shapes, were drawn from 1,103 Brazilian buildings in the cities of Recife, Salvador, Belo Horizonte, São Paulo, and Florianópolis. The most usual characteristics found in the survey for each commercial activity were used to create typical models for that kind of buildings. These external characteristics were combined with interior ones collected in Florianópolis buildings and whose external characteristics were similar to the models. A sixth model was created exclusively to complement data needed to develop a multivaried regression equation.

The typified models were adjusted to create both typical and inefficient building prototypes that allowed simulations of energy performances in the *Energy Plus* computer program. Building alternative with more efficient solutions were also simulated. Primary building parameters (Internal Load Density, HVAC efficiency, solar orientation, and total volume) were tested in simulations to find out how they would change electricity use through their effect on the envelope. Secondary characteristics of the envelope were simulated with graded inclusions of Energy Conservation Measures, ECM, into the inefficient prototypes. The simulation criterion and the ECM order of

inclusion were chosen based on the alternative with the lowest Cost of Conserved Energy, CCE.

The electricity consumptions in the HVAC “A” efficiency level and in larger façades with the N-S orientation were used to develop two regression equations related to the building volume. Such equations contain as variables Shape Factor (A_{envelope}/V), Height Factor ($A_{\text{roof}}/A_{\text{tot}}$), Internal Load Density, ILD, hourly schedules; Window to Wall Ratio, WWR; Solar Heat Gain Factor, SHGF; Vertical Shading Angle, VSA; Horizontal Shading Angle, HAS and Roofs Thermal Transmittance, U_{roof} . The Thermal Transmittance of walls, also analyzed, was excluded from the equations since its complexity is incompatible for description by a linear equation. Thermal transmittance is related to weather, building size, thermal capacity of external walls and internal loads. Internal Load Density and schedules were held constant to have the study focused on the envelope.

The developed equations were used next to evaluate the energy efficiency of the envelope based on the Consumption and Cost indicators: Pay-back, Internal Rate of Return, Cost of Conserved Energy, and Life Cycle Cost. Among all tested indicators, the Cost of Conserved Energy was found the most suited to assess the energy efficiency and this due to its simplicity in calculations and smaller uncertainties associated with its variables, in addition to the good quality of the assessed data on the annual cost benefits and on the electricity savings that resulted from adopting Energy Conservation Measures. All indicators, however, can be adopted in comparative evaluations within each building type and are good for use according to the desired type of analysis.

Thus have been fulfilled the research/dissertation objectives of providing (a) suitable equations for evaluations of energy efficiency in commercial buildings and (b) acceptable cost indicators related to distinct types of buildings envelopes.

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa

O crescente consumo de energia *per capita* tem afetado tanto países desenvolvidos, tais como EUA, Austrália, Japão e Alemanha, quanto países em desenvolvimento, como o Brasil. Grande parte da geração de energia consumida por estes países é derivada de fontes não-renováveis como combustíveis fósseis que proporcionam efeitos negativos ao meio ambiente. No Brasil, a geração de energia baseia-se em fontes renováveis, representadas pelas usinas hidrelétricas, cujo potencial hidrelétrico é estimado em 260 GW com, até o momento, uma capacidade instalada de 97 GW, correspondente a 15% da Matriz Energética Brasileira. Apesar da capacidade instalada representar somente 37% do potencial estimado, a maior parte do potencial hidrelétrico economicamente viável já foi utilizada devido às dificuldades em obter financiamento para obras de grandes hidrelétricas e devido às resistências provenientes de impactos ambientais (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2007). Estas dificuldades fazem com que o país volte sua atenção para o uso de fontes não-renováveis, como a termo-elétrica, consumindo outros tipos de recursos ambientais que se acredita serem mais nocivos que das hidrelétricas. Estes impactos no consumo de recursos para geração de energia devem ser avaliados frente aos potenciais e às limitações que cada fonte apresenta, adotando estratégias que envolvam o conceito de sustentabilidade para reduzir o impacto ambiental.

Uma forma de evitar um grande impacto ao meio ambiente mantendo o suprimento de energia é diversificando este suprimento, com especial atenção às fontes limpas como gás natural para uso industrial. Este também pode ser usado em edificações residenciais e comerciais, que ainda podem optar por fontes renováveis como a energia solar, combinando o abrigo do homem social à sua permanência de forma sustentável na natureza. Estas são as edificações sustentáveis, que visam balancear o que é retirado e o que é devolvido ao ambiente. Dentre os conceitos que compõem uma edificação sustentável, destaca-se a racionalização do uso da energia através da eficiência energética. 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.

Programas que visam racionalizar o consumo de energia, água e o volume de resíduos, reduzem o impacto no meio ambiente, limitam o risco de interrupção do fornecimento de energia ou água e ampliam a vida útil de fontes de energia não-renováveis. Podem também reduzir a demanda de energia reduzindo o montante investido na ampliação das redes de fornecimento. Mas os benefícios econômicos e a qualidade de vida conseqüentes da eficiência energética nem sempre são contabilizados, assim como não costumam ser calculados os custos com saúde e segurança pública.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional- BEN (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2007), nos últimos anos houve um aumento da participação da energia elétrica no consumo final de energia no Brasil, chegando a 16,5% da oferta interna de energia desde 2005, o que representa em 2006, 460,5 TWh/ano. O consumo de energia elétrica dos setores residencial, comercial e público representa 44,6% do consumo de energia elétrica nacional, equivalente a 205 TWh/ano. Em edifícios comerciais e públicos – com e sem 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). 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). Dados semelhantes foram encontrados para edifícios públicos: 48% pelo condicionamento de ar, 23% pela iluminação, 15% de equipamentos de escritório e 14% devido a demais cargas, como bombas e elevadores (CORREIA, 2007b). Porém, levantamentos em Salvador mostraram que o consumo de energia em salas de edifícios de escritórios pode chegar a 70% para condicionamento de ar e 15% para iluminação (MASCARENHAS et al., 1988).

O consumo de energia em edificações está relacionado aos ganhos ou perdas de calor pelo envoltório da edificação 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 dos próprios sistemas de iluminação e equipamentos. Programas de eficiência energética para edificações devem incluir etapas que intervenham

no envoltório, atuando no projeto e construção da edificação, na eficiência dos sistemas de condicionamento de ar, na eficiência e potência instalada dos 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 de campanhas educativas para conscientizar profissionais da construção civil e o usuário da edificação.

Até 2001, não havia lei ou norma de eficiência energética em edificações no Brasil. A primeira lei referente à eficiência energética surgiu após um racionamento de energia: a Lei nº 10295 dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e foi regulamentada pelo Decreto nº 4059 de 19 de dezembro de 2001 que estabeleceu que deveriam ser criados “níveis máximos de consumo de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no País, bem como as edificações construídas”. Indicou também a necessidade de “indicadores técnicos e regulamentação específica” para estabelecer a obrigatoriedade dos níveis de eficiência no país. A partir do decreto foi criado um “Grupo Técnico para Eficientização de Energia nas Edificações no País” para propor uma forma de regulamentar as edificações construídas no Brasil visando o uso racional da energia elétrica (BRASIL, 2001b).

O estudo realizado sobre normalização em eficiência energética em países em desenvolvimento (DUFFIE, 1996) mostrou que no Brasil, normas e códigos de eficiência energética em todos os setores consumidores, incluindo transporte e agroindústria, poderiam acarretar economias de cerca de 1310 TWh em 20 anos (2000 a 2020), sendo que a Índia economizaria 1659 TWh em 20 anos, o México, que não possuía normas em 1996, 550 TWh, Filipinas, 234 TWh e Indonésia 421 TWh. Estas reduções podem ser traduzidas como uma economia de 12% no consumo de energia no Brasil e no México em 20 anos, de 11% na Índia e de 16% na Indonésia e nas Filipinas.

Este potencial de economia pode ser alcançado com dois tipos de políticas públicas para eficiência energética implementados de normas e regulamentações: leis obrigatórias e programas de certificação. Leis obrigatórias em eficiência energética geralmente visam estabelecer uma eficiência mínima acima da qual qualquer edificação é aprovada atendido o seu caráter prescritivo, como limites de desempenho através de indicadores. Já a

certificação é um mecanismo de mercado que visa promover a eficiência energética de uma edificação de elevado desempenho ao compará-la ao mínimo obrigatório (CASALS, 2006).

Em qualquer regulamentação ou estudo de eficiência energética, os níveis de eficiência estão relacionados ao consumo de energia da edificação. Chung et al. (2006) mostrou que o consumo de energia, ou a intensidade energética (consumo de energia pela área), não é suficiente para descrever a eficiência de uma edificação que está submetida a inúmeras variáveis, algumas delas extremamente subjetivas como os hábitos de uso dos consumidores. McBride (1995), Florides et al. (2002), Jacob e Madlener (2003), dentre outros, avaliaram a eficiência energética verificando a relação entre o consumo de energia e os custos da edificação. Diversas normas também foram elaboradas 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.

A elaboração de normas, regulamentações e programas de eficiência energética é uma experiência já realizada em diversos outros países. É interessante conhecer a prática legal e técnica através das quais países como os EUA, Portugal, Austrália e México elaboraram, aprovaram e implementaram suas políticas de eficiência energética. Entretanto, os parâmetros e limites de eficiência definidos para outros países foram baseados em realidades distintas às brasileiras: nos EUA, as normas de eficiência são usadas há cerca de 30 anos e já houve adaptação progressiva da indústria construtiva aos padrões de eficiência. Já a Austrália, cujas regulamentações de eficiência energética são mais recentes, lida com uma realidade econômica e padrões construtivos (materiais e tecnologias) distintos dos padrões brasileiros. Em todos os casos, afirma-se que os parâmetros definidos nas normas são baseados em critérios econômicos, muitos deles baseados também em simulação, mas a metodologia de avaliação das edificações não é divulgada; somente os resultados e os dados de entrada mais relevantes são publicados.

A Standard 90.1 (ASHRAE, 2004), norma dos EUA para edificações eficientes envolvendo todas as atividades não industriais exceto as residenciais unifamiliares, é um exemplo de

uma norma cujos protótipos para simulação foram baseados em um levantamento nacional de edificações que possui atualização quinquenal (CBECS, 2003). No Brasil, não há informação semelhante que reúna as características e componentes que interferem no consumo de energia e que sejam mais comuns na indústria da construção civil. Até o momento, foi executada apenas uma pesquisa de mercado sobre o uso da energia em edificações que promete fornecer informações sobre as características de edificações comerciais e públicas. No entanto, no início deste estudo, no ano de 2004, a pesquisa de mercado não havia iniciado, e ainda é aguardada a publicação do relatório final com dados sobre a arquitetura (CORREIA, 2007a, CORREIA, 2007b e SOUZA, 2007). Levantamentos desta natureza são necessários para subsidiar o desenvolvimento deste trabalho, fornecendo dados necessários para que a metodologia proposta seja baseada na realidade construtiva nacional.

Uma das conseqüências da Lei nº 10295 e do Decreto nº 4059 (BRASIL, 2001a) foi o fortalecimento do Procel, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, que 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. Dividido em seis vertentes de ação, o programa visa construir as bases necessárias para racionalizar o consumo de energia de edificações no Brasil. As vertentes são:

1. Arquitetura Bioclimática;
2. Indicadores Referencias para Edificações;
3. Certificação de Materiais e Equipamentos;
4. Regulamentação /Legislação;
5. Remoção de Barreiras à Conservação de Energia Elétrica; e
6. Educação.

A vertente 4, de Regulamentação/Legislação, está dividida em 5 projetos, que são:

- 4.1. Determinação de parâmetros referenciais para edificações – a Envoltória do Edifício;

- 4.2. Promoção de ações para determinação de indicadores referenciais para edificações – os equipamentos;
- 4.3. Estudo de Critérios para a ligação definitiva da edificação pela concessionária de energia elétrica;
- 4.4. Critérios para concessão de Financiamentos pela Caixa Econômica; e
- 4.5. Projeto de Lei Federal.

A determinação dos parâmetros referenciais para o envoltório da edificação é a principal motivação desta tese, ainda reforçada pela intenção do Procel de promover um projeto de Lei Federal para a eficiência da edificação. O item 4.1 visa estabelecer os índices mínimos de eficiência energética do envoltório de uma edificação e resultou na aprovação, no ano de 2007, da Regulamentação para Etiquetagem Voluntária de Nível de Eficiência Energética em Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas. Com previsão de implementação em 2008, entende-se que a regulamentação irá estimular a construção de edificações eficientes através da exploração da “imagem” que poderão ter no mercado da construção civil. Composta de três partes principais, abrange requisitos para o envoltório, o sistema de iluminação e o sistema de condicionamento de ar. Permite uma classificação que varia de A (mais eficiente) a E (menos eficiente), definidos para cada sistema individualmente que, somados através de seus pesos, indicam o nível de eficiência global do edifício.

Concluindo, a necessidade de se estabelecer um método de avaliação da eficiência energética de edificações brasileiras a fim de desenvolver parâmetros para uma regulamentação nacional advém:

- das restrições ambientais exigidas pelas mudanças do comportamento do homem social contemporâneo no meio onde vive;
- das restrições a que o modelo energético nacional está submetido devido à redução do seu potencial de geração de energia e que exige investimentos crescentes em outras tecnologias;
- de uma Lei Federal que exige que indicadores e parâmetros de eficiência energética sejam estabelecidos para edificações brasileiras; e

- do Plano de Ação do Procel que está estabelecendo as bases para implementação de programas de eficiência energética em diversos setores produtivos do país.

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

Elaborar metodologia de avaliação da eficiência energética do envoltório de edificações comerciais e institucionais condicionados artificialmente.

1.2.2. Específicos

- Criar base de dados de características tipológicas de edificações pertencentes a cinco atividades comerciais e duas atividades institucionais;
- Elaborar protótipos representativos das atividades comerciais e institucionais para simulação do desempenho energético no Energy Plus;
- Desenvolver equação para avaliação da eficiência do envoltório;
- Avaliar indicadores para a eficiência energética do envoltório;
- Estabelecer critérios que promovam a avaliação da eficiência energética do envoltório de edificações para as atividades citadas.

1.3. Estrutura

A tese apresentada possui uma estrutura atípica. O Capítulo 2 consiste na Revisão Bibliográfica, apresentando o estado da arte no desenvolvimento de normas e de critérios relacionados à eficiência energética em edificações, incluindo uma revisão sobre indicadores de eficiência relacionados aos custos de implementação de medidas mais eficientes. Em seguida, os Capítulos 3 e 4 contêm, cada um, a introdução, metodologia, resultados e considerações finais. Tal divisão foi necessária devido aos resultados parciais do Capítulo 3 serem necessários para a metodologia do Capítulo 4. Assim, o Capítulo 3 dedica-se ao Estudo de Campo, apresentando a metodologia de coleta de dados para, em seguida, apresentar os resultados parciais de características tipológicas de edificações que geram modelos representativos de edificações. Estes modelos representativos, resultados

parciais do Capítulo 3, são utilizados na metodologia do Capítulo 4, que discute a metodologia e os resultados finais relacionados à simulação, ao desenvolvimento de equações e às análises de custos provenientes dos benefícios provenientes da eficiência energética do envoltório. Já o Capítulo 5 apresenta a conclusão, e é acompanhado das Referências Bibliográficas e, por fim, dos Anexos citados ao longo do texto.

CAPÍTULO 2.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Legislação em Eficiência Energética

As primeiras normas de eficiência energética em edificações surgiram na década de 70, após a crise do petróleo. 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.

Atualmente, EUA, Canadá, México, Portugal, Espanha, Austrália, Nova Zelândia, Singapura, Hong Kong, Filipinas, dentre 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 leis a fim de atender ao Protocolo de Quioto, de 1997. O Protocolo é o documento final da Convenção das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas que regula a emissão de gases na atmosfera, responsáveis pelo efeito estufa. Como meta, espera-se que, até 2012, os gases que provocam o efeito estufa e que são emitidos na atmosfera pelos países que geram um total de 55% das emissões de gases do planeta sejam reduzidos em 5,2%.

Botswana, Irã, Paraguai, Costa Rica, dentre outros, não possuem qualquer tipo de norma em eficiência energética em edificações (JANDA & BUSH, 1994), sendo que a primeira lei brasileira relativa à eficiência energética em edificações foi finalmente publicada em 2001, durante o racionamento de energia elétrica (BRASIL, 2001a).

2.1.1. Estados Unidos

O *Energy Policy Act* foi criado nos EUA para regular o uso de combustíveis fósseis para geração de energia a fim de reduzir a dependência do petróleo internacional. Foi posteriormente ampliado para o *Energy Policy and Conservation Act*, em que exigia que os códigos estaduais de edificações comerciais americanos atendessem à *Standard 90.1* (ASHRAE, 2004) ou que especificassem parâmetros mais rigorosos para a eficiência energética destas edificações. Sua última versão é a de 2005.

Atualmente, 43 estados adotam a *Standard 90.1* ou versões anteriores para edificações comerciais, 2 adotam o *Model Energy Code* e os outros estados têm regulamentações próprias, que podem ser adaptações de uma destas normas. Um dos estados que criaram

sua própria regulamentação é a Califórnia, com seu código para edificações conhecido como *Title 24*. O conteúdo destes instrumentos de políticas públicas é descrito a seguir.

Title 24 - California

A *Title 24, Californian Building Code* faz parte de um dos 26 códigos do *California Code of Regulations*, elaborada pela primeira vez em 1978. De atendimento obrigatório, uma nova edificação na Califórnia deve atender a requisitos obrigatórios referentes ao seu envoltório e aos seus sistemas de aquecimento de água, de condicionamento de ar e de iluminação, podendo optar por um método prescritivo ou um método de avaliação do desempenho térmico da edificação. O método prescritivo indica limites máximos ou mínimos de resistência térmica, transmitância térmica e fator solar de materiais ou componentes do envoltório em função da massa do componente ou de sua orientação geográfica. Já o método de avaliação do desempenho compara o desempenho da edificação proposta com o de uma edificação similar cujas características atendem aos métodos prescritivos através de cálculos ou de simulação computacional. Equipamentos e sistemas de condicionamento de ar também devem ser selecionados e projetados através de cálculos ou de um programa computacional. E o sistema de iluminação artificial deve ter uma densidade de potência de iluminação limitada calculada por um dos três métodos: um limite para a edificação inteira, um limite para cada ambiente de acordo com a atividade desenvolvida ou um limite ponderado por pesos de acordo com a área de piso para atividades específicas (CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2001).

A *Title 24* é revisada periodicamente. Após 28 anos de atuação, ela atingiu um estágio que exige que edificações não-residenciais instalem (NATIONAL ENVIRONMENTAL EDUCATION & TRAINING FOUNDATION, 2003):

- coberturas “frias”, ou seja, de alta reflexão e com isolamento térmico, a fim reduzir em 10° C a temperatura de superfície da cobertura e em 20% os custos com o condicionador de ar;
- controle automático de liga-desliga na iluminação artificial em ambientes atendidos por iluminação zenital;
- e um sistema de iluminação artificial mais eficiente.

A última atualização, de 2005, visa economizar mais 180 MW da carga de pico anual em relação à versão anterior, de 2001. Vale lembrar que em 1998 foi expedido um alerta energético para redução do consumo de energia pelos grandes consumidores sob risco

de um colapso no sistema energético do estado (CALIFORNIA ENERGY COMMISSION STAFF, 1999), razão pela qual as exigências na *Title 24* tornaram-se ainda mais rigorosas.

Standard 90.1 - ASHRAE

A *Standard 90 – Energy Conservation in New Building Design* foi a primeira norma de eficiência energética em edificações, elaborada como parte do programa dos EUA de incentivo à eficiência energética. Ela evoluiu para a *Standard 90.1*, para edificações não-residenciais e a *Standard 90.2*, para edificações residenciais (ASHRAE, 2004).

Em 1989, a ASHRAE apresentou sua norma de eficiência energética para edificações exceto para edificações não-residenciais, a *Standard 90.1 – Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings* (ASHRAE, 1989), baseada no OTTV (*Overall Thermal Transmittance Value*), um índice de avaliação da transmissão de calor do ambiente externo para o interno através do envoltório da edificação.

Em 1999, a *Standard 90.1* (ASHRAE, 1999) foi renovada com modificações significativas, abandonando o OTTV e utilizando um método prescritivo, sistema de permutação (*trade off*) e o *Energy Cost Budget*. O método prescritivo indica limites máximos ou mínimos de transmitância térmica de elementos opacos e transparentes, resistência térmica de isolamentos e fator solar de vidros de acordo com a área de janela na fachada e orientação solar. Estes limites são ainda divididos em edificações não-residenciais e edificações residenciais acima de dois pavimentos. O método de permutação permite que limites de eficiência que tenham ultrapassado os limites do método prescritivo possam ser compensados por outros parâmetros mais rigorosos que o mínimo. O *Energy Cost Budget* baseia-se na simulação computacional do consumo de energia de dois modelos, cujos custos provenientes do consumo de energia são comparados. Um modelo deve seguir os parâmetros indicados no método prescritivo e os custos de seu consumo não podem ultrapassar os custos do modelo de projeto, definido de acordo com o projeto de edificação a ser aprovado. Assim como a versão de 1989, aborda o envoltório da edificação, sistemas de ar condicionado, iluminação artificial e aquecimento de água, incluindo ainda motores e equipamentos. Os climas são classificados através dos graus dia para resfriamento e aquecimento, relacionando cada clima a uma tabela com as prescrições limites para componentes opacos e transparentes (ASHRAE, 2004).

A *Standard 90.1* (ASHRAE, 2004) propõe limites de propriedades térmicas de componentes construtivos e características do envoltório também para oito cidades brasileiras. Quanto à transmitância térmica, não há diferenças significativas para os diversos climas do Brasil, seja em paredes leves compostas de painéis de madeira ou paredes com massa térmica, como a parede de tijolos de 6 furos com revestimento de argamassa. No entanto, há diferenças entre os fatores solar indicados pela *Standard 90.1* (ASHRAE, 2004). Esta apresenta o fator solar para janelas verticais orientadas a norte, leste e oeste, com limites diferenciados para a orientação sul. Em todos os casos, a concordância à *Standard 90.1* (ASHRAE, 2004) para edificações que ultrapassem um WWR (*Window to Wall Ratio*, ou Percentual de Área de Janela na Fachada – PJF) de 50% só é realizada através de simulações do *Energy Cost Budget*, sem especificações pelo método prescritivo.

Como a *Standard 90.1* apresenta requisitos para eficiência mínima, ela não distingue o impacto do envoltório, da iluminação e do condicionador de ar no consumo de energia. Todos são tratados em capítulos separados e são desvinculados quando adotado o método prescritivo. Se atendido o mínimo, este método permite o uso de um envoltório extremamente eficiente com um sistema de condicionamento de ar de eficiência mínima, ou um sistema de iluminação eficiente com um envoltório de eficiência mínima. Assim, apesar do nivelamento do nível de eficiência, sua estrutura permite que incongruências sejam aprovadas, sem incentivos para um investidor interessado nos benefícios de uma edificação eficiente.

Para sanar esta deficiência, o apêndice G da versão de 2004 apresentou um método de simulação e classificação de edificações cuja eficiência esteja acima do mínimo exigido. Desta forma, esta versão inovou em relação às anteriores ao ampliar os objetivos da *Standard 90.1* fornecendo bases de classificação da eficiência acima da eficiência mínima tradicional (ASHRAE, 2004).

International Energy Conservation Code

O *International Energy Conservation Code* (IECC) é uma publicação trienal que reúne o conteúdo do *Model Energy Code* (MEC) para edificações residenciais e referencia a *Standard 90.1* (ASHRAE, 2001) para edificações não-residenciais. Fornece ainda um método alternativo de atendimento ao código visando facilitar a provação de edificações mais simples, cujo PJF (WWR) é menor que 50% (LUCAS & MEYERS, 2000).

O IECC excetua edificações não condicionadas de atender aos requisitos para o envoltório, porém não as dispensa de atender aos requisitos para o sistema de iluminação. O capítulo 7 da versão de 1998 apresenta um método alternativo à *Standard 90.1*, “projetos com práticas aceitáveis” para o envoltório de edificações com P_{JF} menor que 50%. Especifica limites de resistência térmica para o isolamento de acordo com os componentes opacos em que estão instalados e de fator solar e transmitância térmica para componentes transparentes e translúcidos considerando a existência de sombreamento através do fator de projeção (OFFICE OF THE AUSTRALIAN BUILDING CODES, 2000). Na versão de 2000, o capítulo de práticas aceitáveis passou a ser aplicado para todo o tipo de edificação não comercial, abolindo a condição da edificação ter menos de 4 pavimentos. Desta forma, tanto a *Standard 90.1* quanto as práticas aceitáveis podem ser adotadas para aprovação pelo IECC. Isto acarreta situações conflitantes já que há especificações distintas entre *Standard 90.1*, já na sua versão de 2001, e o capítulo 8 do IECC, que foi balizado com as especificações da versão de 1999.

2.1.2. Canadá

Os códigos canadenses são formulados pelo *National Research Council* e propostos para adoção pelos estados. O código proposto pelo NRC é o *Model National Energy Code of Canada for Buildings*, indicado para todas as edificações que não se enquadram no *Model National Energy Code of Canada for Houses*, incluindo edificações residenciais verticais (acima de 3 pavimentos) e edificações não-residenciais. Baseia-se em extensivas análises de custo benefício, considerando clima, tipos de combustíveis, custos da energia e custos na construção.

É composto pelos requisitos obrigatórios para o envoltório, iluminação artificial interna e externa, condicionamento do ambiente e sistema de aquecimento de água. Após atendidos os requisitos obrigatórios, pode-se optar por utilizar o método prescritivo ou o método de desempenho da edificação.

Para o envoltório, o método prescritivo pode ser utilizado através de tabelas ou permutação. As tabelas indicam limites para a transmitância térmica de componentes opacos e transparentes, estes últimos em função de sua área na fachada, e ambos em função da fonte de energia utilizada para aquecimento da edificação: eletricidade, gás natural ou combustível fóssil. A permutação entre os materiais que formam os componentes do envoltório pode ser realizada com base em cálculos ou em um

programa computacional. Para os demais sistemas da edificação, são apresentados métodos de cálculo para estimar as densidades de potência interna da iluminação e para projetar os sistemas de condicionamento de ar e de aquecimento de água.

O segundo método, de desempenho da edificação, requer uma estimativa do custo do consumo anual de energia da edificação proposta que seja menor do que o custo de um consumo pré-estabelecido. Possibilita então que um consumo “alvo” seja visado, e fornece fatores de ajuste para diferentes fontes de energia e climas (OFFICE OF THE AUSTRALIAN BUILDING CODES, 2000).

2.1.3. México

A norma mexicana para edifícios não-residenciais NOM 008 de 1995 foi atualizada em 2001. Ela eliminou a opção prescritiva, mantendo somente a opção de cálculo dos ganhos térmicos do edifício proposto, que não devem ultrapassar os ganhos térmicos do edifício de referência na situação de verão/primavera. A edificação de referência deve ser semelhante à proposta, porém com um PJF de 40%, coeficiente de sombreamento (*shading coefficient*) igual a 1, além de outras características que variam de acordo com o clima.

Após construída, a edificação deve apresentar uma etiqueta de eficiência energética no seu hall de entrada com a razão entre o seu ganho térmico global e o ganho térmico global da edificação de referência (COMISIÓN NACIONAL PARA EL AHORRO DE ENERGÍA, 1995 e COMISIÓN NACIONAL PARA EL AHORRO DE ENERGÍA, 2001).

2.1.4. União Européia

Considerando que 50% dos recursos energéticos consumidos pela União Européia são de fontes externas e que eles tendem a alcançar um patamar de 70% em 20 ou 30 anos, foram estabelecidas diversas medidas para reduzir esta dependência e preservar os recursos e o clima mundial. O Protocolo de Quioto e a meta de produção de 12% do consumo interno bruto através de fontes renováveis até 2010 (COMISSÃO EUROPÉIA, 1998) resultaram na revisão de normas de eficiência energética em edificações e em programas como o “Energia Inteligente – Europa de 2003 a 2006”, que “apoiará o desenvolvimento sustentável no contexto da energia” (PARLAMENTO EUROPEU e CONSELHO, 2003).

O processo de normalização de edificações eficientes consistiu em criar um quadro comum para a melhoria do rendimento energético, unificando as normas dos países da União Europeia segundo a Diretriz para Melhoria do Rendimento Económico dos Edifícios na Comunidade Europeia. Ela propõe que os países integrem, em suas leis, aspectos como (PARLAMENTO EUROPEU, 2002):

- elaboração de um quadro geral para uma metodologia comum de cálculo de rendimento energético integrado;
- aplicação de requisitos mínimos de eficiência energética para novos edifícios e para grandes edifícios sujeitos a reformas;
- certificação energética de edifícios;
- normas específicas para organismos públicos.

A partir das premissas estabelecidas, alguns países membros revisaram suas normas de edificações eficientes. Dois casos de países membros da União Europeia são mostrados a seguir: Espanha e Portugal, países mediterrâneos que apresentam características de resfriamento e aquecimento, assim como o Brasil.

Espanha

Dois métodos são utilizados para a norma *Condiciones Térmicas em los Edifícios*, CTE: uma opção simplificada e uma opção de avaliação geral. Casals (2006) critica a nova proposta, afirmando que a opção simplificada utiliza um indicador inapropriado para o envoltório, com coeficientes de transferências de calor em regime estacionário para cada componente (sem considerar radiação solar). Este indicador não quantifica o consumo da edificação e não considera o período de resfriamento. Da mesma forma, considera a opção geral incorreta. Esta compara a demanda energética do envoltório à uma de uma edificação de referência. Esta demanda é calculada através de um método que não desvincula a edificação da sua volumetria, o que pode não descrever o desempenho energético corretamente. Ele mostra que a nova regulamentação só é mais rigorosa para edificações com um baixo fator de forma, pois o método gera uma comparação errônea da volumetria da edificação de referência com a da edificação proposta. Casals (2006) critica também o desestímulo às estratégias passivas de resfriamento e aquecimento. De resfriamento, devido à pequena atenção dada ao período do verão e, de aquecimento, por adotar um método simplificado em detrimento da complexidade do método geral, indicado para edificações com estratégias passivas.

Estas críticas se mostram preocupantes quando ele compara o consumo de energia primária permitidos por esta proposta e pela norma alemã: a CTE vai permitir um consumo de energia primária de até 400 kWh/m²/ano, enquanto na Alemanha, um país com um clima mais rigoroso, permite um limite de até 80 kWh/m²/ano. Por fim, ele afirma que uma norma deveria ser elaborada usando um indicador de consumo/hab/ano. No entanto, devido a problemas sócio-políticos que tal proposta poderia resultar, propõe a adoção da intensidade energética para, no futuro, migrar para este outro indicador (CASALS, 2006).

Portugal

Baseado nas diretrizes europeias (PARLAMENTO EUROPEU, 2002) e nas resoluções do Protocolo de Quioto, que regula a emissão de gases na atmosfera, Portugal lançou o Programa E4, Eficiência Energética e Energias Endógenas¹ no ano de 2001. O programa visa promover a “melhoria da eficiência energética (...) cobrindo todos os tipos de consumo,” como aquecimento de água, iluminação, equipamentos e envoltória e promover “o recurso às energias endógenas nos edifícios, criando meios (...) que facilitam a penetração das energias renováveis”, como energia solar e fotovoltaica. O E4 pretende aglutinar as medidas que promovem eficiência energética nas edificações portuguesas (DIRECÇÃO GERAL DE ENERGIA, 2002a), que incluem:

- revisão da norma térmica de 1991, o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) e a norma de climatização Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios de 1998 (RSECE), que entraram em vigor em 2006;
- introdução do programa de certificação energética de edifícios;
- promoção da certificação energética das edificações públicas como exemplo à população.

Do programa E4 surgiu o Programa Nacional para a Eficiência Energética nos Edifícios (P3E) de Portugal, do qual foram reformuladas as normas técnicas de desempenho térmico e de eficiência energética de edificações, respectivamente o Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios, RCCTE, e o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios, RSECE. O programa também

¹ Energias endógenas: energias renováveis (aquecimento solar, fotovoltaica) e novas tecnologias energéticas (micro-turbinas para micro-geração, células a combustível, etc...).

instituiu a certificação obrigatória da eficiência das edificações e a qualificação técnica de profissionais.

O RCCTE aplica-se a edificações residenciais e de pequeno porte que não contenham sistemas de climatização. Possui novos requisitos de isolamento térmico, onde o objetivo foi duplicar as espessuras de isolamento das paredes e coberturas para garantir coeficientes de transmissão térmica 40% menores do que os atuais. Também adotou vidros duplos nas zonas climáticas mais frias e nas orientações sem significativos ganhos de calor por radiação. Estabeleceu novos métodos de cálculo, considerando necessidades de energia primária a partir das necessidades de aquecimento e resfriamento e tornou o uso de energia solar para aquecimento de água obrigatória quando atendidas condições pré-determinadas (GONÇALVES, 2006).

É interessante ressaltar que a Diretriz Européia (PARLAMENTO EUROPEU, 2002) prevê que devem atender às novas normas as reformas cujos custos sejam no mínimo 25% do valor do custo de construção daquela mesma edificação.

Já o RSECE, para edificações climatizadas, deve atuar não somente na fase de projeto, mas também na fase de uso, exigindo mecanismos de regulação e controle dos sistemas consumidores de energia e gestão da energia obrigatórios para sistemas de climatização cuja potência instalada é superior a 25 kW. De fato, equipamentos de climatização cuja potência elétrica nominal é superior a 12 kW devem possuir registro individual de consumo de energia. As auditorias deverão garantir que o consumo de energia da edificação não ultrapasse um limite considerado excessivo para cada tipologia, usando o Indicador de Eficiência Energética. Ele é a média dos indicadores dos 3 últimos anos anteriores à auditoria e considera apenas os requisitos relacionados à eficiência de sistemas de climatização. Os requisitos do envoltório devem ser atendidos usando o RCCTE (DIRECÇÃO GERAL DE ENERGIA, 2002b e PORTUGAL, 2006).

O programa P4 lançou também um programa obrigatório de certificação energética para edificações, que visa informar ao usuário sobre as características térmicas do imóvel e ao consumidor sobre potenciais medidas para melhoria da eficiência energética daquela edificação. Os certificados têm validade limitada e devem ser renovados no caso de transferência de propriedade. A Figura 1 apresenta o modelo do certificado para edificações, semelhante às etiquetas para eletrodomésticos, abrangendo pontuações de H (menos eficiente) a A (mais eficiente), envolvendo também as emissões de CO₂ na atmosfera (DIRECÇÃO GERAL DE ENERGIA, 2002b). O programa de certificação de edifícios comerciais entra em vigor em 2008 e, a partir de 2009, a apresentação do

certificado será obrigatória para o aluguel ou venda do imóvel (MALDONADO e NASCIMENTO, 2006).

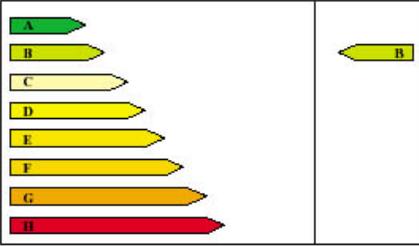
NOME/LOGO DA ENTIDADE ACREDITADA	SÍMBOLO DO SPQ
Edifício/Fração:	Aquecimento <input type="checkbox"/> Tipo: _____
Morada:	Arrefecimento <input type="checkbox"/> Tipo: _____
Área Útil de Pavimento:	AQS <input type="checkbox"/> Tipo: _____
Data de Emissão do Certificado:	Iluminação <input type="checkbox"/> Tipo: _____
	
Consumo Energético: _____ kWh/m ² .ano Emissões de CO ₂ : _____ ton/ano	
Válido até: _____	Assinatura do Director Técnico (Selo Branco)

Figura 1 – Modelo de etiqueta de eficiência energética em Portugal.

2.1.5. Austrália

Na Austrália, há um órgão central com poder para regular edificações, porém cada estado ou província tem o poder de adotar sua própria regulamentação. O *Building Code of Austrália*, elaborado pelo *Australian Building Code Board* é referenciado por todos os estados e províncias, com pequenas variações entre si. Entretanto, apenas dois estados possuem apêndices com requisitos de eficiência energética, limitando a resistência térmica de materiais utilizados somente em edificações residenciais (AUSTRALIAN BUILDING CODES BOARD, 2004).

Emendas no BCA para a eficiência energética de edificações comerciais e institucionais incluíram programas de redução da emissão de gases na atmosfera, atendendo ao Protocolo de Quioto. Os parâmetros de eficiência foram inseridos no padrão em que o BCA está estruturado. Requisitos de desempenho foram atendidos de acordo com a escolha dos materiais e componentes da edificação, através de exemplos de materiais e componentes que satisfazem ao nível exigido pelo código. Uma solução alternativa indica outros métodos que podem ser usados para mostrar que os materiais e componentes do projeto atendem ao nível de desempenho pré-estabelecido, permitindo testes em laboratórios, cálculos avaliação de peritos ou certificação para comprovar o

desempenho dos materiais (AUSTRALIAN BUILDING CODES BOARD, 2004).

O programa de certificação australiano é voluntário e referencia a emissão de CO₂ na atmosfera para definir o desempenho da edificação, variando de um mínimo de uma até cinco estrelas. Os dados de entrada são bastante simplificados para avaliações instantâneas via programa computacional conectado à internet, mas a certificação oficial exige inspeções e avaliações detalhadas.

2.1.6. Hong Kong

O Código de Obras de Hong Kong de 1995 (HONG KONG GOVERNMENT, 1997) indica que a edificação deve atender a um OTTV indicado no *Code of Practice of OTTV for Buildings* (BUILDING AUTHORITY OF HONG KONG, 1995) para edificações comerciais e hotéis. O Código de Obras de Hong Kong (HONG KONG GOVERNMENT, 1997) define edificações comerciais como sendo escritórios, lojas, lojas de departamentos, ambientes de entretenimento coletivo, restaurantes, outras edificações com objetivos de comércio exceto hotéis, edifícios industriais, escolas, estacionamentos, locais de armazenamento e edificações como sub-estações e similares. As variáveis consideradas no cálculo do OTTV são: área de superfícies opacas, transparentes e total, coeficiente de sombreamento da superfície transparentes, fator solar, diferença de temperatura equivalente da superfície opaca, absorvidade e transmitância térmica da superfície opaca, sendo as superfícies opacas paredes ou coberturas e as transparentes, aberturas envidraçadas verticais ou zenitais (HONG KONG GOVERNMENT, 1997).

No ano de 2000, o Código foi renovado a fim de estabelecer novos e mais rigorosos limites de OTTV, sendo diferenciados para duas volumetrias: as que se assemelham a torres (verticais) e as que se assemelham a pódios (horizontais) (HONG KONG GOVERNMENT, 2000).

2.1.7. Considerações finais

Em geral, as normas de eficiência energética de edificações não-residenciais apresentam duas abordagens: uma prescritiva e outra por desempenho. Costumam apresentar ainda uma abordagem alternativa, que pode envolver um sistema de trocas ou avaliações específicas por profissionais devidamente qualificados.

A abordagem prescritiva estabelece limites ou indica soluções que atendem ao exigido para aprovação da edificação proposta, envolvendo propriedades físicas dos

componentes do envoltório, como transmitância térmica, fator solar de vidros e resistência térmica de isolamentos. Para sistemas de iluminação artificial, geralmente estabelecem limites de densidade de potência de iluminação. Este método é adotado em diversas normas, como no Reino Unido e nos Estados Unidos, com a *Standard* 90.1.

O sistema de trocas é uma solução que flexibiliza o uso de materiais e soluções prescritas, geralmente acompanhada de procedimentos específicos de cálculo para proceder à permuta, como na norma do Canadá.

Já a abordagem por desempenho foca as perdas de calor pelo envoltório, o desempenho global da edificação ou o seu consumo de energia. As formas de adotar esta abordagem variaram, sendo as mais comuns:

- métodos de cálculo para comparação com limites pré-estabelecidos;
- métodos de cálculo ou simulações para comparações do desempenho térmico ou energético de uma edificação proposta com um modelo que atende à abordagem prescritiva.

Para realizar a simulação, as normas indicam programas específicos ou que atendem a determinados pré-requisitos, como no caso de atendimento ao BESTEST (ASHRAE, 2001). Mesmo as abordagens por desempenho que focalizam as trocas globais do envoltório, como a norma Espanhola e a de Hong Kong, ou as abordagens que utilizavam a simulação do desempenho térmico, como a *Standard* americana, lidaram com variáveis em comum que participam das trocas térmicas entre a edificação e o seu meio externo.

É importante citar que as normas descritas estabelecem parâmetros que descrevem a eficiência mínima da edificação, não se tratando especificamente de edificações eficientes, mas sim evitando a prática de construção de edificações energeticamente ineficientes. O próximo item apresenta uma revisão sobre os fatores envolvidos na eficiência energética de uma edificação, seja ela mínima ou não.

2.2. Edificações Energeticamente Eficientes

2.2.1. Características que indicam a eficiência

O consumo de energia é função de variáveis que utilizam diretamente a energia, como os sistemas de iluminação artificial, de equipamentos e de condicionamento de ar, e de variáveis que interferem nestes sistemas, como partes do envoltório da edificação e a forma de uso de tais sistemas consumidores de energia. 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. As características do envoltório que podem aumentar ou minimizar os ganhos de calor são as cores do envoltório, as propriedades térmicas de materiais e componentes como vidros, paredes e coberturas, e a exposição ao ambiente externo, como a ausência de sombreamento ou o contato de grandes superfícies do edifício com o exterior. As características do envoltório 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) elaborou 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. Das variáveis utilizadas nas equações, cinco são relacionadas ao envoltório da edificação, e baseiam-se em componentes presentes na construção civil brasileira (SIGNOR et al., 2001). As variáveis são:

- A_{cob}/A_{total} (razão de área do telhado pela área total);
- $A_{fachada}/A_{total}$ (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);
- U_{cob} (transmitância térmica da cobertura);
- α_{cob} (absortância do telhado à radiação solar) e

- ILD (densidade de carga interna: iluminação, equipamentos e ocupação).

Simulou 512 alternativas para cada cidade, com dois valores extremos, um máximo e um mínimo, para cada variável a fim de detectar a variação do consumo. Parâmetros que não apresentavam relações lineares, como a transmitância térmica da parede, foram excluídos. Sabendo que as variáveis influem no consumo tanto isoladamente quanto combinadas, estas foram trabalhadas até resultar em equações multi-variadas para estimativa do consumo de energia elétrica em edificações comerciais com coeficientes de determinação que variaram de 0,985 a 0,996 (SIGNOR et al., 2001).

Assim, foi desenvolvida a equação cuja estrutura é apresentada na Equação 1, com coeficientes variando para cada cidade. A Equação 1 consiste na equação de Signor et al. (2001) para a cidade de Salvador.

$$C = 0,80417 + 39,28823 \cdot A_{\text{cob}} / A_{\text{tot}} + 25,75737 \cdot ((A_{\text{cob}} \cdot U_{\text{cob}} \cdot \alpha_{\text{cob}}) / A_{\text{tot}}) + 28,81267 A_{\text{fac}}/A_{\text{tot}} + 150,55861 (A_{\text{fac}} \cdot \text{WWR} \cdot \text{SC}) / A_{\text{tot}} - 91,21731 \cdot (A_{\text{fac}} \cdot \text{WWR} \cdot \text{SC} \cdot \text{PF}) / A_{\text{tot}} + 7,41655 \cdot \text{WWR} - 5,95851 \cdot \text{WWR} \cdot \text{SC} - 1,90946 \cdot \text{PF} + 3,57086 \cdot \text{ILD} \quad (\text{equação 1})$$

Onde,

C, consumo anual de energia elétrica (kWh/m²/ano),

$A_{\text{cob}}/A_{\text{total}}$, razão de área do telhado pela área total;

$A_{\text{fachada}}/A_{\text{total}}$, 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;

U_{cob} , transmitância térmica da cobertura (W/m²K);

α_{cob} , absorvância do telhado à radiação solar e

ILD, densidade de carga interna ou *Internal Load Density* (W/m²).

A Equação 1 permite, dentre outras coisas, uma rápida avaliação da influência das variáveis no consumo de energia elétrica bem como um diagnóstico da relatividade de cada variável no consumo anual da edificação. É uma ferramenta didática para desenvolver o domínio sobre os efeitos destas variáveis no consumo de energia pela sua rapidez e flexibilidade, permitindo isolar algumas variáveis ou avaliar suas interdependências.

Entretanto, algumas variáveis estão ausentes ou simplificadas no modelo de Signor et al. (2001). O fator de projeção refere-se somente ao sombreamento de um dispositivo horizontal localizado na fachada das edificações. Dispositivos verticais, portanto, não estão incluídos no modelo. Ao contrário de Signor et al. (2001), Pedrini (2003) dividiu indicadores de proteções solares em dois ângulos de sombreamento. Há ângulos verticais para descrever um sombreamento de um dispositivo horizontal e ângulos horizontais, que descrevem dispositivos verticais de sombreamento. Usou também o fator solar ao invés do coeficiente de sombreamento. O fator solar, FS, cuja tradução para o inglês é *Solar Heat Gain Coefficient*, SHGC, inclui a transmissão solar direta e a absorvida pelo vidro (PEDRINI, 2003). O fator solar é descrito para diferentes ângulos de incidência da radiação solar, fornecendo mais informações sobre a transmissividade térmica do vidro em situações que o coeficiente de sombreamento não é capaz de descrever.

Apesar da transmitância térmica (U) de coberturas estar presente no modelo de Signor et al. (2001), a transmitância (U) de paredes foi excluída devido ao seu aspecto não linear. Carlo et al. (2003) mostrou a influência da transmitância térmica de paredes externas no consumo de anual de energia elétrica, que 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 do Salvador, Bahia, a Figura 2 mostra que 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/m²K e 1,70 W/m²K e entre 2,20 W/m²K e 3,00 W/m²K. 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.

Deve-se ressaltar que a depressão encontrada na curva das paredes pesadas necessita de maior investigação. Considerando as limitações do programa, acredita-se que este resultado, semelhante ao observado por Signor et. al (2001), deve ser investigado em simulações em programas mais recentemente desenvolvidos, cujos métodos de cálculo são mais avançados.

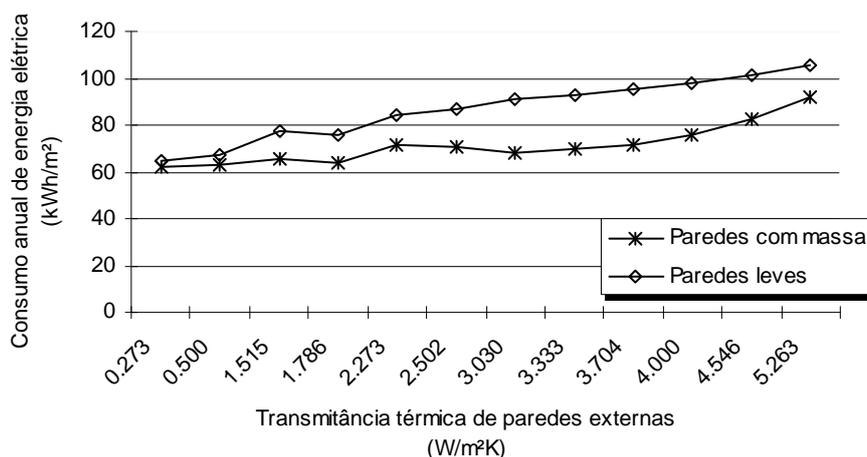


Figura 2 – Consumo de energia elétrica em função da transmitância térmica com paredes externas leves e pesadas. Fonte: CARLO et al., 2003

Também verificaram uma grande influência no aumento do consumo de energia pelo condicionador de ar decorrente de janelas orientadas a oeste, uma influência equivalente entre as janelas orientadas a norte e leste e uma menor influência das janelas orientadas ao sul no consumo de energia (CARLO et al., 2003).

Voltando a Signor et al. (2001), foram usados dois indicadores de volumetria para avaliar a edificação: área da cobertura pela área total de piso e área da fachada dividida pela área total de piso. Estes indicadores foram combinados obtendo-se quatro volumetrias diferenciadas, usando dois valores extremos para cada. Embora estes parâmetros indiquem a volumetria, a altura do pé direito foi mascarada por estar presente apenas como um dos parâmetros para cálculo da área da fachada.

Gonçalves et al. (2004) utilizaram diversos parâmetros construtivos para caracterizar habitações em Portugal de acordo com seu desempenho térmico, como transmitância térmica de paredes e coberturas, inércia dos elementos interiores e exteriores, dispositivos de proteção solar e características dos envidraçados. Além destes, caracterizou as habitações por parâmetros geométricos, como área útil de pavimentos, fração de vãos envidraçados em cada uma das fachadas, razão entre área de vãos e pavimento, razão entre a área do envoltório externa e o volume útil, que chamou de fator de forma, razão entre profundidade média e largura da edificação, definindo 16 diferentes tipologias de habitações, também em função da posição geográfica na cidade de Lisboa.

Observa-se que, enquanto Signor et al. (2001) usaram um indicador mais direto para o número de pavimentos (A_{cob}/A_{tot}), que facilita a visualização do tipo de edificação a que se refere, Gonçalves et al. (2004) adotaram um indicador bastante complexo, mas que

descreve satisfatoriamente a volumetria da edificação. A área do envoltório pelo volume da edificação (A_{env}/V) inclui parâmetros como a altura do pé direito do pavimento, e do próprio número de pavimentos, além de suas dimensões horizontais, tanto no denominador quanto no numerador. Estes dois indicadores parecem ser bastante apropriados para descrever a volumetria, o primeiro pela sua simplicidade e o segundo, pelos parâmetros que o compõem.

Sem dúvida, parâmetros que descrevem a geometria são relevantes devido à sua grande influência no consumo de energia de uma edificação. Depecker et al. (2001) descreveram a relação da forma e tamanho da edificação usando a relação área do envoltório por volume interno (A_{env}/V) a fim de verificar a influência da forma da edificação no consumo de energia para aquecimento em edificações francesas. Através de simulação, verificaram que, quão mais rigoroso é o inverno da região, maior a influência da forma no consumo de energia da edificação. Resta saber, a partir de qual intensidade o inverno é considerado rigoroso para aumentar a influência da forma da edificação sobre o seu desempenho energético, já que Pedrini e Lamberts (2003) mostraram que, também em climas quentes, o uso da forma está diretamente relacionado às características do envoltório. A edificação pode ter um desempenho melhor em climas quentes com uma forma alongada quando soluções arquitetônicas adequadas são utilizadas. No caso de não haver soluções que capturem a luz natural ou reduzam as cargas térmicas, perceberam que uma forma cúbica preserva a edificação de uma exposição excessiva às condicionantes ambientais.

Sobre o envoltório, também deve-se citar Pirró (2005) que, com um modelo computacional de quatro zonas, avaliou a influência de aberturas no desempenho térmico de edificações de escritório em São Paulo. Analisou área de janelas, tipos de vidro, proteções solares, além de cor das paredes externas cuja variação foi devido ao revestimento utilizado. Verificou que as maiores cargas térmicas encontravam-se na zona leste devido a ser a primeira a receber a radiação solar. No entanto, não alterou a forma da edificação, restringindo-se à simulação de um modelo de pavimento tipo onde o envoltório teve 39 variações. De fato, analisou 7 tipologias de edificações, cujas diferenças principais foram a área de janela e número de pavimentos, mas apenas para o estudo sobre custos envolvendo o sistema de condicionamento de ar. Desta forma, embora a análise acerca do envoltório tenha sido bastante completa, a forma da edificação não foi incluída como variável, restringindo-se à tipologia de pavimento tipo de edifícios empresariais de São Paulo, objeto da pesquisa.

2.2.2. Benchmarks e outros marcos de consumo

Apesar do amplo conhecimento sobre as variáveis da edificação que atuam no consumo, Meier et al. (2002) apontaram algumas dificuldades em se definir um indicador de eficiência e uma edificação eficiente em termos absolutos. No primeiro caso, costuma-se usar a intensidade energética, consumo por área (kWh/m²/ano), embora já haja casos do uso de consumo por ocupação (kWh/pessoa/ano) (CDM, 2002). O consumo de energia pela área de piso da edificação pode não representar adequadamente a eficiência, visto que esta pode ter uma grande quantidade de equipamentos ou um uso intensivo, e ainda ser eficiente. O contrário também ocorre: uma edificação com pouco uso pode aparentemente ser eficiente por consumir pouco em uma área equivalente, mesmo não possuindo características que a qualifique como eficiente. Estas características foram indicadas por Meier et al. (2002). Para ser eficiente, a edificação deve:

- possuir tecnologias que reduzam efetivamente o consumo de energia;
- prover as necessidades de uso ao qual é destinadao;
- ser operada de forma eficiente, evitando desperdícios.

A outra dificuldade para definir uma edificação eficiente é o método de análise adotado. Geralmente, a eficiência é identificada através da comparação entre duas edificações similares. Entretanto, se algumas características são muito diferentes, duas edificações podem não ser comparáveis. Características como volumetria, padrões de uso e temperaturas de *set point* devem ser conhecidas e padronizadas, mesmo que o foco da análise de eficiência seja o envoltório, por exemplo (OLLOFSON et al., 2004).

Para mais edificações, um nível de eficiência é definido através da formação de uma escala do consumo de edificações com atividades em comum, de onde podem ser estabelecidos marcos de eficiência, chamados de *benchmarks* (MEIER et al., 2002). Neste caso, mesmo que a volumetria das edificações seja bastante diferenciada, o grande número de amostras tende a diluir tais parâmetros. Cargas internas e padrões de uso estabelecem intervalos mais amplos para o indicador de eficiência, como consumo pela área (kWh/m²). Desta forma, o foco se concentra no uso da edificação, e a sua eficiência é classificada para atividades pré-definidas, como *benchmarking* para escritórios, *benchmarking* para lojas ou *benchmarking* para hotéis. Este método, no entanto, exige um grande número de amostras com representação significativa da população.

Federspiel et al. (2002) apontaram as premissas para definição de marcos de edificações eficientes (*benchmarking*), como a comparação do consumo entre uma edificação e seu marco de eficiência somente se estes tiverem características semelhantes, principalmente a atividade nela exercida. Assim, o consumo de uma edificação comercial considerada como um marco (*benchmark*) pode variar de acordo com a atividade nela desenvolvida, pois através da atividade, pode-se definir os equipamentos típicos e os padrões de uso.

Como outros países em que a regulamentação de eficiência energética em edificações já está avançada, Hong Kong avaliou os indicadores e marcos de consumo para edificações comerciais por atividade. O Código de Edificações de Hong Kong define que são edificações comerciais: escritórios, lojas, lojas de departamentos, locais de entretenimento de público, locais de agrupamento de público, restaurantes e quaisquer outras edificações utilizadas para fins comerciais, excluindo hotéis, edificações industriais, escolas, estacionamentos, locais de armazenamento e edificações de geração ou distribuição de eletricidade como usinas e subestações (HONG KONG GOVERNMENT, 1997). A avaliação visou obter indicadores de eficiência energética e *benchmarking* de edifícios comerciais de escritórios (A) e lojas de venda de mercadorias (B). Estes são divididos ainda em subgrupos, o dos escritórios de acordo com o uso e características do sistema de condicionamento de ar, e das lojas principalmente de acordo com o uso (supermercados, shoppings, restaurantes, etc). Foram realizados levantamentos de edificações e das características de seus sistemas (não inclui envoltória), definindo 2 tipos de indicadores: primários e secundários. Os indicadores primários referem-se ao consumo por área e ao consumo por pessoa e os secundários, a características da edificação como área de piso, ano de construção, clima e o gerenciamento dos sistemas da edificação, como controles de sistemas e equipamentos (*manageable indicators*) (CDM, 2002).

Para cada subgrupo, foram levantados 30 tipos de dados (*data sets*). 17 indicadores primários foram usados para desenvolver um modelo de regressão a fim de normalizar os seus efeitos, a princípio, de acordo com o clima. Foram então adotados os indicadores primários referentes ao consumo de energia por área de piso. Os indicadores secundários foram normalizados usando os primários já normalizados através de um modelo de regressão (*weather normalized indicator*) de forma que todos pudessem ser comparados e agrupados por grupo de atividade. Por fim, os resultados foram comparados com resultados de edificações internacionais semelhantes, considerando as

diferenças entre os climas de Hong Kong e das localidades internacionais (CDM, 2002). A partir destas informações, definiram as intervenções alvo nas edificações a fim de aumentar sua eficiência, de forma que 50% das edificações menos eficientes elevassem sua eficiência energética ao mesmo nível das 50% restantes, primeiramente alterando as características das edificações e em seguida, os indicadores secundários (CDM, 2002). O resultado final forneceu uma escala de eficiência como a mostrada na Figura 3, em que uma edificação que consome muito, em relação às edificações amostradas de mesma atividade e características, é considerada pouco eficiente. A ferramenta utilizada para gerar a Figura 3 está disponível para avaliações *online* no endereço eletrônico <http://www.hkiol.org/energy2/benchmark.htm>.

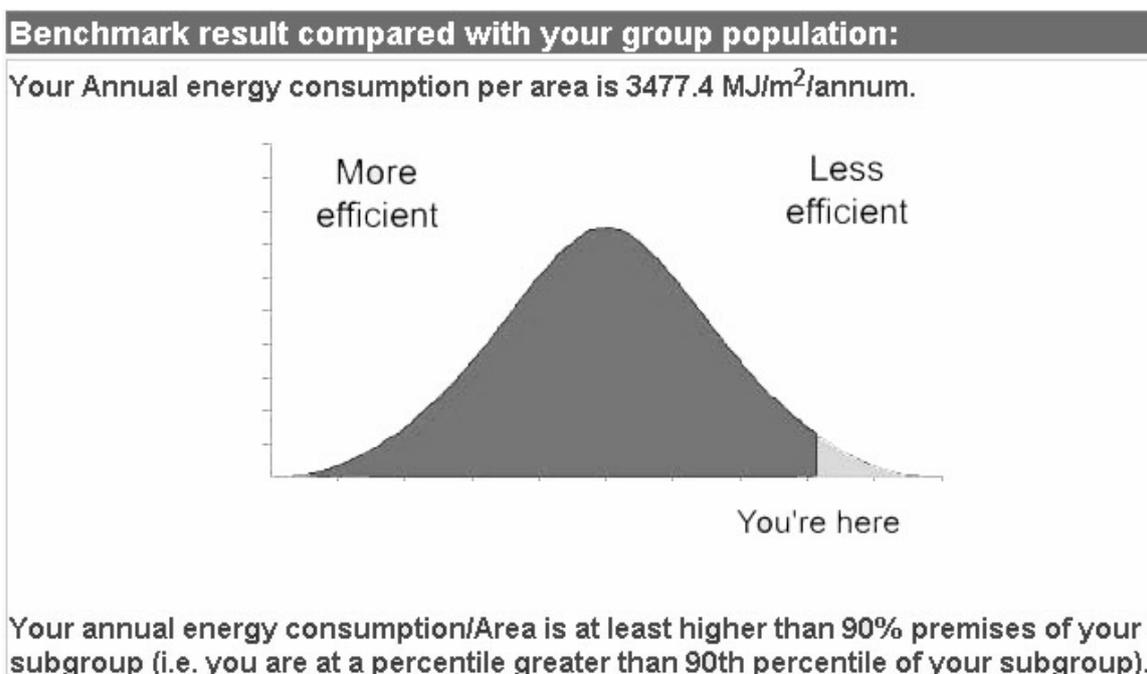


Figura 3 – Indicação de uma edificação comercial pouco eficiente na escala de análise do EMSD (Energy Efficiency Office of the Electrical and Mechanical Services Department) de Hong Kong. Fonte: CHUNG et al., 2006.

Após a elaboração de *benchmarks* para características físicas, foi elaborado um segundo método para *benchmarking* por atividade que inclui outros indicadores. Como comentado por Meier et al. (2002), somente a intensidade energética, que é o consumo de energia pela área de piso, não é suficiente para descrever a eficiência de uma edificação, pois esta pode ser alterada de acordo com as dimensões da edificação ou de suas cargas internas. Desta forma, um método de *benchmarking* desenvolvido através de equações de regressão multivariada deve envolver também parâmetros mais subjetivos como padrão de uso da edificação, número de ocupantes ou visitantes e rotina de

manutenção, além de tipo de sistema de climatização, de iluminação, controles de iluminação e ano de construção (CHUNG et al., 2006). Ressaltando que esta é uma etapa posterior a uma política que já contém parâmetros físicos da edificação enraizados na cultura construtiva através das normas nacionais de desempenho térmico e eficiência das edificações.

Assim como Hong Kong, vários países utilizam levantamentos e avaliações para definir escalas de consumo. O estado da Califórnia realizou um levantamento análogo ao *Comercial Energy Use Survey* (CBECS, 2003), que envolve todos os EUA. Foi realizado através de entrevistas *in loco* por contratados por cada concessionária local e consiste em dados de intensidade de uso da energia, não disponíveis para o público, coletadas em 5 levantamentos realizados entre 1992 e 1997. Os dados, consumo de energia por área (elétrica e fóssil), são restritos às áreas de atuação das concessionárias de energia locais e estão disponíveis somente através do programa computacional *Cal-arch*. Este programa mostra onde a edificação está localizada em uma escala geral de consumo de energia ou em seu clima específico quando fornecidas a área da edificação e o consumo anual. Os resultados podem também ser comparados com o uso de edificações com áreas de piso semelhantes. O programa pode ser acessado pelo sítio eletrônico <http://poet.lbl.gov/cal-arch/>.

Em Portugal, sabendo-se que as edificações comerciais, chamadas de edifícios de serviços, tiveram um crescimento de 7,1% no seu consumo anual de energia e consumiram 31% do total nacional de eletricidade no ano de 1999, foi realizado um levantamento para verificar o consumo típico de 17 tipologias para estabelecer os alvos das intervenções do programa P3E. A Figura 4 apresenta as tipologias com seu consumo típico, apesar de ainda haver uma grande variação deste consumo para cada tipologia. É possível perceber que, em Portugal, os restaurantes são grandes consumidores de energia elétrica, chegando a 800 kWh/m²/ano, seguido de edificações que abrigam piscinas aquecidas, com cerca de 450 kWh/m²/ano. Hospitais, hotéis de luxo, hipermercados, supermercados e edifícios de escritório apresentam um consumo semelhante de energia elétrica, de 200 kWh/m²/ano a 350 kWh/m²/ano. As demais tipologias não ultrapassam os 200 kWh/m²/ano (DIRECÇÃO GERAL DE ENERGIA, 2002b).

Benchmarks podem também ser estabelecidos como metas a ser alcançadas por incorporadores ou até como bases para uso de mecanismos de incentivo. Através do apoio de diversas entidades governamentais americanas, foram propostos critérios para

a construção, avaliação e gerenciamento de edificações de elevado desempenho, baseando-se em dados de *benchmarking* já conhecidos no mercado de edifícios dos EUA. Estes critérios envolvem desde características do envoltório ou de sistemas de condicionamento, até treinamento dos usuários da edificação para o seu uso mais eficiente possível. De fato, as duas etapas da vida da edificação que mais impactam a sua eficiência é o projeto, composto pelas fases de estudo preliminar, ante-projeto e desenvolvimento, e o uso da edificação, também chamada de pós-ocupação, como visto na Figura 5 (JOHNSON, 2005). Nos EUA, estes edifícios de elevado desempenho são tão valorizados que recebem deduções de impostos federais cujos critérios de certificação são originados do *Energy Policy Act* de 2005. É possível alcançar reduções de custos com a energia de até 50% do mínimo requerido pela *Standard 90.1* (ASHRAE, 2004) ao intervir o envoltório, do sistema de iluminação, no condicionamento de ar e ventilação e em sistemas de aquecimento de água. A energia economizada é quantificada através de simulação horária para um ano completo, comparando-se os resultados de obtidos de um edifício de referência com os resultados de um edifício proposto (DERU, 2007).

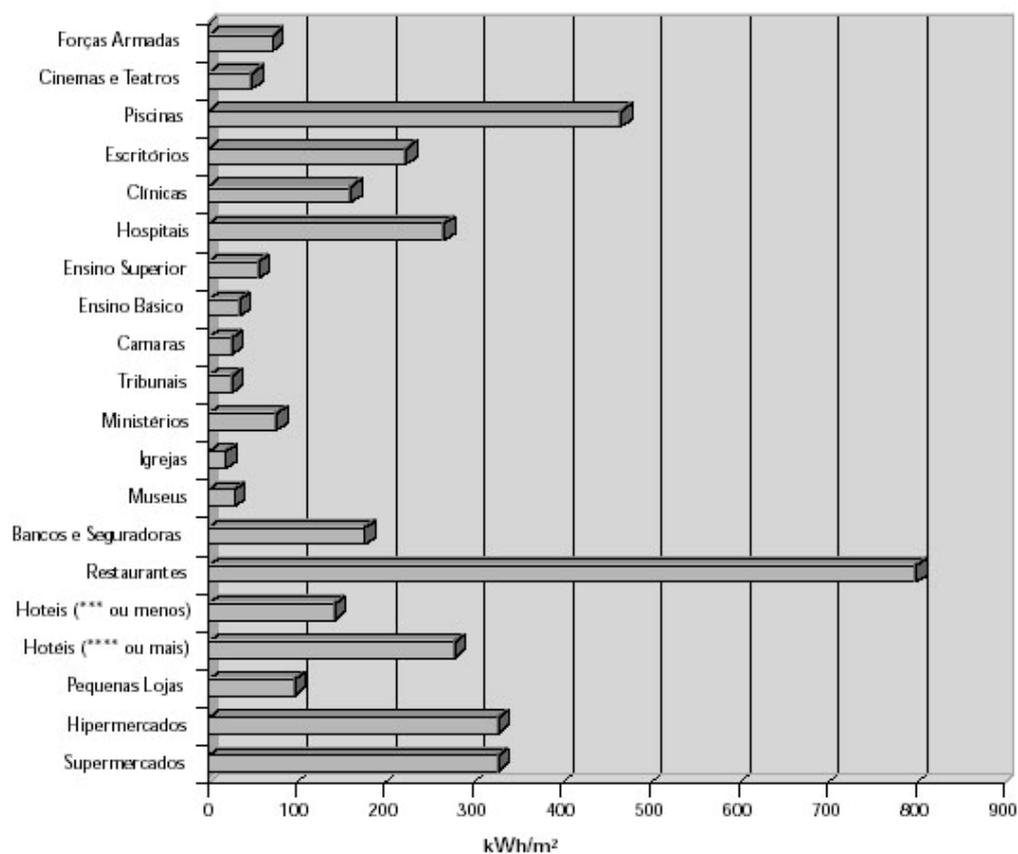


Figura 4 – Consumos anuais típicos de energia de atividades comerciais e institucionais de Portugal. Fonte: DIRECÇÃO GERAL DE ENERGIA, 2002b.

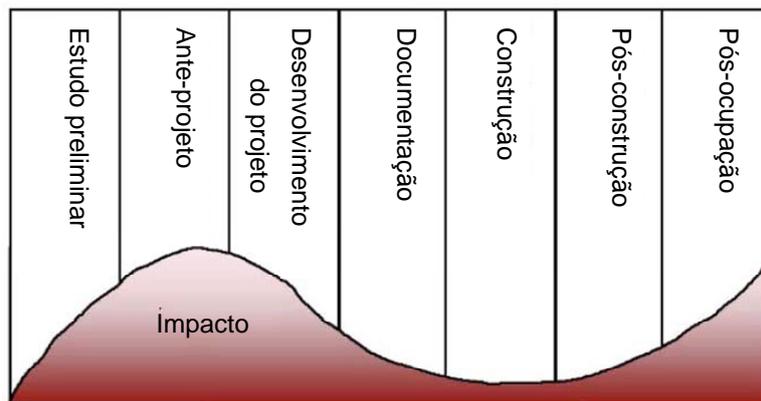


Figura 5 – Potencial de intervenção no desempenho de uma edificação durante as fases de projeto, construção e uso da edificação. Fonte: JOHNSON, 2005.

2.2.3. Considerações finais

Meier et al. (2002) e Chung et al. (2006) mostraram que as características primárias, como tamanho da edificação, concentram a grande parte do impacto no consumo de energia. Estes podem definir grandes agrupamentos de edificações, mas o indicador de intensidade energética, consumo de energia pela área do piso, não define por si só se uma edificação é eficiente. A intensidade energética é usada para comparar eficiências de diferentes edificações pertencentes a um mesmo agrupamento, ou seja, contendo as mesmas características primárias. Esta restrição na avaliação da eficiência, ou do desempenho térmico de uma edificação, levou Depecker et al. (2001) e Pedrini e Lamberts (2003) a considerarem a forma e dimensões da edificação na intensidade energética ou no consumo de energia.

Já as demais características da edificação, como as do envoltório, chamadas neste estudo de características secundárias, induzem a uma determinada intensidade energética dentro de cada agrupamento. Respeitando estes agrupamentos, elas podem ser responsáveis pela eficiência energética da edificação. São diversas características que podem ser usadas: como Percentual de Área de Janela na Fachada ou absorvância solar, características interdependentes como transmitância térmica e capacidade térmica e aquelas que descrevem fenômenos semelhantes, como coeficiente de sombreamento e fator solar.

Os grandes agrupamentos podem ser identificados através da atividade exercida na edificação, como citado por Federspiel et al. (2002), 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, como tipo de condicionamento de ar ou padrão de uso do edifício.

Como visto, a eficiência energética pode ser avaliada comparando edificações com **características primárias** semelhantes, que são pertencentes a um mesmo agrupamento definido pela forma, dimensões da edificação, tipo de condicionamento de ar, cargas internas e padrão de uso. Compara-se assim o resultado da combinação das **características secundárias**, como propriedades térmicas do envoltório ou existência de sombreamento, dentre edificações pertencentes a uma mesma atividade comercial ou institucional. Pode-se também comparar a eficiência da edificação em função de seu uso quando as características secundárias já são normalizadas e largamente adotadas. Neste caso, as medidas para melhorar a eficiência concentram-se na manutenção, uso da energia e ocupação da edificação.

As comparações são geralmente realizadas através de outros casos já conhecidos. Estes podem ter sido organizados formando *benchmarkings*, ou podem ser modelos referenciais isolados, porém conhecidos por suas características peculiares. Estas características podem representar um grupo de edificações, como uma atividade ou tipologia, como apresentado pelo programa P3E de Portugal (DIRECÇÃO GERAL DE ENERGIA, 2002b). Podem ser também um exemplo de edificação de elevado desempenho energético (JOHNSON, 2005), ou até uma referência de base com características mínimas passíveis de aceitação, como o mínimo proposto pela Standard 90.1 (ASHRAE, 2004).

2.3. Simulação do Desempenho Termo Energético de Edificações

A simulação do desempenho de edificações pode ser entendida como “modelos matemáticos detalhados para previsão de alguns aspectos do desempenho de edificações” (HAVES, 2004), usados para comparar um projeto a outro projeto de referência, para comparar alternativas de projeto e para comparar a operação esperada em uma edificação com a operação real desta. A simulação lida com 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). Apesar de toda essa complexidade, a simulação ainda lida com simplificações da realidade, traduzidas como modelos. Um modelo é uma entidade que representa outra entidade, porém reduzida às características de interesse (MAHDAVI, 2004). No caso de simulação de edificações, o modelo é uma descrição numérica de uma edificação, porém reduzida às características intervenientes no seu desempenho térmico e energético. Esta simplificação permite a exploração, investigação e compreensão (MAHDAVI, 2004) dos fenômenos envolvidos com as trocas térmicas e o consumo de energia.

Ao contrário de produtos industrializados, edificações geralmente são únicas, com sistemas e uso diferenciados mesmo comparando edificações semelhantes, o que dificulta a caracterização de modelos que representam diversas edificações. 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 e tratamento estatístico.

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. Pedrini (1997) desenvolveu uma metodologia de calibração de modelos computacionais de edificações para simulação do desempenho térmico no programa DOE 2.1-E. A calibração é dividida em cinco níveis de entendimento da edificação, onde o grau de complexidade das características da edificação, de seus sistemas e do seu uso aumenta à medida que se deseja uma maior precisão entre o modelo e a realidade.

Westphal e Lamberts (2005) desenvolveram outro método de calibração baseada em análise de sensibilidade a fim de reduzir o tempo gasto na calibração. Utilizaram o programa EnergyPlus para definir uma metodologia de 6 etapas que consiste “na calibração das potências e padrões de uso de cargas constantes (...); na simulação de dias de projeto (...); na análise de sensibilidade de dados de entrada para verificar os ganhos e perdas térmicas; no ajuste de dados de entrada de grande influência e incerteza; na simulação de 1 ano completo e nos ajustes finais”. Um “coeficiente de influência”, baseado nos dados de entrada e nos seus efeitos nos dados de saída, indica o percentual de mudança nos dados de saída a partir de uma perturbação em algum dado de entrada. Este resultado indica qual variável deve ser calibrada até atingir um percentual de diferença de 5% entre o consumo anual medido e simulado.

2.3.1. O programa EnergyPlus

O EnergyPlus é um programa que simula o desempenho térmico e energético de edificações com todos os sistemas que compõem a edificação e que são relevantes no seu desempenho, tais como climatização (resfriamento, aquecimento e ventilação), iluminação, cargas internas, propriedades térmicas de materiais, e outros elementos que participam das trocas térmicas. Foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos EUA e vem ganhando espaço junto a simuladores após ter sido validado através do método BESTEST, da *Standard 140* (ASHRAE, 2001). A ASHRAE recomenda o método do balanço térmico para cálculo e análises energéticas (STRAND et al., 2001), 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. O programa reuniu as potencialidades do DOE 2.1-E e do Blast, programa desenvolvido pelo Departamento de Energia dos EUA para simulação de sistemas de condicionamento de ar. 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).

O programa apresenta 3 módulos básicos: um gerenciador da simulação, um módulo de cálculo de cargas através do balanço térmico e um módulo de simulação de sistemas. Ainda fornece dados de consumo de energia, cargas térmicas, PMV, simula o

aproveitamento da luz natural, dentre outros recursos que aumentam com o passar do tempo, visto que o programa tem atualização periódica. Considera fluxos de ar diferenciado por zonas, trabalha com sistemas modulares de climatização e pode simular dias de projeto ou um ano inteiro. Para os dias de projeto, os dados são inseridos durante a modelagem, enquanto o ano completo é simulado com um arquivo climático que contém 8760 horas de dados climáticos que incluem temperaturas, umidade, radiação solar incidente no local e a extraterrestre, vento, pressão atmosférica, iluminância da abóbada celeste, dentre outros (CRAWLEY et al., 2001).

2.3.2. Protótipos de Edificações

Gonçalves e Almeida (1995) definiram a simulação como um processo de *mimesis* de uma situação real, a partir da qual são estimados resultados dadas as características da edificação. Como um dos objetivos da simulação do desempenho térmico de edificações é uma estimativa rápida e confiável, o ponto chave para simular uma edificação que represente um grupo é definir como será o protótipo.

Para analisar o padrão de consumo típico em edificações paquistanesas, Akbari et al. (1990) coletaram dados de três fontes para formar a base para elaboração de protótipos representando edificações residenciais uni-familiares, de escritórios e de escritórios instalados em edificações que originariamente eram residências, chamados de escritórios adaptados. Os protótipos representando as residências foram modelados com base em um levantamento com 12 amostras, os protótipos representando os escritórios adaptados foram baseados em 6 amostras coletadas para a pesquisa e os escritórios, em 14 amostras. Os levantamentos incluíram pesquisas com usuários das edificações através de questionários e visitas *in situ*. Todas estas foram consideradas significativas para determinadas características pré-definidas, e ainda foram complementadas com dados de uma pesquisa anterior que envolveu 43 amostras. Ao final, foram coletados os dados presentes no Quadro 1 (AKBARI et al., 1990). Os protótipos foram modelados considerando a forma da edificação, planta, zonas térmicas, materiais e componentes, as cargas internas e seus padrões de uso para cada zona e os sistemas de aquecimento e resfriamento e seus padrões de uso. As variáveis incluídas na modelagem dos protótipos são mostradas no Quadro 2 (AKBARI et al., 1990). Tendo modelado os protótipos, foram realizadas simulações paramétricas e os consumos e cargas por uso para resfriamento e aquecimento foram estimados e classificados de acordo com o tipo de edificação e de clima (AKBARI et al., 1990).

Quadro 1 – Dados disponíveis para a elaboração dos protótipos.

Amostras de edificações residenciais	16
Amostras de edificações comerciais	22
Unidades de ar condicionado	Número de unidades e tipos
Equipamentos elétricos	Número de unidades, tipos, capacidades
Equipamentos a combustível	Número de unidades, tipos e capacidades
Iluminação artificial	Número de lâmpadas e luminárias, tipos e potências
Medidas de Conservação de Energia	Número de tipos de medidas

Quadro 2 – Variáveis observadas na modelagem dos protótipos.

1	Número de pavimentos	10	Potência total de iluminação
2	Área total de piso	11	Cargas internas de equipamentos
3	Área condicionada	12	Capacidade do ar condicionado
4	Área total de janela	13	COP do ar condicionado
5	Composição da janela (número de folhas, filmes, proteção solar)	14	Potência dos ventiladores
6	Composição da parede (materiais e espessuras)	15	Tipo de aquecimento
7	Composição da cobertura (materiais e espessuras)	16	Temperaturas do termostato
8	Número de ocupantes	17	Absortância das superfícies externas
9	Tipo de iluminação		

Os Estados Unidos realizaram, a partir do ano de 1979, um levantamento periodicamente atualizado sobre edificações comerciais (CBECS - *Commercial Building Energy Consumption Survey*) e residenciais (RECS - *Residential Energy*

Consumption Survey) e o uso da energia. Para realização do levantamento que gerou a base de dados do ano de 1999 do CBECS, a edificação foi considerada como uma unidade básica de análise, cuja metodologia de pesquisa foi dividida em duas etapas: o levantamento das características da edificação e o levantamento dos padrões de consumo dos usuários da edificação. Foi considerada “edificação” uma estrutura totalmente fechada, excluindo monumentos, torres de água e edificações incompletas (sem paredes ou coberturas), sendo que a existência de *pilotis* com o restante da estrutura fechada era aceita. Foram consideradas edificações de uso comercial aquelas que continham mais de 50% de sua área de piso destinada ao uso comercial, e a área mínima destas poderia variar de acordo com o foco da pesquisa, que poderia se destinar a edificações comerciais de pequeno ou grande porte (CBECS, 2003).

As etapas da pesquisa consistiram em definição de questionários, treinamento de entrevistadores, entrevista e processamento de dados, dentre outras etapas secundárias. Entrevistas foram conduzidas por telefone, sem acesso visual à edificação. Um material era enviado via correio ao entrevistado contendo, dentre outros, exemplos de CBECS anteriores, planilhas com dados sobre a edificação a serem coletados, uma lista de *FAQs* e cartas dos entrevistadores explicando os objetivos da pesquisa (CBECS, 2003).

O CBECS apresenta dados como localização, dimensões e ano de construção, ocupação, uso, áreas submetidas a aquecimento e resfriamento mecânicos, uso de equipamentos, uso de energia elétrica, de gás natural e combustíveis. Um exemplo é a classificação da área das edificações comerciais, por atividade comercial e área construída. São listadas 4657 edificações comerciais segundo uma das 16 atividades, incluindo edificações não ocupadas: educação, venda de alimentos, restaurantes e lanchonetes, cuidados médicos (hospitais, clínicas e postos), hospedagem (hotéis, motéis), vendas de mercadorias (shoppings e lojas), templos, escritórios, armazéns e estoques, edificações vazias, etc. As áreas levantadas têm um mínimo de 1000 pés quadrados (93m²), sem limite máximo (CBECS, 2003).

Já o RECS baseou-se nas estatísticas do censo para definir suas amostras divididas territorialmente em PSU (*Primary Sampling Units*) com cerca de 400 unidades habitacionais que, por sua vez, eram divididas em SSU (*Secondary Sampling Units*) com cerca de 50 unidade habitacionais. Visitas *in loco* também foram utilizadas para avaliar as amostras, selecionadas aleatoriamente. As 4822 entrevistas foram executadas pessoalmente, já que o entrevistado deveria assinar um documento permitindo que o

programa tivesse acesso às suas contas de energia elétrica através da concessionária (RECS, 2001).

O CBECS e o RECS são bases que se tornaram largamente utilizadas para definir protótipos de edificações representativos para diversos fins relacionados ao desempenho térmico ou à eficiência energética das edificações, equipamentos e sistemas destas.

Por vezes, estudos complementares com objetivos mais específicos foram realizados para complementar as informações como o que o *Lawrence Berkeley National Laboratory* realizou para o *Gas Research Institute*. O LBL procurou estabelecer informações técnicas relacionadas ao setor de energia e construção que afetavam o uso de combustível derivado do petróleo. Visava estimar tipologias construtivas em edificações comerciais e multi-familiares e gerou 481 modelos. Os dados utilizados eram provenientes de 8 fontes diferentes, sendo que do *Non-residential Building Energy Consumption Survey* (NBECS, posteriormente alterado para CBECS), foram utilizados dados de área de piso, uso final, horas de operação, características do envoltório e usos de combustíveis de 124 categorias de edificações. Dados setoriais foram provenientes de *American Hospital Association* para hospitais, do *Department of Justice* e *American Correctional Association* para prisões e do *National Center of Educational Statistics* para escolas. Foram também utilizados dados do censo com projeções populacionais para anos futuros. Enfim, os dados foram coletados parcialmente de uma fonte e parcialmente de outra, até formar a base de dados necessária para classificação e posterior modelagem dos protótipos (HUANG et al., 1991).

Os autores classificaram as edificações segundo diversas características relevantes para estabelecer quais modelos tinham um potencial para uso de cogeração, objetivo da pesquisa. As edificações foram classificadas em residenciais e comerciais, sendo depois classificadas por categoria, uso, tamanho e horas de operação, conforme Figura 6, gerando 23 tipos de edificações. Destas, 13 foram modeladas por apresentarem maior potencial para uso de cogeração em seu sistema (HUANG et al., 1991).

As variáveis intervenientes nos consumos da edificação foram identificadas e 37 protótipos foram gerados a partir de seu tamanho, componentes construtivos, geometria, usos finais, condições de operação, equipamentos utilizados, dentre outras características necessárias para realizar simulações horárias. Foram simulados em 13 cidades, resultando então em 481 protótipos definidos também pelo seu clima. Os protótipos representam hospitais, grandes hotéis, restaurantes de longa permanência, lanchonetes, grandes escritórios, supermercados, edifícios de apartamentos, grandes

lojas, escolas secundárias, pequenos hotéis e motéis e prisões. Como resultados, são apresentados os usos finais simulados para aquecimento (elétrico e a combustível), resfriamento (elétrico e a combustível), ventilação (elétrico), aquecimento de água (elétrico e a combustível), iluminação (elétrico) e outros (elétrico e a combustível) (HUANG et al., 1991).

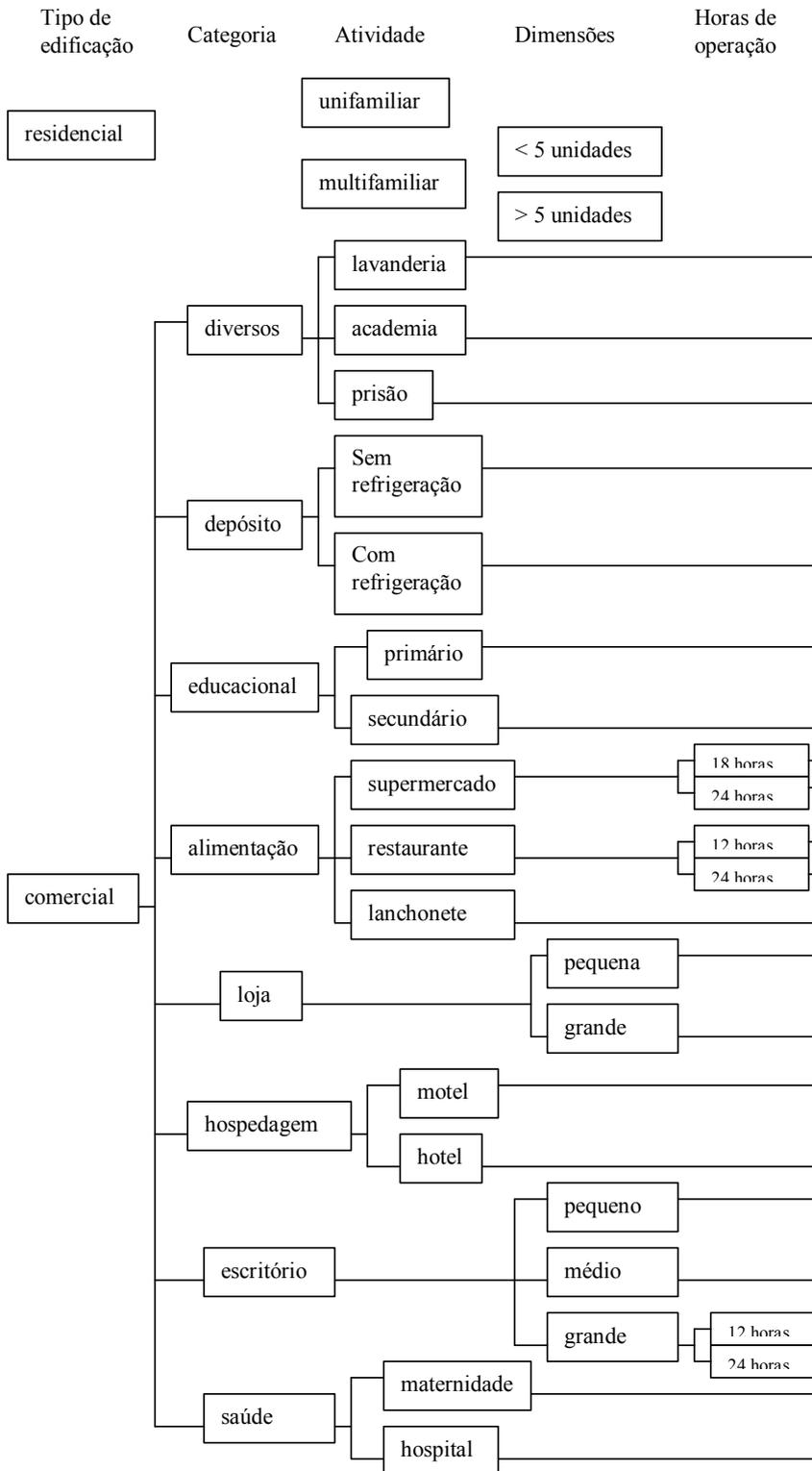


Figura 6 – Classificação dos protótipos para verificação do potencial de uso de cogeração.

Fonte: HUANG et al., 1991

Huang & Franconi (1999) deram continuidade a esta pesquisa 8 anos depois, tornando-se uma das principais fontes de dados para a simulação de 120 protótipos de edificações comerciais. Outra grande fonte de dados utilizada foi o CBECS (*Commercial Building Energy Consumption Survey*) de 1989 e de 1992. Foram classificados segundo 12 tipos de atividades comerciais: grandes escritórios, pequenos escritórios, grandes lojas, pequenas lojas, escolas, hospitais, grandes hotéis, pequenos hotéis, lanchonetes, restaurantes, supermercados e depósitos. Para cada tipo de edificação comercial, foram modelados de 2 a 4 protótipos, de acordo com os dados do CBECS de 1992. Nove dos 12 tipos de edificações foram baseados na pesquisa de HUANG et al. (1991) para o GRI (*Gas Research Institute*). Os protótipos foram ainda divididos segundo seu período de construção de acordo com os dados do CBECS para tamanho, níveis de isolamento, tipo de janela e P/JF, etc. Cinco cidades foram selecionadas para representar as 5 macro-regiões climáticas dos EUA de acordo com seus graus dia para resfriamento e aquecimento: *Mineápolis, Chicago, Washington, Los Angeles e Houston*.

Os protótipos apresentavam diferenças regionais e por período de construção. Como exemplo, o sistema de condicionamento de ar em grandes escritórios foi representado por um aquecimento com volume constante em edificações mais antigas e com volume variável e economizador em edificações novas. Apesar de terem sido simulados em 5 cidades, os protótipos tiveram suas características definidas somente para duas regiões: norte e sul.

As características usadas na modelagem foram: período de construção, região dos EUA, peso por cidade/clima, área, número de pavimentos, Percentual de Área de Janela na Fachada, Resistência Térmica das Janelas, Coeficiente de Sombreamento dos vidros, Resistências Térmicas das paredes e coberturas, materiais das paredes e coberturas, ocupação, padrões de uso da edificação, densidades de cargas internas de iluminação e equipamentos, tipo de sistema de condicionamento de ar para aquecimento e para resfriamento e tipo de sistema de aquecimento de água. Os escritórios foram ainda divididos de acordo com suas dimensões em grandes e pequenos, em novos ou antigos e de acordo com a região geográfica onde se encontram. Os resultados finais apresentam as cargas da edificação por uso divididas em período de aquecimento e resfriamento, de acordo com o tipo de protótipo (hospital, grandes escritórios, etc..) e com o clima (HUANG & FRANCONI, 1999).

As classificações de edificações por atividades em outros estudos não se diferenciam muito das usadas por Huang et al. (1991) e Huang & Franconi (1999). Sezgen e

Koomeyl (2000) utilizaram o CEBCS para gerar 12 protótipos para simulação no DOE 2.1-E. Relacionou a energia elétrica consumida por resfriamento e aquecimento com a energia elétrica consumida e com a energia térmica gerada pela iluminação em edificações comerciais nos EUA. Os protótipos foram classificados por atividade e porte da edificação: grandes edificações de escritórios, pequenas edificações de escritórios, grandes lojas, pequenas lojas, depósitos, escolas, hospitais, lanchonetes, restaurantes de longa permanência, grandes hotéis, pequenos hotéis e supermercados. Algumas atividades ainda foram subdivididas segundo suas características físicas ou de operação.

Na Inglaterra, onde edificações de uma área geográfica específica foram classificadas para gerar dois modelos, um residencial e outro não-residencial para estimativas de consumo de energia. As principais características coletadas da amostra de edificações residenciais foram: área de piso aquecido, fachadas, PjF e época de construção. Também foram observados o número de pavimentos e a área total da fachada. Já as edificações não-residenciais foram inicialmente divididas em 13 grupos: alimentação, diversão, indústrias e armazéns, educação de nível superior, saúde, hotéis, museus/bibliotecas/igrejas, correios/bancos, prisões, escolas, lojas, esportes/recreação e escritórios, que foram ainda subdivididos em 48 diferentes grupos. A base de dados obtida está relacionada com a localização da edificação através do seu código postal, permitindo que, de acordo com a região e o tipo de edificação, seja possível fazer uma previsão do consumo de energia da edificação (JONES et al., 2001).

Na Espanha, protótipos foram modelados para representar edificações de escritórios, que correspondem a 10,2 milhões de metros quadrados de área construída no país. As amostras apresentavam cargas predominantemente internas, suas fachadas tinham um PjF variando de 30% a 50% e foram incluídas no levantamento edificações consideradas energeticamente eficientes. O consumo anual de energia foi medido em duas amostras e outros consumos foram coletados através das contas de energia, que variaram de 140 kWh/m² a 208 kWh/m². O impacto das janelas foi avaliado com o uso de um protótipo de 10 pavimentos com PjF de 50% e área total de 14167 m². Tendo realizado estes testes iniciais, foi utilizado como caso base um protótipo retangular de 7800 m² e oito pavimentos. Neste, o tipo de vidro das janelas foi alterado para avaliar o desempenho das edificações comerciais de escritório e comparar o consumo utilizando o vidro avaliado às especificações da norma espanhola (CÓRDOBA et al., 1998).

Em Hong Kong, a implementação de programas para conservação de energia foi avaliada com a simulação de protótipos obtidos através de auditorias energéticas em

edificações comerciais e públicas. As auditorias indicaram o tipo de atividade comercial, que poderia ser escritório, hotel, hospital ou lojas de venda de mercadorias; além de ano de construção; cidade; forma e dimensões, estas através de croquis e fotografias; orientação de cada fachada; materiais componentes do envoltório; áreas internas condicionadas, não condicionadas e utilizadas para estacionamento; uso da energia; capacidade e componentes do condicionador de ar; COP (*coefficient of performance*) de *chillers*; temperatura e umidade em cada zona térmica; tipo de sistema de iluminação e tipos de equipamentos. Os resultados confirmaram que o sistema de condicionamento de ar é responsável por aproximadamente 60% do consumo de energia elétrica da edificação e que o sistema de iluminação artificial consome 20%. Por fim, as auditorias permitiram a modelagem de 4 protótipos de edificações que representam as atividades pesquisadas, mostradas na Figura 7. Todos os protótipos são retangulares, com as fachadas de menores dimensões orientadas a oeste e leste. O protótipo mais vertical refere-se ao protótipo de uma edificação de escritórios e o mais horizontal, com um pavimento, refere-se a uma loja. Os protótipos que representam um hotel e um hospital apresentam aspecto semelhante, apesar do uso da energia ser distinto (CHIRARATTANANON & TAWEEKUN, 2003).

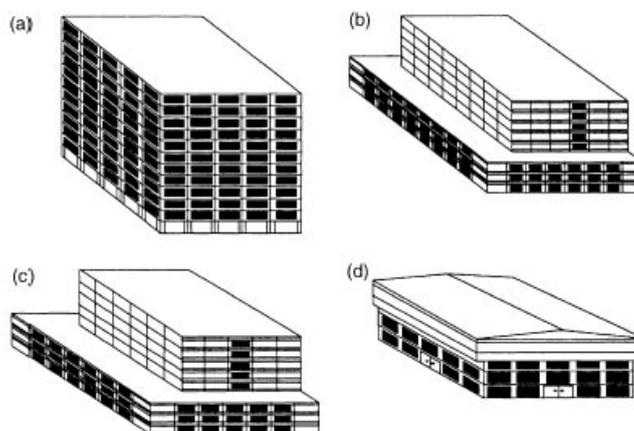


Figura 7 – Protótipos de edificações utilizados em Hong Kong, sendo (a) escritórios, (b) hotel, (c) hospital e (d) lojas. Fonte: Chirarattananon & Taweekun, 2003

Todos os protótipos da Figura 7 possuem 3 zonas térmicas e paredes externas formadas por blocos de cimento. As zonas diferenciadas são o primeiro pavimento, em contato com o solo, os pavimentos intermediários e o último pavimento, protegido pela cobertura. As janelas são compostas por 1 folha de vidro, sendo claros somente nas lojas, e nenhum possui vidros de alta refletividade. Lâmpadas fluorescentes foram totalmente utilizadas no protótipo de escritórios, e lâmpadas incandescentes foram

utilizadas no hotel, apesar deste último apresentar menor densidade de potência instalada. O hotel apresenta também a menor densidade de potência de equipamentos, enquanto a loja apresenta a maior densidade de potência instalada tanto de iluminação quanto de equipamentos (CHIRARATTANANON & TAWEEKUN, 2003). Em geral, é possível perceber algumas semelhanças com os padrões construtivos brasileiros, embora o Brasil careça de mais pesquisa para definição de protótipos representativos para cada atividade comercial.

No Brasil, algumas pesquisas já foram realizadas a fim de caracterizar edificações comerciais sob a ótica do consumo de energia elétrica. O relatório sobre a Influência das Curvas de Carga nos Alimentadores de Distribuição de Curitiba, da Companhia Paranaense de Energia Elétrica, apresentou curvas de carga de edificações comerciais da região central de Curitiba que podem ser utilizadas para modelagem dos padrões de uso de protótipos de edificações comerciais. Os consumidores e seus usos finais de energia foram identificados e são apresentados, assim como as curvas de carga em dias úteis, no sábado e no domingo para estas edificações. Foram realizadas medições em 33 edificações sendo 12 de uso coletivo e 21 de consumidores individuais. Além das curvas de carga destas edificações, foram recolhidos históricos de demanda mensal no período de um ano das edificações com consumidores individuais e do consumo mensal no período de um ano de todas as edificações amostradas. A Tabela 1 apresenta o total de amostras coletadas por ramo de atividade (COPEL, 1990).

Tabela 1 – Número de amostras por atividade comercial levantados em Curitiba.

Atividade	Amostras	Atividade	Amostras
Bancos	5	Ed. Escolares	1
Edificações públicas	2	Lojas	4
Escritórios	6	Supermercados	1
Hotéis	2	Consumo coletivo	12

As Figuras 8 e 9 apresentam duas curvas de cargas de edificações comerciais de Curitiba: uma loja de departamentos e um edifício de escritórios. Na Figura 8, referente à loja, é possível notar um uso contínuo em dias úteis a partir das 10 h até as 21 h. No sábado, o início das atividades coincide com os dias úteis, mas estas são encerradas mais cedo: a partir das 13 h há uma redução gradual na curva.

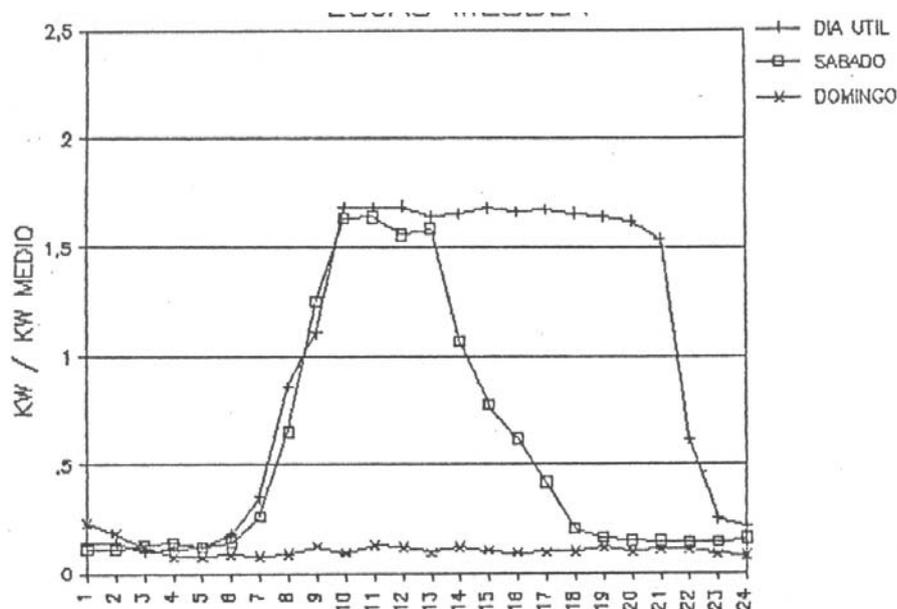


Figura 8 - Curva de carga de uma loja de departamentos na área central de Curitiba. Fonte: COPEL, 1990

Já a Figura 9, referente a uma edificação de escritórios, apresenta duas regiões de uso intenso nos horários comerciais interrompidos pelo horário de almoço. As atividades no sábado são pequenas, concentrando-se no período da manhã.

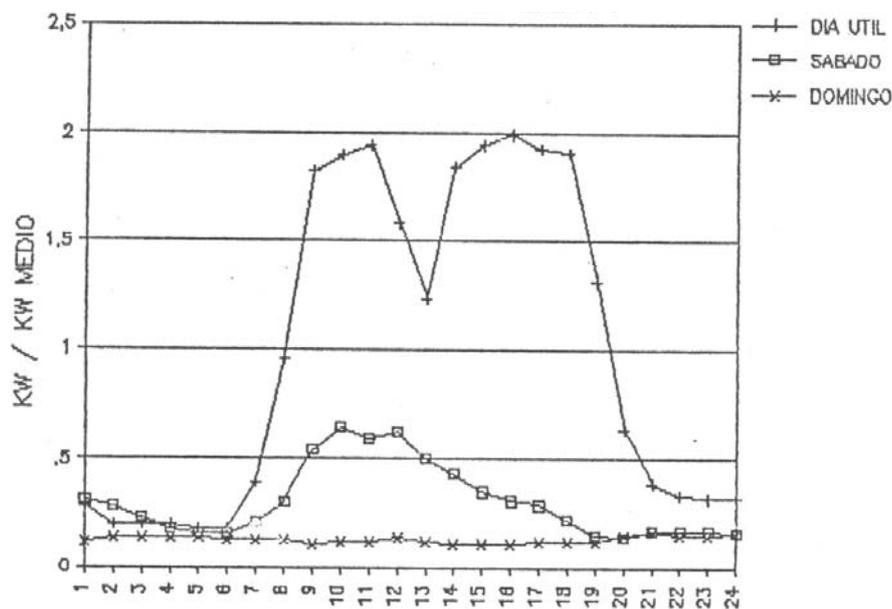


Figura 9 – Curva de carga de um edifício de escritórios na área central de Curitiba. FONTE: COPEL, 1990

Uma pesquisa mais específica sobre o uso da energia em edificações foi realizada para o banco de dados SINPHA, que reúne informações sobre os padrões de consumo de domicílios servidos por 18 concessionárias brasileiras de energia. Apresenta valores percentuais e absolutos classificados pelas condições de moradia, condições sócio-

econômicas, de fornecimento de energia, iluminação, eletrodomésticos, dentre outros. A base de dados permite a análise e combinação destas informações a fim de processar dados conforme o objetivo da pesquisa. É uma base completa para definir padrões de uso residenciais embora apresente poucas características construtivas dos domicílios pesquisados (SINPHA, 1999).

Os dados do SINPHA foram atualizados e complementados com um levantamento de consumidores comerciais, que fornece informações sobre o consumo específico da energia para alta e baixa tensão. A base fornece subsídios para criar padrões de uso por atividade comercial que poderão ser relacionados a tipologias construtivas de edificações comerciais (ELETROBRÁS, 2004). As atividades comerciais das edificações de alta tensão são hotéis/motéis, hospitais/clínicas, supermercados, bancos/caixas, instituições de ensino, prédios empresariais e *shopping centers* (CORREIA, 2007a). As atividades comerciais de baixa tensão são padarias/confeitarias, hotéis/motéis, serviços de saúde, supermercados /armazéns, bancos/financeiras, escritórios/salas comerciais, faculdades/escolas, bares/restaurantes, dentre outras (CORREIA, 2007b). Até o momento, não foram publicados os relatórios completos contendo dados de arquitetura, como área de piso ou características dos envoltórios, atendo-se a posse de equipamentos, consumo por ocupante, tensão e faixa de demanda, situação tarifária e gerenciamento energético (CORREIA, 2007a, CORREIA, 2007b e SOUZA, 2007).

2.3.3. Considerações finais

A simulação do desempenho térmico pode fornecer estimativas confiáveis do consumo de energia elétrica a partir da manipulação de suas variáveis. O programa EnergyPlus é adequado para uso por atender às premissas básicas da simulação utilizando um método de cálculo recomendado, o balanço térmico. Fornece ferramentas e opções de simulação que permitem uma flexibilização da metodologia de acordo com os objetivos da simulação e seus recursos podem facilitar as análises posteriores devido ao grande número de dados de saída.

Os modelos computacionais inseridos em programas de simulação tratam-se de protótipos gerados a partir de coleta de dados reais que envolvem as características físicas de edificações, os sistemas consumidores de energia (iluminação, equipamentos e condicionamento de ar) e o uso da edificação. As coletas podem consistir em levantamentos nacionais ou regionais, ou podem se limitar à consulta de algumas

características em pequenas amostras locais. No primeiro caso, se estudadas edificações não-residenciais, os protótipos costumam ser divididos nas atividades às quais se destinam, como hospitais, escolas, restaurantes ou supermercados. Estas atividades diferenciam o uso da edificação, com horários distintos de acionamento das cargas internas. Também podem ser subdivididos de acordo com o porte da edificação, como no caso de grandes e pequenos escritórios, hotéis e lojas.

Outras atividades comuns avaliação nos países citados podem não ser interessantes para o caso brasileiro. Atividades como armazéns não são relevantes pelo seu baixo consumo de energia, visto que as condições climáticas brasileiras não exigem condicionamento térmico de tais edificações, sendo necessário somente para a estocagem de alimentos. A irrelevância do aquecimento térmico na maior parte dos climas brasileiros torna também pouco significativa a participação de templos e presídios no consumo de energia elétrica por atividade institucional e os hábitos de vida brasileiros tornam pouco significativas as lavanderias, sendo incluídas na classificação de pequenas lojas. Outras atividades de relativa relevância são correios e bancos, que podem ser incluídas em atividades de escritório, e recreação e esportes, que englobam casas noturnas, teatros, cinemas, academias, ginásios e clubes.

Os levantamentos reúnem as características consideradas relevantes para o consumo de energia ou para a eficiência energética. As dimensões da edificação, como área e número de pavimentos são unânimes em todos os levantamentos verificados, dada a importância da volumetria no consumo de energia elétrica. Outras características típicas a identificar em edificações não-residenciais são: área de vidro nas fachadas, materiais componentes do envoltório, cargas internas de iluminação e equipamentos, tipo de condicionador de ar, horas de uso da edificação e número de usuários. Além dos levantamentos *in loco*, as informações obtidas podem ser complementadas por dados previamente obtidos em bibliografia disponível, como no caso de curvas de carga que podem indicar os padrões de uso da edificação. Tipologias de edificações e uso da energia podem ser combinados mesmo se referentes a diferentes fontes, desde que estejam relacionados à uma atividade em comum, como escritórios.

O protótipo gerado refere-se assim a um modelo computacional cujas características o tornam representativo de um grupo de edificações. Este grupo, por sua vez, pode ser definido pela atividade exercida na edificação, por suas dimensões e pela região geográfica abrangida pelo levantamento.

2.4. Análise de Custos

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. Diversos são os métodos adotados, desde a análise de retorno do investimento (MARTINAITIS et al., 2004) à análise do custo do ciclo de vida, passando pelo custo-benefício (LEE et al., 2003) e custo da energia conservada (ROSENFELD, 1996). 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. Este foco foi desenvolvido quando surgiu a necessidade de adaptar a metodologia do Custo do Ciclo de Vida, CCV, que surgiu na década de 1960, a diversos fatores relacionados à indústria da construção e ao meio ambiente (GLUCH e BAUMANN, 2004). Atualmente, outras análises podem ser comparadas com o CCV e suas vantagens e desvantagens são avaliadas de acordo com os objetivos a alcançar. Pode-se citar o Custo da Energia Conservada, CCE, e análise de custo-benefício como outras formas de avaliação de custos.

Métodos de análise do custo do ciclo de vida representam uma abordagem racional, em que as diversas informações são padronizadas numa linguagem comum. Avaliações individuais de ciclo de vida de materiais e de edificações podem ser interligadas por esta linguagem. Estas avaliações são dinâmicas, evoluindo à medida que o conhecimento na área também evolui, auxiliando tomadores de decisão que visam adotar uma estratégia em comum (PEUPORTIER, 2001 e GLUCH e BAUMANN, 2004). A adoção destes métodos de análise ao complexo sistema da edificação envolve interações entre esta, seus sistemas, seus ocupantes, o ambiente exterior (PEUPORTIER, 2001) e os custos relacionados a cada item. Os limites de todos os elementos e sistemas envolvidos na vida de um edifício devem ser definidos concentrando-se em (REGENER PROJECT, 1997):

- custos de implantação e construção – custos iniciais;
- custos com o consumo de energia elétrica; e
- custos de sua manutenção durante o período analisado – custo operacional.

Gluch e Baumann (2004) definiram o Custo do Ciclo de Vida, CCV, como uma técnica que permite avaliações comparativas de custos realizadas em um período específico de tempo, considerando todos os fatores econômicos relevantes tanto em termos de custos

iniciais como futuros custos operacionais. A expressão clássica do Custo do Ciclo de Vida de uma edificação, focando o uso da energia, está expressa na Equação 2 (MCBRIDE, 1995).

$$CCV = FC + M + R + E - RV \quad \text{(equação 2)}$$

Onde,

CCV, Custo do Ciclo de Vida (US\$);

FC, primeiros custos (US\$);

M, custos de reparos e manutenção (US\$);

R, custos de reposição (US\$);

E, custos com consumo de energia (US\$);

RV, valor residual (US\$).

Como Medidas de Conservação de Energia podem possuir ciclos de vida distintos, é necessário que todas sejam trazidas a um valor presente, como mostra a Equação 3 (MCBRIDE, 1995):

$$VPCCV = VPFC + VPM + VPR + VPE - VPRV \quad \text{(equação 3)}$$

Onde,

VPCCV, valor presente do Custo do Ciclo de Vida (US\$);

VPFC, valor presente dos primeiros custos (US\$);

VPM, valor presente dos custos de reparos e manutenção (US\$);

VPR, valor presente dos custos de reposição (US\$);

VPE, valor presente dos custos com consumo de energia (US\$);

VPRV, valor presente do valor residual (US\$).

O valor presente é variável de acordo com o tempo de vida da medida combinado ao tempo de vida da edificação. Derivando a Equação 3 encontra-se um custo do ciclo de vida zero, proveniente do próprio ciclo de vida zero, onde os custos iniciais de uma medida de conservação de energia são iguais aos custos com a energia quando os demais fatores são ignorados (manutenção, reparos, etc). A Equação 4 apresenta esta derivação (MCBRIDE, 1995).

$$d(VPCCV)/d(MCE) = d(VPFC)/d(MCE) + d(VPM)/d(MCE) + d(VPR)/d(MCE) + d(VPE)/d(MCE) - d(VPRV)/d(MCE) \quad (\text{equação 4})$$

Quando a ASHRAE definiu, em 1991, que os critérios para a nova versão da *Standard 90.1* fossem baseados em critérios econômicos, estes foram fundamentados na análise do ciclo de vida. A economia de energia despendida ao longo do tempo e proveniente de qualquer Medida de Conservação de Energia (MCE) do envoltório deveria justificar o investimento inicial naquela MCE, ou seja, a economia deveria ser maior que os investimentos (Equação 5). Da Equação 5, foram desenvolvidos os *scalar ratios*, índices econômicos atemporais equivalentes a fatores de valor presente modificados (MCBRIDE, 1998).

$$FYS_h \cdot A \cdot P_h \cdot S_h + FYS_c \cdot A \cdot P_c \cdot S_c \geq \Delta FC \cdot A \cdot S_2 \quad (\text{equação 5})$$

Onde,

FYS_h , economia de energia do primeiro ano por unidade de área, para aquecimento (therm);

A, área (ft²);

P_h , preço da energia para aquecimento (US\$/therm);

S_h , *scalar ratio* para aquecimento (adimensional);

FYS_c , economia de energia do primeiro ano por unidade de área, para resfriamento, (kWh);

P_c , preço da energia para resfriamento (US\$/kWh);

S_c , *scalar ratio* para resfriamento (adimensional);

ΔFC , aumento nos custos iniciais pela MCE (US\$);

S_2 , *scalar ratio* para os custos iniciais (adimensional).

Os *scalar ratios* são semelhantes às taxas de escalonamento, porém não se referem somente a um aumento médio anual no custo da energia (MASCARÓ e MASCARÓ, 1992). Eles são previsões que incluem todos os condicionantes do consumo de energia de edificações por região e para diferentes usos da energia, sendo publicados regularmente pela ASHRAE. Não há índices semelhantes publicados para as condições

brasileiras, mas Mascaró e Mascaró (1992) mostram que a taxa de desconto pode ser calculada segundo a Equação 6, que inclui um capital externo emprestado para completar o capital total necessário para realizar o investimento em uma MCE.

$$R = a_f \cdot X + (a_e + q)(1 - X) \quad \text{(equação 6)}$$

Onde,

R, taxa de desconto (adimensional);

a_f , demanda de retorno do capital externo (adimensional);

a_e , demanda de retorno real em equivalência (adimensional);

X, parcela de capital externo em relação ao capital total (R\$);

q, taxa de inflação (adimensional).

A taxa inflacionária e a conversão de todos os fatores relacionados ao consumo em uma unidade unidimensional, a monetária, provocam incertezas pela sua imprecisão em representar os fatores relacionados ao consumo. Isto acarreta uma elevada complexidade na construção de cenários futuros. Estas são uma das limitações no uso do CCV em avaliações econômicas envolvendo a energia. No entanto, o CCV é ainda um bom indicador para a definição de decisões estratégicas exatamente por unificar uma variedade de condicionantes em uma única linguagem que facilita o entendimento do processo e a tomada de decisões (GLUCH e BAUMANN, 2004).

Ao avaliar diversos tipos coberturas de tetos-jardim em Cingapura usando o CCV como ferramenta, Wong et al. (2003) desenvolveram uma abordagem em uma tentativa de reduzir as possíveis incertezas no modelo. A Figura 10 apresenta a lista de perguntas a responder. Ela estabelece um processo a ser adotado para reduzir as incertezas na coleta de dados, como a pesquisa de preços de materiais de construção, e no uso de ferramentas de CCV, como programas computacionais. Antes disso, no entanto, o processo é usado para identificar os objetos de estudo, listando todas as MCE a participar da análise e todos os custos que deverão ser levantados.

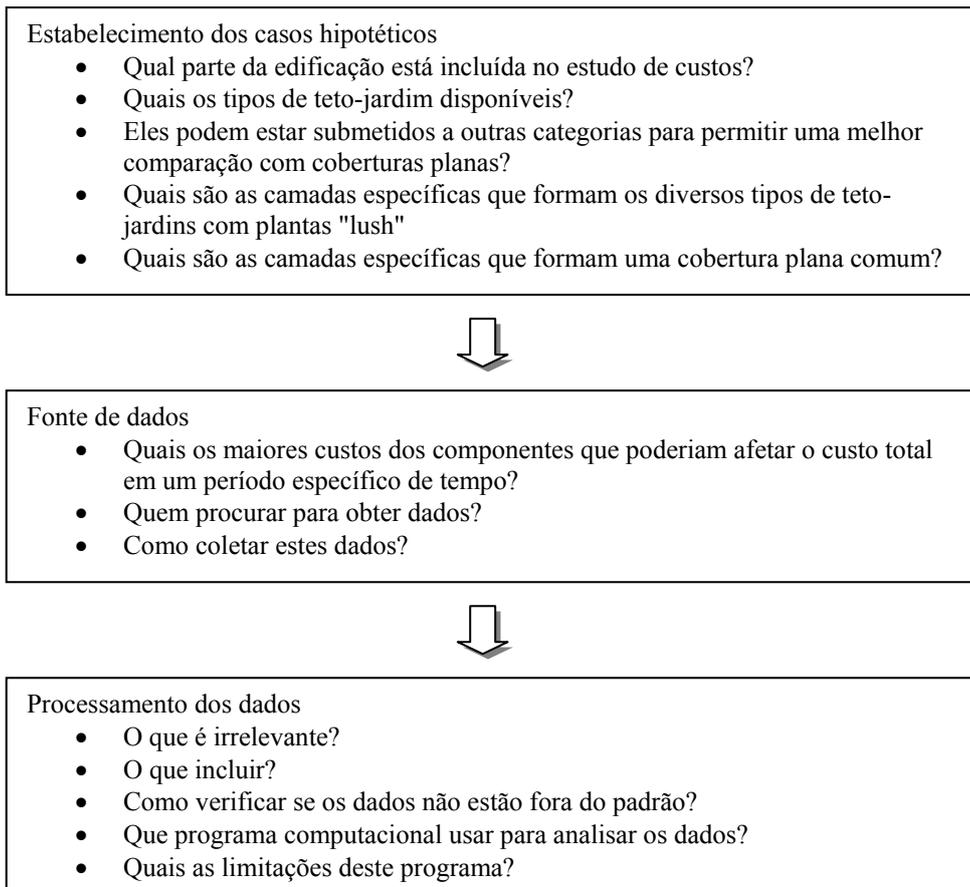


Figura 10 – Questões iniciais a serem respondidas em uma avaliação de CCV.

Fonte: Wong et al., 2003

Quanto à inflação, Wong et al. (2003) utilizaram "*constant dollars*", ou seja, "dolarizaram" os custos de forma que não precisassem prever a situação inflacionária do futuro. Os preços e custos futuros foram caracterizados de acordo com um poder de compra constante que o dólar teve em um ano específico, minimizando o impacto do crescimento do custo de um ou outro item em relação à inflação. Esta abordagem é comum quando o objetivo principal do estudo é a comparação entre alternativas (WONG et al., 2003).

Outros autores não se atêm à preferência pelo CCV. Lee et al. (2003) verificaram que as incertezas na economia no custo do ciclo de vida, ECCV, provocavam erros relativos maiores que a relação custo-benefício de uma MCE. Adotaram assim o custo-benefício, descrito nas Equações 7 e 8 após verificar erros relativos do ECCV e do $(B/C)_{i_0}$, como os mostrados na Figura 11. Os erros relativos do $(B/C)_{i_0}$ tendem a ser mais constantes, enquanto os erros do ECCV são dependentes da magnitude dos fatores B_{i_0} e C_{i_0} separadamente.

$$(B/C)_{i_0} = B_{i_0} / C_{i_0} \quad (\text{equação 7})$$

Onde,

B_{i_0} , benefício de ter a i_0 -ésima medida de conservação de energia comparada com o custo do modelo de referência (unidade monetária);

C_{i_0} , aumento do custo decorrente da incorporação da i_0 -ésima MCE comparada com o custo do modelo de referência (unidade monetária).

B_{i_0} pode ser obtida por:

$$B_{i_0} = AEC_{i_0} \cdot EU \cdot (1/d) \left\{ 1 - \left[1/(1+d)^n \right] \right\} \quad (\text{equação 8})$$

Onde,

AEC_{i_0} , a economia no consumo de energia em um ano devido à adoção da i_0 -ésima MCE (kWh/ano);

EU, a tarifa de um kWh de energia elétrica (unidade monetária/kWh);

d, taxa de desconto (%);

n, período de análise (anos).

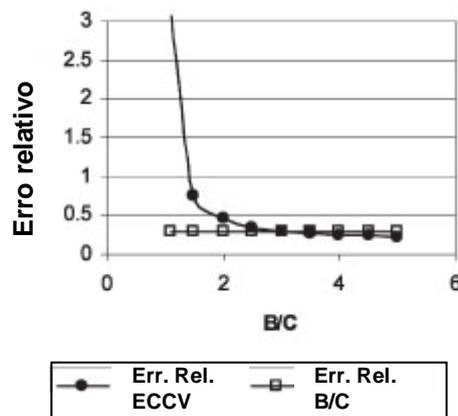


Figura 11 – Erros relativos do ECCV e do $(B/C)_{i_0}$. Fonte: Lee et al., 2003

Na Figura 11, percebe-se que para baixos índices de custo-benefício (B/C), o erro relativo do ECCV pode ser alto, enquanto o erro relativo do (B/C) é sempre baixo para qualquer relação custo-benefício (*benefit - cost*).

Este fator levou Lee et al. (2003) a utilizar a relação custo-benefício para definir uma metodologia que estabelece uma ordem de emprego das MCE. Primeiramente, todas as MCE com custo zero deveriam ser incluídas a um caso base. Propõem então um método

de múltiplas etapas em que as MCE são todas simuladas e avaliadas separadamente. A MCE com melhor relação custo-benefício é incorporada ao caso base. Todas as outras MCE são simuladas usando este novo caso base, e novamente a MCE com melhor relação custo-benefício é incorporada a um terceiro caso base. O processo é repetido até que apenas uma medida reste.

Chau et al. (2000) avaliaram diversas MCE a fim de criar um método quantitativo de avaliação do desempenho de edificações de Hong Kong, que até o momento era qualitativo, com quatro indicadores de desempenho: ruim, regular, bom, ótimo. Usaram a relação custo-benefício e a economia no custo do ciclo de vida, ECCV (*life-cycle cost savings*, LCCS), para avaliar medidas relativas à densidade de potência da iluminação artificial, ao uso de reatores eletrônicos e lâmpadas fluorescentes, ao *Overall Thermal Transmittance Value*, OTTV, em função do Percentual de Área de Janelas na Fachada e tipo de vidro, dentre outras medidas. Elas foram aplicadas em um protótipo de 40 pavimentos, de 36m por 36m, com zonas térmicas laterais e interior condicionadas, e uma zona central não condicionada. A Figura 12 apresenta os resultados do ECCV e da relação custo-benefício para três valores de OTTV. Deve-se lembrar que o desejado é um ECCV maior possível, ao contrário do CCV. As medidas representam combinações de coeficientes de sombreamento com Percentuais de Área de Janela na Fachada, PJF, que resultam em um determinado OTTV. Na figura, são mostradas as relações custo-benefício máximas e mínimas para três OTTV e seus custos do ciclo de vida. Percebe-se que o OTTV1, que apresenta o maior ECCV de HK\$ $8,70 \times 10^5$ tem uma relação custo-benefício igual ao OTTV2, de 0,05, porém um ECCV menor, de HK\$ $8,60 \times 10^5$. No entanto, o menor ECCV, de HK\$ $8,20 \times 10^5$, que é o pior caso sob a ótica do ECCV, é o melhor caso sob a ótica do custo-benefício, de 0,18.

Outro método de avaliação econômica é a análise de retorno de um investimento (Pay-back) que, de acordo com Martinaitis et al. (2004), é a medida de análise de custo mais popular. No entanto, estudos já mostraram que este indicador, ao não levar em conta o ciclo de vida de componentes, pode indicar períodos de retorno de investimentos em MCE maiores do que a vida útil de tais medidas. O Pay-back também incorre em erros quando duas MCE possuem o mesmo período de retorno, mas uma destas possui um ciclo de vida maior que a outra. Assim, decisões equivocadas podem ser tomadas se baseadas somente na análise de Pay-back.

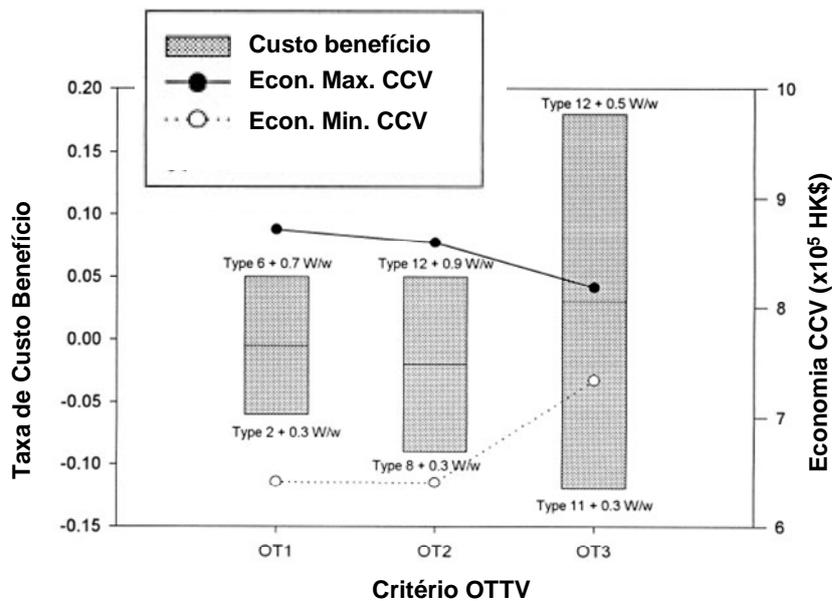


Figura 12 - ECCV e custo-benefício de algumas MCE. Fonte: CHAU et al., 2000.

A eficiência econômica de uma MCE pode ser avaliada, entretanto, com o Custo da Energia Conservada, CEC. Um investimento é economicamente interessante quando o CEC é menor que a tarifa de um kWh de energia (Equação 9) (ROSENFELD, 1996). O Custo da Energia Conservada permite uma interpretação direta dos resultados: é mais vantajoso consumir a energia – sem implementação de MCE – ou economizá-la – ao investir em uma MCE (MARTINAITIS et al., 2004).

$$CEC = TCC/\Delta E < \$kWh \quad \text{(equação 9)}$$

Onde,

CEC, custo da conservação de energia (\$/kWh);

TCC, custos totais da MCE (\$);

ΔE , energia economizada, ou conservada, em um ano (kWh);

$\$kWh$, custo de 1 kWh (\$/kWh).

Jacob e Madlener (2003) já afirmavam que o CEC era adequado para análises que não envolvem tempo, por considerar um ciclo de vida igual para todas as medidas de conservação de energia. Mas Martinaitis et al. (2004) incluíram a vida útil de uma MCE e o custo monetário de um capital emprestado no cálculo do CEC, conforme descrito na Equação 10.

$$CEC = (TCC / \Delta E) \cdot \left\{ d / \left[1 - (1 + d)^{-n} \right] \right\} \quad \text{(equação 10)}$$

Onde,

TCC, custo da MCE (\$);

ΔE , energia economizada (MWh);

n, a vida útil da MCE (anos);

d, a taxa de desconto (adimensional).

A Figura 13 apresenta o Custo da Energia Conservada (energia elétrica) para 12 Medidas de Conservação de Energia, comparando-se então quais as medidas mais eficazes na redução do consumo. Estas mostraram ser a medida 5, a medida 7 e a medida 9. As hachuras no gráfico representam os custos por consumo de energia que as medidas acarretariam, e são limitadas horizontalmente por 3 custos distintos de 1 kWh: para a edificação, o custo médio da eletricidade e o custo operacional típico em uma usina de geração de eletricidade (ROSENFELD, 1996).

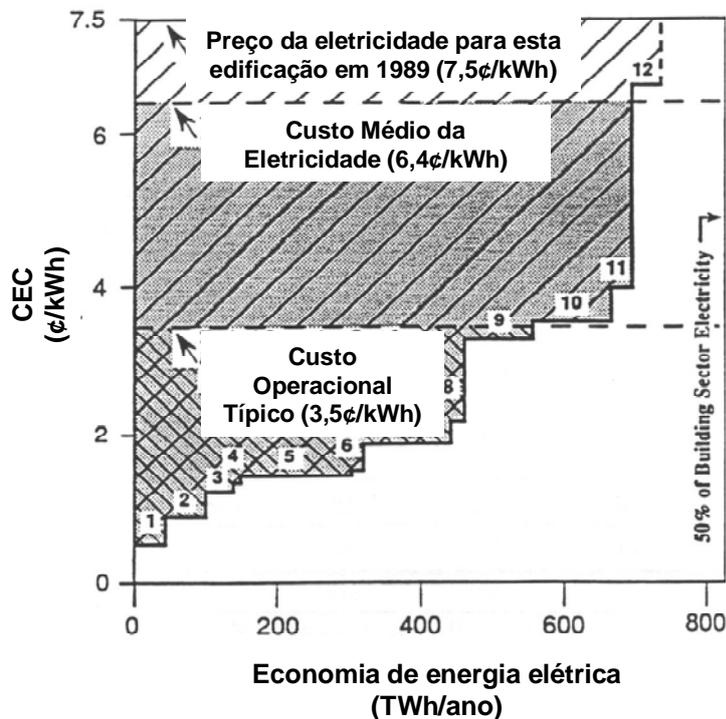


Figura 13 – Custo da Energia Conservada de 12 MCE. Fonte: ROSENFELD, 1996.

São de gráficos como o da Figura 13 que são geradas as CSC, curvas de conservação do fornecimento da energia. Estas geralmente representam a energia economizada de

grupos de edificações, sendo então utilizadas para caracterizar o potencial de economia de energia em segmentos de mercado ou a nível nacional (ROSENFELD, 1996). O CEC, entretanto, pode referir-se a um grupo de edificações ou a uma edificação somente, caracterizando todas as MCE passíveis de serem implementadas em uma edificação.

A aquisição de dados para cálculo de CEC também implica em incertezas. Willême (2003) propõe a adoção de uma distribuição de custos de implementação de uma MCE em substituição a um custo médio, de forma a se encontrar CEC menores que se usada a média de custos. O método exige que uma maior pesquisa de mercado seja realizada, já que o próprio pesquisador terá que providenciar uma ampla cotação de custos de materiais e serviços, mas permite chegar a um maior potencial de conservação de energia para diferentes custos da energia. Este método, no entanto, pode gerar tomadas de decisões equivocadas por adotar custos muito baixos que poderão não corresponder a uma situação real.

2.4.1. Considerações finais

Chau et al. (2000) mostraram que diferentes indicadores podem induzir a diferentes resultados. Eles devem ser definidos em função dos objetivos da avaliação, de forma a visualizar os resultados sob enfoques específicos. As Equações 3 (CCV, valor presente) e 10 (CEC) mostraram ser mais adequadas para uma avaliação comparativa de alternativas por considerarem a vida útil das MCE e as variações de custos ao longo do tempo.

As limitações no cálculo do CCV apontadas por Gluch e Baumann (2004) e mensuradas por Lee et al. (2003) através dos erros relativos podem ser compensadas adotando o cuidado que Wong et al. (2003) tiveram na avaliação do CCV de tetos-jardim, ao identificar e responder todas as questões relacionadas ao processo de listagem e coleta de dados. A dolarização da unidade monetária em relação a um poder de compra em um determinado ano é também uma opção que pode ser avaliada como substituição à construção de cenários econômicos utilizando a taxa de desconto. Por sua vez, a taxa de desconto dispensa uma pesquisa de valor de compra do dólar cada vez em que se deseja ter uma idéia dos custos em reais em um ano específico. Ela é estimada prevendo-se uma taxa inflacionária anual e a tendência dos preços das tarifas de energia (GLUCH e BAUMANN, 2003).

O método *multi-step* de Lee et al. (2003) permite que sejam identificadas MCE de maior impacto e pode ser interessante para ser usado juntamente com o Custo da Energia Conservada, pois pode classificar a eficiência da alternativa, mesmo que ela ainda esteja em processo de implementação de outras MCE. O CEC, por ser um indicador de rápida estimativa, pode ainda ser utilizado em larga escala para uma classificação inicial de múltiplas alternativas. Já a adoção da distribuição de custos de Willème (2003) implica na pesquisa exaustiva dos custos de materiais, o que não garante a eliminação das incertezas provenientes da adoção das médias de custos.

Ambos os métodos, CCV e CEC, convertem diversos condicionantes do consumo de energia em um parâmetro unidimensional que permite a avaliação e tomadas de decisão referentes à eficiência energética de alternativas de edificações. O CCV, entretanto, pode ser calculado independente da existência de um caso base, e não está diretamente relacionado a Medidas de Conservação de Energia. Já o CEC necessita de um caso base onde MCE são aplicadas a fim de possibilitar o seu cálculo. Resta saber a relação entre estes e qual pode indicar mais apropriadamente uma avaliação de custos envolvendo a eficiência energética.

2.5. Considerações Finais

Foi visto que as normas de eficiência energética costumam apresentar duas abordagens principais: uma prescritiva e outra por desempenho. A primeira envolve parâmetros pré-estabelecidos, com limites ou soluções envolvendo propriedades físicas dos componentes do envoltório, como transmitância térmica, fator solar de vidros e resistência térmica de isolamentos. A segunda envolve o desempenho global da edificação, cujos métodos de análise são modelagens numéricas com cálculos individualizados ou simulação computacional.

Nestes casos, a eficiência energética deve ser avaliada comparativa, com as características primárias comuns: forma, dimensões da edificação, tipo de condicionamento de ar, cargas internas e padrão de uso. Com estas características isoladas, é possível avaliar a eficiência em função das características secundárias, onde estão incluídas as características do envoltório, como propriedades térmicas de componentes ou existência de sombreamento.

Comparações realizadas com edifícios de referência estabelecem qual edifício é mais ou menos eficiente que o de referência. Uma base de dados com diversos edifícios já cadastrados pode gerar *benchmarkings*, onde se avalia a eficiência de o edifício é mais ou menos eficiente em relação a um grupo extenso. Este grupo pode ser descrito pela atividade comercial ou institucional dos edifícios (que tendem a conter características primárias semelhantes) e pode alcançar abrangência nacional. Atividades mais comuns na literatura internacional que atendem à realidade brasileira são escritórios, lojas (vendas de mercadorias exceto alimentos), hotéis, hospitais, escolas, restaurantes e supermercados, podendo ainda ser divididas de acordo com suas dimensões.

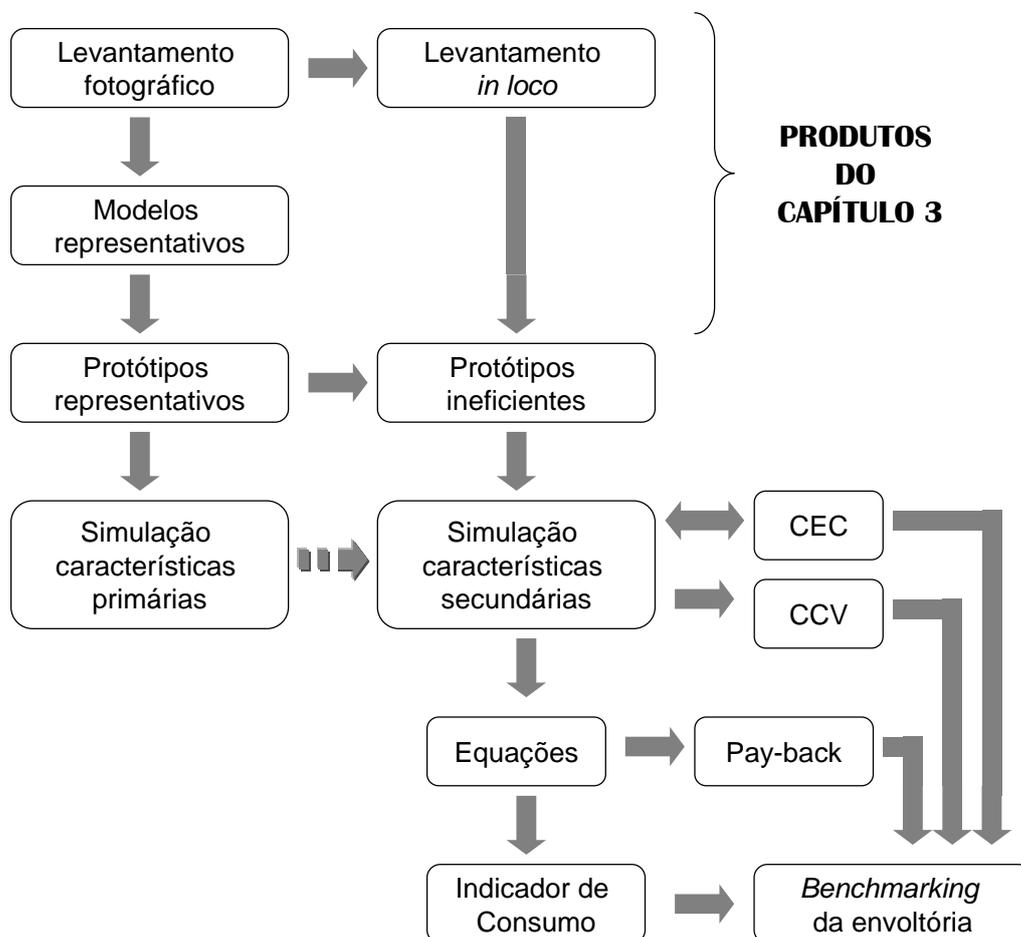
Dados que atendem à eficiência energética e que são necessários para gerar modelos de edificações podem ser obtidos através de levantamentos de diversas naturezas. Em geral, é comum coletar: área e número de pavimentos, área de vidro nas fachadas, materiais componentes do envoltório, cargas internas de iluminação e equipamentos, tipo de condicionador de ar, horas de uso da edificação e número de usuários.

A alteração destas características para melhorar a eficiência da edificação é conhecida como Medida de Conservação de Energia (MCE). A economia no consumo de energia reflete-se, em geral, em uma economia de custos com o uso da edificação. Assim, a análise de custos integrada à análise da eficiência é interessante para caracterizar de forma mais completa a avaliação da eficiência da edificação: o investimento realizado

em um MCE deve ser compensado pela economia no consumo proporcionada por esta medida. Diversos indicadores podem descrever esta condição, cada qual com um enfoque específico. Dentre os indicadores de custos mais utilizados, estão o pay-back, pela sua facilidade de cálculo, o Custo da Energia Conservada, tradicional na avaliação de Medidas de Conservação de Energia, e o Custo do Ciclo de Vida, por abranger diversas variáveis que compõem os custos de uma edificação em uso.

As MCE devem ser indicadas de acordo com as soluções mais apropriadas em uma edificação. Em uma análise global envolvendo diversas edificações, é necessário conhecer o universo de edificações construídas, seja em uma cidade, região ou país. Quando este universo não é conhecido, a etapa inicial para avaliação da eficiência energética de edificações consiste em um estudo de campo para coletar as características relevantes para o desempenho energético de edificações.

CAPÍTULO 3. ESTUDO DE CAMPO



CAPÍTULO 3. ESTUDO DE CAMPO

3.1. Introdução

O consumo de energia depende de diversas variáveis, como as características físicas da edificação, do sistema de iluminação, do sistema de condicionamento de ar, dos equipamentos e da forma de utilização da edificação pelos usuários. Para avaliar a eficiência energética de uma edificação, deve-se conhecer como estas variáveis são usadas nas edificações, o que será visto neste capítulo; e ter domínio de sua influência no desempenho energético da edificação, o que será visto no próximo capítulo.

A avaliação de eficiência energética que se propõe envolve um processo baseado na realidade construtiva nacional, de forma que a tomada de decisões atenda às atuais necessidades de melhorar a eficiência energética de edificações. Desta forma, materiais e componentes comumente adotados nas edificações, bem como algumas tipologias de fachada, todos intervenientes no consumo de energia elétrica, devem ser utilizados para criação de modelos base de edificações comerciais.

Entretanto, não há informações consolidadas das características físicas e de uso de edificações não-residenciais pela indústria brasileira da construção civil, o que exigiu um estudo de campo para suprir tal deficiência. O estudo de campo enfocou as características que contêm os parâmetros físicos que influenciam no consumo de energia da edificação, e foi dividido em levantamento fotográfico e levantamento *in loco*.

O levantamento fotográfico foi realizado através da coleta de fotografias de edificações em 5 cidades distintas: Florianópolis, São Paulo, Salvador, Recife e Belo Horizonte. O levantamento forneceu volumetrias típicas para algumas atividades comerciais e outras características relacionadas ao exterior das edificações. Estas características permitiram gerar edificações “médias”, ou seja, modelos de edificações com características mais freqüentes na paisagem urbana.

Em seguida, o levantamento *in loco* recolheu as características internas de um exemplo típico de cada atividade na cidade de Florianópolis. Este exemplo típico formou um modelo representativo para cada atividade definida por diferentes volumetrias.

As características investigadas foram:

- do envoltório: percentual de área de janelas nas fachadas, o tipo de vidro, com a espessura, a cor e a existência de películas, o tipo de parede incluindo sua espessura e identificação de suas camadas, as camadas da cobertura e a existência e dimensões das proteções solares;
- do edifício: a forma, o número de pavimentos e orientação do edifício;
- dos sistemas: as cargas internas, o padrão de uso de ocupação e dos sistemas de iluminação, equipamentos e condicionamento de ar e as características do sistema de condicionamento de ar.

Como resultados, foram gerados modelos representativos de edificações que podem ser disponibilizadas para avaliações energéticas ou para simulação computacional do desempenho termo-energético de edificações de uso comercial.

3.2. Metodologia

3.2.1. Levantamento fotográfico

O levantamento fotográfico foi realizado em cinco capitais brasileiras a fim de obter informações gerais sobre o mercado construtivo nacional, para gerar modelos representativos de maior abrangência. As cidades são: Salvador, Recife, Belo Horizonte, São Paulo e Florianópolis.

O levantamento fotográfico registrou um número de edificações localizadas nas regiões metropolitanas das cidades envolvidas para posterior classificação dos parâmetros alvo das fotografias. Os percursos foram definidos visando registrar o maior número de edificações dentro do perímetro urbano em um menor tempo. Assim, os centros urbanos foram selecionados e, dentro destes, as ruas e avenidas em que se sabe há um grande número de edificações comerciais. Foram incluídas também áreas conhecidas por abrigar um grande número de edificações de uma só atividade comercial, como região de hospitais ou de restaurantes.

As edificações fotografadas deveriam conter exclusivamente um tipo de atividade exercida em seu interior. Este critério excluiu edificações com uso híbrido, ou seja, uma edificação que porventura abrigasse um restaurante no primeiro andar e um curso de línguas no segundo andar não fez parte da amostra. Este procedimento visou obter características de edificações cujo uso é exclusivo, para viabilizar a identificação de sua atividade comercial e posterior classificação de suas características. São exceções edifícios de escritórios com lojas no térreo e hotéis que contenham pequenas lojas e restaurantes.

As seguintes atividades, baseadas em Huang et al. (1991) e Huang e Franconi (1999) e adaptadas para a realidade brasileira, foram contempladas:

- Escritórios e bancos
- Lojas de vendas de mercadorias não alimentícias
- Restaurantes e lanchonetes
- Hotéis e pousadas
- Supermercados
- Hospitais e grandes clínicas

- Escolas

Embora hospitais e escolas não sejam interpretados exatamente como edificações comerciais, e sim edificações institucionais, eles têm uso não-residencial e foram incluídos no levantamento fotográfico devido às suas ocorrências serem comuns na paisagem urbana e seus usos serem bastante diferenciados das demais atividades.

Além destas, outras atividades foram registradas para verificar sua frequência de ocorrência na paisagem urbana, como clubes e academias. Como não mostraram ser significativas, não foram consideradas válidas e foram excluídas na contagem final da amostra.

A Tabela 2 apresenta o número de amostras necessárias para representar uma população de edifícios para erros de 5% e 10%. A partir destes dados, o universo de edificações comerciais na região metropolitana de Florianópolis que continham uso exclusivo com somente uma atividade foi investigado. A lista telefônica da região foi utilizada por conter a atividade comercial e o endereço da edificação, de forma a excluir edificações com mais de uma atividade. Apesar de carecer de precisão, esta é a única fonte disponível para avaliação, visto que associações comerciais ou até prefeituras não possuem dados que atendam aos critérios estabelecidos. Foi encontrado, para a região metropolitana de Florianópolis, um universo de 3433 edificações que atendem a estas características, sendo então estabelecida uma amostragem alvo de 98 unidades.

Não foi possível reunir dados de edificações em listas telefônicas nas demais cidades. Considerando que a amostra para erro 10% de uma população infinita de edifícios são 100 edificações, este número foi considerado o mínimo de edificações a ser fotografada em cada cidade.

A volumetria foi estabelecida como primeira característica a ser investigada. As fotografias foram utilizadas para diferenciar grupos com volumetrias em comum devido à grande influência desta característica no consumo de energia. Como edificações com volumetrias distintas não permitem comparações entre seus consumos e eficiências, quaisquer outras características podem ser comparadas somente entre grupos de edificações com volumetrias equivalentes. Esta característica primária é verificada com a forma, dimensões em planta e o número de pavimentos da edificação.

O processamento dos dados de volumetria de edificações foi relacionado com as atividades comerciais exercidas em cada edificação. Foi identificada uma atividade

comercial que possa ser representada por uma volumetria diferenciada. Atividades comerciais representadas por uma mesma volumetria foram selecionadas de acordo com o seu número de amostras, a fim de se obter as mais representativas.

Tabela 2 – Número de amostras necessárias para representar uma população de edifícios.

População	erro	erro	População	erro	erro
	5%	10%		5%	10%
10	10	10	800	260	86
20	20	17	900	270	87
30	28	24	1000	278	88
40	37	29	1500	316	94
50	45	34	2000	333	95
75	63	43	2500	345	96
100	80	50	3000	353	97
150	109	59	4000	364	98
200	132	66	5000	370	98
250	152	70	10000	383	99
300	169	73	15000	390	99
400	197	78	20000	392	100
500	218	81	50000	397	100
600	235	83	100000	398	100
700	249	85	infinito	400	100

Fonte: Toledo, 2004.

Após este procedimento, as demais características foram classificadas em função desta atividade a fim de se encontrar uma tipologia de fachada típica para cada atividade comercial. Elas foram Percentual de Área de Janela na Fachada, cor dos vidros, existência de película nos vidros e existência e dimensões das proteções solares. Foram obtidas através de observação das fotos, eliminando aquelas que não continham um ângulo adequado que permitisse visualizar as características ou proporções de fachadas

e áreas. A frequência de ocorrência foi verificada a fim de se encontrar as características externas mais comuns para cada atividade.

Assim, foram selecionadas as características mais comuns cuja combinação (PJF, vidros, sombreamento, número de pavimentos) é considerada uma tipologia externa típica de uma atividade comercial.

3.2.1.1. Limitação do levantamento

O universo de edificações estabelecido refere-se a um número total das edificações comerciais cujas atividades foram pré-definidas. Caso fosse estimado um número total de edificações para cada atividade, o número de amostras (amostragem estratificada) seria inviável, como visto na Tabela 3 para Florianópolis. Nesta, sete atividades comerciais foram identificadas (hotéis e pousadas estão separados, resultando em oito atividades) com um número total de 3433 edificações. Para um erro de 10%, um número mínimo de amostras seria de 596 unidades. Considerando que, para as outras cidades, não foi possível realizar uma estimativa confiável do número total de edificações por atividade, deveriam ser consideradas 100 amostras por atividade, o que resultaria em 800 edificações fotografadas em cada cidade. Este critério inviabilizaria os levantamentos devido ao tempo e aos custos despendidos para alcançar tais metas. Desta forma, a amostragem estratificada foi descartada, embora fosse mais precisa.

Tabela 3 – Número estimado de edificações na região metropolitana de Florianópolis que contêm somente uma atividade comercial em funcionamento em seu interior e o número de amostras necessárias para erro de 5% e 10%.

Atividade	Edificações	Erro 5%	Erro 10%
Supermercados	153	132	66
Hotéis	200	132	66
Pousadas	160	109	59
Hospitais e clínicas	134	109	59
Escolas	174	132	66
Lojas	515	218	81
Escritórios	1574	316	94
Restaurantes	458	218	81
Total	3433	1394	596

3.2.2. Levantamento *in loco*

O levantamento *in loco* foi realizado para complementar as características internas da edificação de forma a se obter um modelo completo para cada atividade. Para tanto, partiu-se dos resultados do levantamento fotográfico para selecionar uma edificação real em Florianópolis cuja tipologia externa fosse a mais semelhante possível à tipologia típica encontrada com as fotografias. Assim, cada atividade comercial é representada por um modelo de edificação real, cada qual com uma volumetria distinta.

Como o modelo representativo a ser gerado pelos levantamentos podia não existir na paisagem urbana, foi estabelecida uma ordem de prioridade para seleção da edificação real:

Atividade comercial → volumetria → percentual de área de vidro → tipo de vidro e proteção solar.

Selecionadas as edificações, o levantamento *in loco* pretende verificar as características restantes destas edificações selecionadas que interferem no consumo de energia e, portanto, na eficiência energética. Foi realizado através de visitas às edificações, com entrevistas a responsáveis e registros fotográficos quando permitidos. Nesta etapa do estudo de campo foram obtidos os seguintes dados: as cargas internas de equipamentos, iluminação e ocupação, os padrões de uso da edificação, espessuras e componentes de paredes e componentes da cobertura, características obtidas através de inspeções no local e inquirição a um responsável pela edificação.

As bienais de consumo de energia das edificações selecionadas foram obtidas junto à concessionária local de energia elétrica, CELESC, a fim de avaliar o seu consumo de energia. Além das edificações selecionadas para visita, foram coletadas outras amostras para avaliar o consumo médio da edificação selecionada. Além disso, estas amostras de consumo visavam verificar a tarifa de energia praticada por estas unidades consumidoras.

Através de uma lista de 450 edificações comerciais do grupo tarifário A4 da CELESC, as edificações foram divididas segundo suas atividades e duas edificações de cada foram selecionadas aleatoriamente. As edificações selecionadas na paisagem urbana foram incluídas na amostra de bienais desde que estas pertencessem ao grupo tarifário A. Caso contrário, uma cópia da conta de energia elétrica da edificação seria solicitada durante a visita. Vale lembrar que todos os dados recolhidos durante as visitas ou junto à

CELESC são sigilosos e os nomes das edificações ou das empresas envolvidas não são citados neste estudo.

O Quadro 3 apresenta um resumo das informações colhidas no estudo de campo. As informações permitiram a estimativa das variáveis apresentadas na terceira coluna do quadro.

Dados externos como Percentual de Área de Janela na Fachada, dimensões de proteções solares e número de pavimentos foram conferidos no local ou, em edificações mais complexas, através do projeto arquitetônico que foi solicitado.

Algumas variáveis foram obtidas através de observação, como densidade de carga interna de iluminação e equipamentos, ao verificar a potência e número de lâmpadas e equipamentos.

Dados mais técnicos como Fator Solar dos vidros exigiu maior esforço de obtenção, sendo estimado a partir do ano de construção da edificação, cores dos vidros, existência de película e de sua espessura aproximada. Com estes dados, catálogos de fabricantes foram consultados para estabelecer Fatores Solares prováveis para os vidros. Já a Transmitância Térmica de paredes foi obtida observando-se sua espessura e o seu acabamento, com informações acerca dos materiais utilizados complementadas com entrevistas ao proprietário ou ao seu representante, o que inclui o ano de construção do edifício, senão os materiais em si. Este último artifício também é válido para a cobertura. Embora haja incertezas em tais informações, acredita-se que a coleta de todas estas informações permitiu uma aproximação satisfatória da transmitância térmica real de tais componentes.

Outros dados obtidos através de entrevistas são: o padrão de uso do edifício, a ocupação média dos ambientes e a capacidade do sistema de condicionamento de ar, principalmente quando o sistema é central. Neste caso, as entrevistas são voltadas ao responsável pela manutenção do sistema. Além disso, todas as informações foram complementadas com fotografias quando autorizadas, o que não ocorreu em todas as edificações.

Quadro 3 – Informações obtidas no estudo de campo.

Tema		Unidade ou tipo de resposta	Variável obtida
Ano de construção da edificação		número	
Dimensões		m	
Forma da edificação		retangular, em H, circular, etc	
Área da edificação		m ²	
Número de pavimentos		número	
Percentual de Área de Janela na Fachada		%	PJF
Proteção solar	Dimensões das janelas	m	Ângulos de Sombreamento (AHS e AVS)
	Dimensões dos brises	m	
Vidro	Cor	incolor, verde, azul, cinza, etc	Fator Solar (FS)
	Espessura	mm	
	Película refletiva	Sim ou não	
Parede	Camada externa	Material 1	Transmitância Térmica (U_{par})
	Camada 2	Material 2	
	Camada 3	Material 3	
	Camada interna	Material 4	
	Cor	Cor	Absortância solar (α_{par})
Cobertura	Camada externa	Material 1	Transmitância Térmica (U_{cob})
	Camada 2	Material 2	
	Camada 3	Material 3	
	Camada interna	Material 4	
	Cor	Cor	Absortância solar (α_{cob})
Ocupação média		peças/m ²	Densidade de Carga Interna

Tema		Unidade ou tipo de resposta	Variável obtida
Horas de funcionamento	Dias úteis	horas	Padrão de uso
	Fim de semana	horas	
Densidade de carga média	Equipamentos	W/m ²	Densidade de Carga Interna
	Iluminação	W/m ²	
Total de horas de uso	Equipamentos	horas	Padrão de uso
	Iluminação	horas	
Sistema de condicionamento de ar	Resfriamento	tipo	Características do condicionador de ar
	Capacidade	kW (BTU ou TR)	
	Aquecimento	tipo	
	Capacidade	kW (BTU ou TR)	

As características externas mais freqüentes no levantamento fotográfico e as características internas identificadas no levantamento *in loco* formam um modelo de edificação representativo de uma atividade comercial, cada qual com uma volumetria diferenciada. Em resumo, o procedimento adotado no estudo de campo consistiu em:

- Levantamento fotográfico das características externas de edificações não-residenciais em 5 capitais brasileiras;
- Classificação da volumetria, identificando atividades comerciais cuja volumetria diferenciada das demais seja representativa da atividade;
- Classificação das demais características externas em função das atividades comerciais selecionadas;
- Definição de uma tipologia externa representativa da atividade com as características mais freqüentes;
- Identificação de uma edificação real em Florianópolis cujas características são equivalentes a cada tipologia externa encontrada;
- Levantamento das características internas destas edificações reais, incluindo obtenção das suas bienais de consumo de energia;
- Definição de um modelo representativo de cada atividade comercial.

3.3. Resultados

3.3.1. Levantamento fotográfico

Foram registradas 1103 edificações em 5 capitais brasileiras: Florianópolis, São Paulo, Salvador, Recife e Belo Horizonte, distribuídas pelas 10 atividades comerciais e institucionais conforme Tabela 4. A meta de um número mínimo de 100 edificações amostradas não foi alcançada somente em Salvador. Apesar dos centros urbanos e empresariais terem sido largamente percorridos, não foi possível fotografar edificações comerciais em grande número seguindo os critérios estabelecidos pela pesquisa. Acredita-se que o caráter histórico das edificações de diversas regiões da cidade combinado ao critério de registro de edificações com uma atividade exclusiva em seu interior pode ter restringido o número de amostras². Percebeu-se também um elevado número de edifícios residenciais em áreas próximas às comerciais. É interessante notar que poucos hotéis foram passíveis de registro pelas fotografias. Há a possibilidade de muitos terem sido interpretados como edificações residenciais ou o seu térreo abrigar atividades alheias a restaurantes ou lojas.

Tabela 4 – Número de amostras fotografadas em cada cidade, segundo sua atividade.

	Gde Escritório	Pqno Escritório	Hotel	Pousada	Gde Loja	Pqna Loja	Restaurante	Supermercado	Hospital e Clínica	Escola	Total
Florianópolis	52	39	13	11	33	88	50	15	12	13	326
São Paulo	48	14	1	-	17	11	4	7	9	16	127
Recife	68	-	10	-	-	25	3	-	4	5	115
Salvador	32	3	2	-	4	-	1	-	3	-	45
Belo Horizonte	89	12	56	-	45	32	87	42	55	72	490
Total	289	68	82	11	99	156	145	64	83	106	1103

O maior número de edificações amostradas foi registrado na cidade de Belo Horizonte, totalizando 490 edificações válidas. Somente a atividade de pousadas não foi registrada, tipo de hospedagem pouco comum na cidade.

² Edificações antigas tendem a ter seu uso original alterado ao longo do tempo, sendo comum a divisão de seus espaços para a instalação de diversas atividades comerciais. Como exemplo, edificações originariamente residenciais que, devido ao crescimento da cidade e conseqüente desvalorização do bairro, tornaram-se edificações comerciais.

De fato, pousadas foram apenas registradas na cidade de Florianópolis. O maior número de amostras obtido foi de grandes escritórios, 289 no total, seguido de pequenas lojas, 156. Outras atividades que ultrapassaram 100 edificações na totalização das 5 cidades foram pequenas lojas, restaurantes e escolas. O Anexo 1 apresenta alguns exemplos registrados no levantamento.

O levantamento fotográfico possibilitou a identificação de 5 volumetrias diferenciadas, consideradas típicas para cada atividade comercial e mostradas na Figura 14:

- Edificação horizontal, planta pequena: pequenas lojas, restaurantes, pousadas (1 ou 2 pavimentos, proporção das fachadas de 1:2);
- Edificação horizontal, planta média: pequenos escritórios, escolas (2 pavimentos, forma retangular, proporção das fachadas maior que 3:1);
- Edificação horizontal, planta grande: grandes lojas, supermercados (1 ou 2 pavimentos proporção das fachadas menor que 1:2);
- Edificação horizontal, planta grande: hotéis (5 pavimentos, forma retangular, proporção das fachadas maior que 3:1);
- Edificação vertical, planta média: grandes escritórios, hospitais (5 pavimentos, forma retangular, proporção das fachadas maior que 3:1).

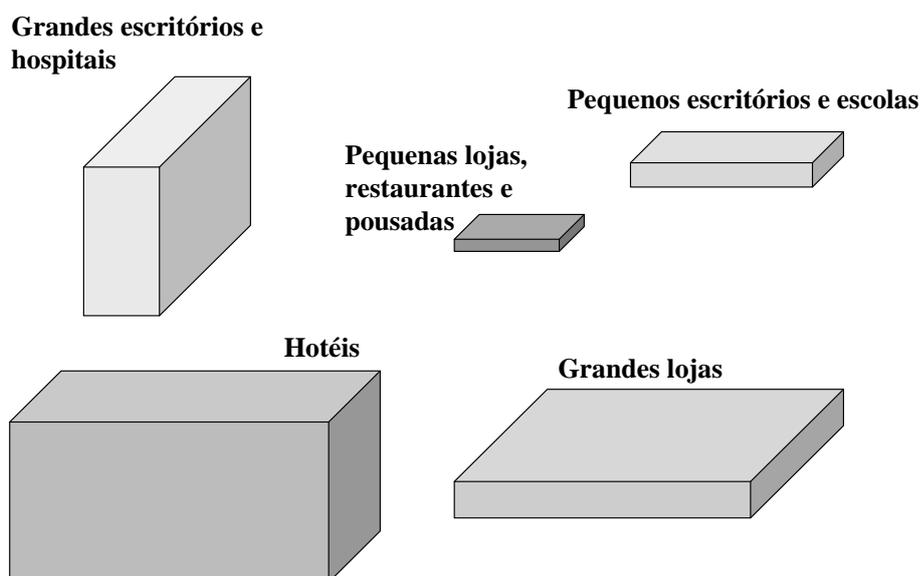


Figura 14 – Volumetrias representativas das atividades comerciais levantadas.

Das atividades citadas acima, foram selecionadas as grandes e pequenas lojas, os grandes e pequenos escritórios e o hotel. O critério para seleção foi o número de

amostras, exceto para os pequenos escritórios. Eles foram selecionados em detrimento das escolas devido à facilidade de se encontrar um sistema de condicionamento de ar em escritórios, o que nem sempre é comum em escolas, principalmente as da rede pública. Entretanto, os modelos podem ser considerados válidos para edificações comerciais e institucionais.

As características adicionais registradas no levantamento fotográfico foram classificadas em função destas atividades comerciais. Os percentuais de área de janela na fachada, PJF, ângulos de sombreamento, número de pavimentos e forma foram contabilizados para as 5 cidades.

A Figura 15 mostra o Percentual de Área de Janela na Fachada predominante nas edificações amostradas nas cinco cidades. É clara a visualização de que a maioria das edificações apresenta um PJF entre 21% e 40%, exceto os grandes escritórios, cujo PJF predominante é entre 41% e 60%. Pequenos escritórios e hotéis podem apresentar uma ocorrência secundária e ainda significativa de aberturas pequenas nas fachadas, abaixo de 20%. As maiores aberturas são mais comuns nas grandes lojas, podendo variar de 21% a 80%.

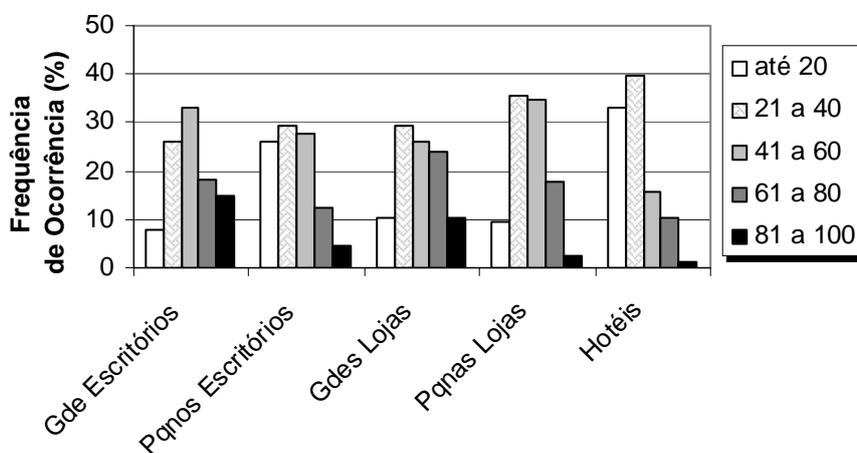


Figura 15 – Frequência de ocorrência do PJF de todas as fachadas visíveis nas amostradas nas cinco cidades.

A Figura 16 mostra a predominância da cor do vidro nas edificações. A maioria destas possui vidro incolor, sendo que nos grandes escritórios a cor cinza predomina em 70% das edificações. Há pouca ocorrência do vidro azul, presente em menos de 20% dos escritórios, grandes lojas e hotéis. Menor ainda é a ocorrência dos vidros bronze ou

verdes, presentes em menos de 20% dos hotéis e em menos de 10% dos grandes escritórios.

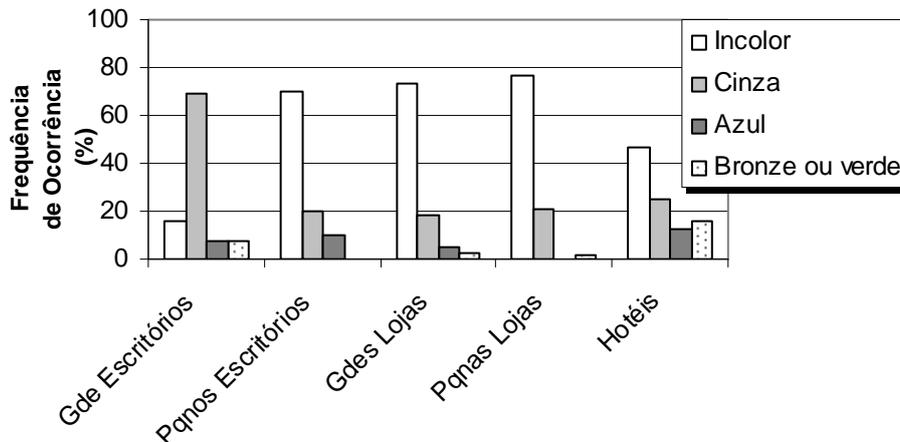


Figura 16 – Frequência de ocorrência da cor dos vidros das edificações amostradas nas cinco cidades.

A frequência de ocorrência do Ângulo Vertical de Sombreamento nas amostras está presente na Figura 17. Nesta, percebe-se que a maioria das edificações não possui proteção solar horizontal. Das que possuem, o AVS de até 25° é mais comum nas lojas: 45% das pequenas lojas e 36% das grandes lojas possuem proteções, geralmente marquises, em suas fachadas principais. Em seguida, 35% dos pequenos escritórios também apresentam uma ocorrência significativa de ângulos de sombreamento de até 25°. Ângulos acima deste limite, ou seja, com maior capacidade de sombreamento da abertura vertical, não são comuns.

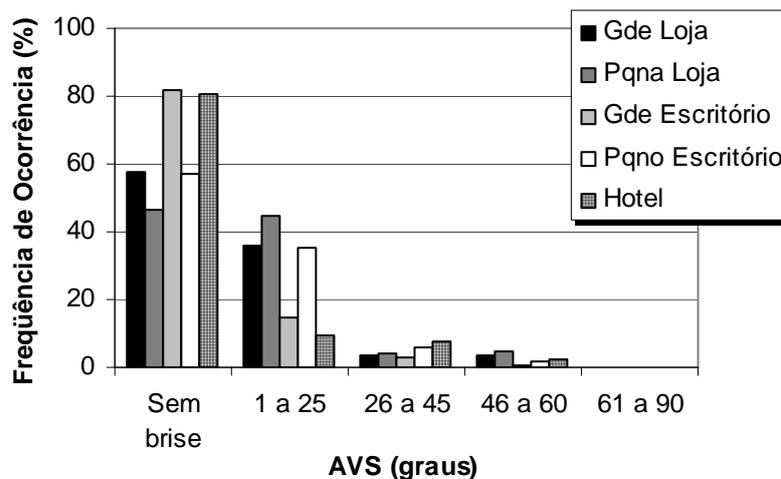


Figura 17 – Frequência de ocorrência do AVS das edificações amostradas nas cinco cidades.

Menos comuns ainda são os Ângulos Horizontais de Sombreamento, referentes à existência de proteções solares verticais nas aberturas, mostrados na Figura 18. Podem ser considerados de uso irrelevante em todas as atividades verificadas.

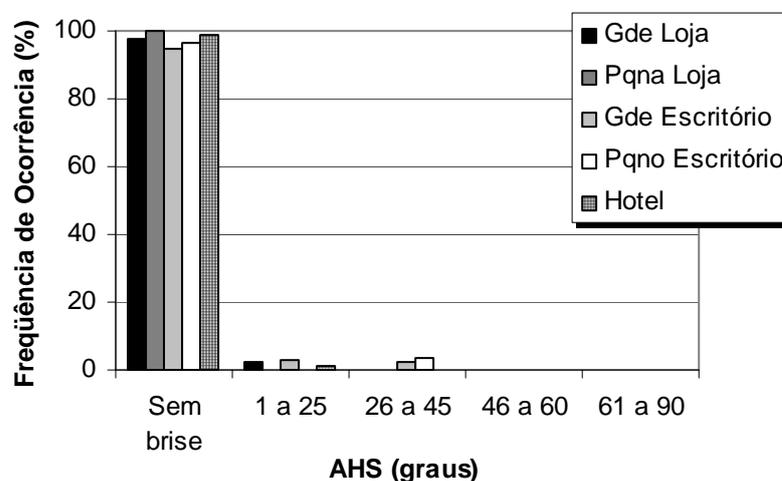


Figura 18 – Frequência de ocorrência do AHS das edificações amostradas nas cinco cidades.

Quanto às películas, não foi possível avaliá-las separadamente dos vidros, tanto em relação à sua cor quanto à sua refletividade; devido à distância das fotografias e devido à reflexão nos próprios vidros, responsável pelo ofuscamento na imagem.

3.3.2. Levantamento *in loco*

A edificação real selecionada como base para o modelo representativo teve suas características externas definidas no levantamento fotográfico e uma edificação de Florianópolis que possuía tais características foi escolhida, de acordo com a prioridade estabelecida na metodologia.

Desta forma, é apresentado, em cada tabela, o modelo representativo de uma atividade comercial, porém com informações adicionais sobre a edificação real no texto que descreve a tabela.

A Tabela 5 apresenta as características do modelo dos grandes escritórios. Algumas características o diferenciam de um modelo mais comum, como existência de película refletiva apenas nas fachadas laterais, sendo que a fachada principal possui vidro não refletivo cinza. As paredes são de alvenaria de blocos de concreto de 25 cm e a cobertura é formada por um sanduíche de fibrocimento com poliestireno expandido. O

sistema de condicionamento de ar é formado por um *self* em cada andar, atendidos por uma torre de arrefecimento. O padrão de uso de ocupação é dividido pelo horário de almoço para os funcionários, e o padrão de uso de equipamentos está em separado pois refere-se ao horário dos equipamentos utilizados na faxina após o expediente de trabalho, que se encerra às 18h.

Tabela 5 – Parâmetros do modelo dos grandes escritórios.

Parâmetros		Variáveis
Dimensões retangulares		27 x 7,8 m
Número de pavimentos		5+1
Percentual de Área de Janela na Fachada principal		46%
Vidro	cor	cinza
	espessura	3 mm
	película refletiva	Incolor (laterais e fundos)
Transmitância Térmica	Paredes	2,39 W/m ² K
	Cobertura	1,17 W/m ² K
Absortância	Paredes	0,35
	Cobertura	0,60
Ocupação média		19,57 m ² /pessoa
Densidade de carga interna	Iluminação	6,7 W/m ²
	Equipamentos	9,6 W/m ²
Padrão de uso	Ocupação	8-12; 14-18 h
	Iluminação	8-22 h
	Equipamentos	8-18; 19 h
Características do sistema de condicionamento de ar	Tipo	<i>self</i>
	Capacidade	26,35 kW (7,5 TR)
	Observação	Condensador a água

A Tabela 6 apresenta as características do modelo das grandes lojas, representado por uma loja de departamentos. O modelo é basicamente formado por um grande ambiente onde são expostos os produtos iluminados com lâmpadas fluorescentes sem refletores e área de vidro somente na fachada principal. A área da loja, onde estão expostas as mercadorias, é atendida por um sistema central de condicionamento de ar com *chillers*, totalizando uma capacidade de 562,20 kW (160 TR) que funciona plenamente no verão e somente com os ventiladores durante o inverno. Deve-se lembrar do clima onde se encontra a loja visitada para entender o funcionamento do sistema de condicionamento de ar: Florianópolis é quente no verão e frio no inverno. Em outros climas, este padrão de uso tende a ser diferenciado. Há também uso exclusivo dos ventiladores durante as primeiras horas de funcionamento, quando a loja não está aberta ao público. Um condicionador de ar do tipo *self* de 17,57 kW (5 TR) atende a área administrativa, sendo que as demais circulações de serviço não são condicionadas, incluindo os elevadores de carga e o elevador a serviço do público. O Percentual de Janela na Fachada da edificação real é de cerca de 20% e concentra-se somente na fachada principal, sendo as demais cegas. Este baixo percentual refere-se à proteção lateral do segundo pavimento, que funciona como estacionamento descoberto. Assim, este percentual foi alterado para 75% na fachada principal, de acordo com os resultados do levantamento fotográfico.

É interessante ressaltar a ocupação da loja da Tabela 6. O número médio de usuários no edifício foi ajustado para se ter uma ocupação máxima por hora, visto que a simulação do protótipo será horária. No entanto, não foram contabilizadas as pessoas que entram em grupos na loja, tampouco as que entram e saem sem nada comprar, por falta de meios de se realizar tal contagem. Assim, o número de usuários refere-se ao número de pessoas que passam pelo caixa, mais os funcionários presentes naquele horário.

Tabela 6 – Parâmetros do modelo das grandes lojas.

Parâmetros		Variáveis
Dimensões retangulares		66 x 44,5 m
Número de pavimentos		2
Percentual de Área de Janela na Fachada principal		75%
Ângulo vertical de sombreamento na fachada principal		35°
Vidro	cor	incolor
	espessura	6 mm
	película refletiva	não

Transmitância Térmica	Paredes	2,39 W/m ² K	
	Cobertura	2,04 W/m ² K	
Absortância	Paredes	0,40	
	Cobertura	0,80	
Ocupação média		8,82 m ² /pessoa	
Densidade de carga interna	Iluminação	8,3 W/m ²	
	Equipamentos	2,7 W/m ²	
Padrão de uso	Ocupação	7-21 h	
	Iluminação	7-21 h	
	Equipamentos	9-20 h	
Características do sistema de condicionamento de ar	1	Tipo	Central com chillers
		Capacidade	562,20 kW (160 TR)
		Observação	Condensador a água. Atende a loja.
	2	Tipo	<i>self</i>
		Capacidade	17,57 kW (5 TR)
		Observação	Área administrativa

O modelo de pequenos escritórios é apresentado na Tabela 7. É formado por uma edificação de dois pavimentos, onde trabalham oito funcionários em período integral, mas também com atendimento ao público em parte do dia, daí a separação dos padrões de uso em dois períodos, mesmo que consecutivos. A cobertura é pintada de branco, sendo as paredes em cores médias. O PjF é de 42% na fachada principal e 20% na lateral, sendo as demais fachadas cegas. Possui pé direito duplo em cerca de 50% de sua área. Possui também um subsolo, usado somente como garagem e com iluminação natural abundante durante o dia (somente uma luminária permanece acesa). O primeiro pavimento, onde funciona a área de escritório propriamente dita, é servido por dois sistemas centrais de condicionamento de ar. Caso o primeiro não consiga atender as exigências de conforto, a segunda central é acionada manualmente. Os aparelhos condicionadores de ar do tipo *split* atendem à CPD no segundo pavimento, onde

também funcionam cozinha, banheiros e depósitos, porém não condicionados. A edificação visitada corresponde aos dados médios do envoltório obtidos através do levantamento fotográfico, exceto pela cor dos vidros, que na edificação real são incolor e no modelo é cinza.

Tabela 7 – Parâmetros do modelo de pequenos escritórios.

Parâmetros		Variáveis	
Dimensões retangulares		11 x 38 m	
Número de pavimentos		2+1	
Percentual de Área de Janela na Fachada		42%	
Vidro	cor	cinza	
	espessura	3 mm	
	película refletiva	Sim, fachada principal	
Transmitância Térmica	Paredes	2,39 W/m ² K	
	Cobertura	2,04 W/m ² K	
Absortância	Paredes	0,50	
	Cobertura	0,30	
Ocupação média		8,19 m ² /pessoa	
Densidade de carga interna	Iluminação	36,7 W/m ²	
	Equipamentos	17,3 W/m ²	
Padrão de uso	Ocupação	9-18; 18-22 h	
	Iluminação	9-18; 18-22 h	
	Equipamentos	9-18; 18-22 h	
Características do sistema de condicionamento de ar	1	Tipo	Central
		Capacidade	35,14 e 42,16 kW (10 e 12 TR)
		Observação	2 <i>selfs</i>
	2	Tipo	<i>Split</i>
		Capacidade	3,51 kW (12000 BTU/h)
		Tipo	2 no CPD

A Tabela 8 apresenta as características do modelo de pequenas lojas. Composta do térreo mais um subsolo, contém a área de vendas no térreo e estoque, cozinha e

administração no subsolo. Concentra um maior número de funcionários e clientes no segundo turno de trabalho. Os aparelhos *split* da loja são acionados quando necessários, sem padrão definido, geralmente no verão. A loja possui toldos com a função de sombreamento somente em 50% de sua fachada principal, mas foram consideradas devido aos resultados do levantamento fotográfico de Florianópolis. As fachadas laterais são cegas e a posterior apresenta um PJF baixo, de cerca de 15% (janelas da área de vendas e subsolo).

Tabela 8 – Parâmetros do modelo de pequenas lojas.

Parâmetros		Variáveis	
Dimensões retangulares		16 x 10 m	
Número de pavimentos		1+1	
Percentual de Área de Janela na Fachada principal		46%	
Ângulo vertical de sombreamento da fachada principal		35°	
Vidro	cor	Incolor	
	espessura	4 mm	
	película refletiva	Não	
Transmitância Térmica	Paredes	3,62 W/m ² K	
	Cobertura	2,06 W/m ² K	
Absortância	Paredes	0,7	
	Cobertura	0,7	
Ocupação média		11 e 8 m ² /pessoa	
Densidade de carga interna	Iluminação	7,6 W/m ²	
	Equipamentos	25,9 W/m ²	
Padrão de uso	Ocupação	8:30-12:00 e 12:30-19:30 h	
	Iluminação	8:30-19:30 h	
	Equipamentos	8:30-19:30 h	
Características do sistema de condicionamento de ar	1	Tipo	<i>split</i>
		Capacidade	14,05 kW (48000 BTU/h)
		Observação	2 de 48000 na área de vendas
	2	Tipo	<i>split</i>

	Capacidade	2,63 kW (9000 BTU/h)
	Observação	1 nos provadores
3	Tipo	janela
	Capacidade	3,51 kW (12000 BTU/h)
	Observação	1 sala computador

O modelo de hotéis está descrito na Tabela 9. O hotel tem 5 pavimentos mais um subsolo. Assim como ocorreu com os modelos de escritório, o número de pavimentos não foi ajustado para o intervalo de 10 a 15 pavimentos, devido às substanciais alterações que este fator acarretaria no resultado. Este, no entanto, foi escolhido por dois motivos. Primeiramente, a volumetria foi selecionada por também ser significativa para a atividade de hotéis, e por conter uma volumetria horizontal de interesse para o estudo. Além disso, trata-se de um hotel com o perfil empresarial de hóspedes, com maior ocupação nos dias úteis. Apesar de Florianópolis, cidade onde se encontra este hotel, ser uma cidade turística, este perfil é comum no território brasileiro e, portanto foi escolhido para representar o protótipo. A maior fachada da edificação é a principal, sendo a fachada posterior semelhante à principal e suas laterais cegas. Todos os quartos têm varandas, seja para a fachada principal ou posterior, o que produz ângulos de sombreamento de 45° (AVS) e 30° (AHS). Estes ângulos foram incluídos no modelo apesar dos resultados do levantamento fotográfico terem indicado o predomínio de hotéis sem proteções solares. A retirada das proteções obrigaria a alteração das características dos vidros utilizados de incolor para cinza, o que também é condizente para a definição de um modelo já que o levantamento fotográfico indicou que tanto vidros incolores quanto cinza são comuns em janelas de hotéis. Assim, o modelo pode ser o descrito na Tabela 9 ou pode ser descrito sem proteções solares, porém com vidros cinza. Optou-se por descrever da forma mais semelhante possível à edificação visitada, considerando ainda vidros das portas das varandas compostos por uma folha de 4 mm nos quartos do 1º ao 4º andar, e do térreo compostos por vidro incolor temperado ou laminado de cerca de 6 mm. Cabe ainda ressaltar que o restaurante do hotel é terceirizado, mas mantém-se em pleno funcionamento. Já o serviço de lavanderia funciona somente para urgências, pois este é 90% terceirizado para uma empresa que

funciona fora das dependências do hotel, resultando em uma demanda mínima de energia na lavanderia.

Tabela 9 – Parâmetros do modelo de hotéis.

Parâmetros		Variáveis	
Dimensões retangulares		52 x 17 m	
Número de pavimentos		5+1	
Percentual de Área de Janela na Fachada		30%	
Ângulo vertical e ângulo horizontal de sombreamento		45°; 30°	
Vidro	cor	incolor	
	espessura	4 mm	
	película refletiva	Não	
Transmitância Térmica	Paredes	1,92 W/m ² K	
	Cobertura	1,75 W/m ² K	
Absortância	Paredes	0,25	
	Cobertura	0,6	
Ocupação média (dias úteis; sáb/dom)		3,5; 6,2 m ² /pessoa	
Densidade de carga interna	Iluminação	20,5 W/m ²	
	Equipamentos	59,4 W/ m ²	
Padrão de uso	Ocupação	7-15; 15-23; 0-7 h	
	Iluminação	7-18; 18-23; 0-7 h	
	Equipamentos	7-18; 18-23; 0-7 h	
Características do sistema de condicionamento de ar	1	Tipo	janela
		Capacidade	2,20 kW (7500 BTU/h)
		Observação	Nos quartos
	2	Tipo	Janela
		Capacidade	2,93 kW (10000 BTU/h)
		Observação	Nos apartamentos
3	Tipo	<i>Self</i>	
	Capacidade	26,35 kW (90000 BTU/h)	

		Observação	Recepção
		Tipo	Split
	4	Capacidade	149,33 kW (510000 BTU/h)
		Observação	4 <i>splits</i> no restaurante/café

A questão da volumetria selecionada para hotéis, que também era necessária, exigiu a criação de uma sexta volumetria para completar uma variabilidade exigida para a etapa posterior. Nenhuma das demais atividades pesquisadas apresentava edificações com formas e dimensões semelhantes, tendo sido necessária a seleção de mais uma volumetria para atividade de escritórios. Foi criada uma volumetria considerada sensível ao ambiente externo pela grande exposição de sua fachada em contraste com sua área interna, chamada de escritórios verticais. Este modelo não foi utilizado nas etapas envolvendo custos por não ser uma edificação real, tendo sido criado exclusivamente para suprir uma lacuna observada nas variáveis referentes à volumetria durante o desenvolvimento da equação de regressão, a ser visto no próximo capítulo.

A Tabela 10 apresenta as características deste modelo teórico cuja geometria é baseada no formato mais exposto das pequenas lojas porém com grande número de pavimentos. Ele possui uma zona condicionada por andar com janelas nas quatro fachadas. Suas pequenas dimensões (10 x 16 m) torna o edifício exposto ao ambiente externo e aumenta assim, a sensibilidade da seu envoltório. As cargas internas, os padrões de uso e algumas características do envoltório foram baseados no modelo representativo de grandes escritórios, porém há pequenas modificações para variação das características, baseadas todas no levantamento fotográfico. Já a cor das superfícies externas foi considerada média, 0,5 para paredes e para cobertura.

Além dos protótipos, foram também coletados dados de bienais dos anos de 2002 e 2003 fornecidos pela concessionária local de energia. Estes dados foram utilizados para se estimar um preço da tarifa de energia elétrica para o setor comercial, com foco no grupo tarifário A4, visto que o preço é geralmente negociado em contratos próprios. Foram obtidas bienais de dezessete edificações não-residenciais fornecidas pela CELESC, a partir de uma amostragem da Eletrobrás/Procel, parte da pesquisa de mercado em uso da energia que se iniciaria. Seus consumos mensais de energia para

dois anos, juntamente com os custos com a energia elétrica consumida foram processados, incluindo os horários na ponta, para o cálculo da tarifa média. Assim, os resultados referem-se a um custo médio em edificações reais, e não a uma tarifa fixa comum a diversas edificações, como no caso do grupo tarifário comercial BT.

Tabela 10 – Parâmetros do modelo de escritórios verticais.

Parâmetros		Variáveis	
Dimensões retangulares (m)		10 x 16	
Número de pavimentos		15	
Percentual de Área de Janela na Fachada (%)		35	
Ângulo vertical e ângulo horizontal de sombreamento (graus)		0	
Vidro	cor	incolor	
	espessura (mm)	3	
	película refletiva	Não	
Transmitância Térmica (W/m ² K)	Paredes	2,39	
	Cobertura	1,17	
Absortância	Paredes	0,5	
	Cobertura	0,5	
Ocupação média (m ² /pessoa)		19,57	
Densidade de carga interna (W/m ²)	Iluminação	6,7	
	Equipamentos	9,6	
Padrão de uso (horas)	Ocupação	8-12, 14-18	
	Iluminação	8-18	
	Equipamentos	8-18	
Características do sistema de condicionamento de ar	1	Tipo	<i>split</i>
		Capacidade	14,05 kW (48000 BTU/h)
		Observação	2 por andar

A Tabela 11 mostra as atividades contempladas com a tarifa média encontrada para cada caso. A única atividade que se destacou das demais foi de supermercados, cuja tarifa média foi de R\$ 0,12 devido às amostras usarem geradores no horário de ponta. Isto reduz significativamente os custos com energia desta atividade, e optou-se por excluí-la da amostra.

Tabela 11 – Tarifa média (R\$/kWh) por atividade não-residencial e tarifa média total adotada, anos base de 2002 e 2003. Dados obtidos no ano de 2004.

Atividade	Loja	Hotel	Banco	Escritório	Hospital	Escola	Total
Tarifa Média	0,36	0,32	0,36	0,29	0,28	0,38	0,33

3.4. Considerações finais

Em geral, o estudo de campo supriu a meta de criação de modelos representativos para atender à etapa seguinte do estudo. Entretanto, diversas limitações podem ser comentadas.

O levantamento fotográfico atingiu a meta de um registro mínimo de 100 edificações por cidade, exceto em Salvador. O aspecto histórico da cidade, com diversas áreas que passaram por uma releitura em seus usos ou a própria configuração das edificações podem ter dificultado o registro fotográfico. Nas demais cidades, o número de edificações amostradas variaram entre 115 (no Recife) e 490 (em Belo Horizonte) edificações.

De fato, o ideal seria obter 100 edificações de cada atividade comercial pré-definida. No entanto, tal meta inviabilizaria a pesquisa. As atividades de grandes escritórios, pequenas lojas, restaurantes e escolas podem ser consideradas representativas para um erro de 10%, por alcançarem um número de amostras superior a 100, o que representa um universo infinito de edificações. Grandes lojas também possuem elevada representatividade, pois alcançou 99 amostras, relacionada a 15000 edificações. Hotéis e hospitais/clínicas representam um universo entre 500 e 600 edificações. Pequenas amostras foram obtidas nas atividades de supermercados e pequenos escritórios, que representam um universo entre 150 e 200 edificações; e principalmente nas pousadas, cujo número de amostras foi de apenas 11 edificações. Ainda que a amostra de pequenos escritórios tenha sido menor que das escolas, a atividade de pequenos escritórios foi selecionada para criação do modelo representativo pela facilidade em se encontrar ambientes condicionados. Outras atividades selecionadas foram os hotéis, as pequenas e grandes lojas e os grandes escritórios.

Foram contabilizadas, por atividade selecionada, a frequência de ocorrência do Percentual de Área de Janela na Fachada, cor dos vidros e existência e dimensões de proteções solares através dos seus ângulos de sombreamento vertical e horizontal.

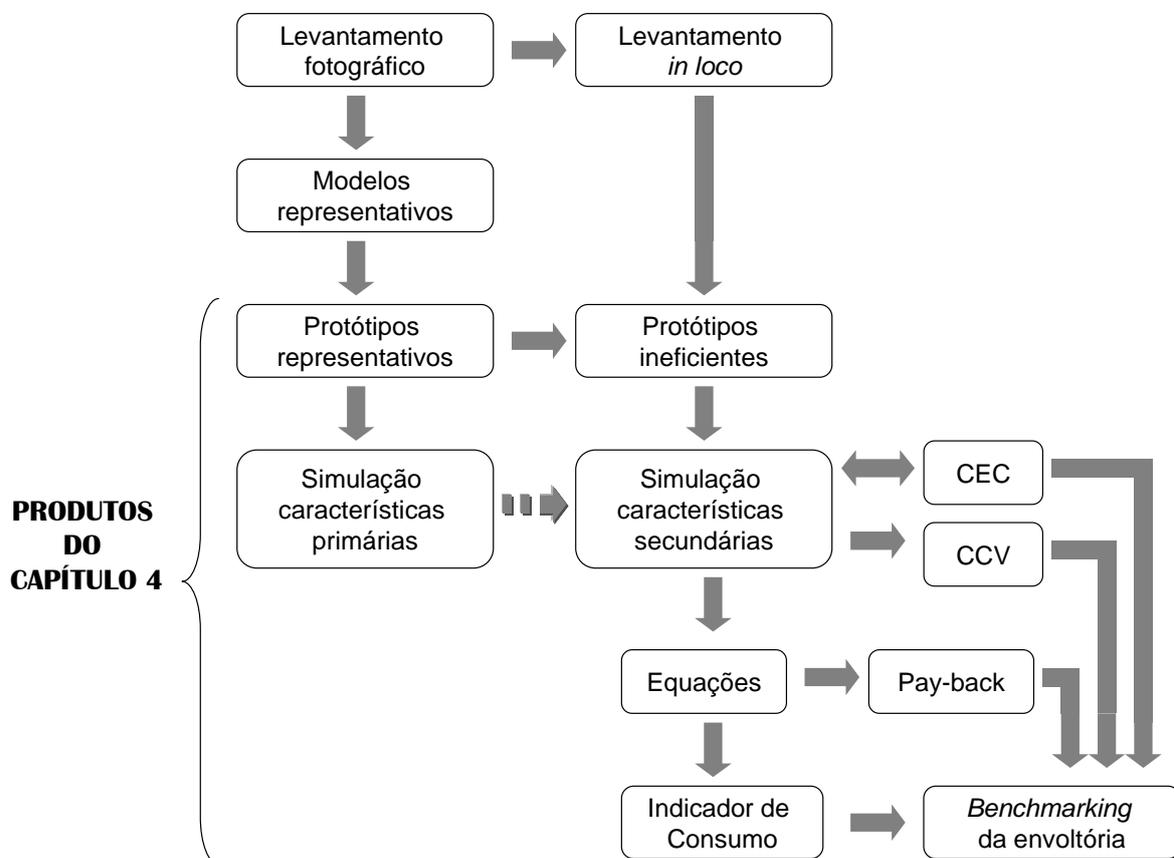
O levantamento fotográfico subsidiou a criação de modelos de edificações com características externas representativas. Internamente, estes modelos foram utilizados para se encontrar uma edificação real semelhante e assim, embasar a configuração interna para criação de modelo completo. Entretanto, não há garantias que estas características internas sejam representativas de cada atividade. Pode-se ressaltar a

variabilidade do tipo de condicionamento, tendo sido encontrados aparelhos de janela nos hotéis e sistemas centrais nas grandes lojas. Os padrões de uso são também variáveis, assim como as cargas internas. A lista dos materiais foi obtida quando possível, tendo sido observadas as espessuras dos componentes, os revestimentos e o ano de construção da edificação para realizar estimativas componentes quando o responsável pela edificação não conhecia tal informação.

Um último modelo, este teórico por não ser baseado em uma edificação visitada, foi ainda criado para suprir uma deficiência no processamento estatístico da equação de regressão, baseado no modelo físico das pequenas lojas e no uso dos grandes escritórios. O primeiro para criar um modelo vertical sensível às condições ambientais externas e o segundo para caracterizá-lo como atividade de escritórios.

Espera-se que um estudo de campo completo acerca das características físicas e de uso de edificações comerciais possa ser publicado para melhoramento de modelos para atividades futuras. O estudo realizado neste trabalho já fornece diversas informações relevantes que, seguramente, permitem o desenvolvimento da etapa posterior de simulação e análise, descrita no capítulo 4.

CAPÍTULO 4. SIMULAÇÃO



CAPÍTULO 4. SIMULAÇÃO

4.1. Introdução

O estudo de campo forneceu bases para a modelagem de protótipos de edificações a fim de simular o desempenho energético com diferentes características. Sabe-se, no entanto, que a análise da eficiência energética de uma edificação exige que diversos parâmetros sejam idênticos ou, pelo menos, equivalentes, de forma a se proceder à análise. Assim, foi necessário padronizar certos parâmetros, criando protótipos representativos e também protótipos ineficientes. Os primeiros basearam-se nos modelos representativos enquanto os segundos basearam-se diretamente nos dados coletados no estudo de campo.

Algumas características consideradas de grande relevância na eficiência de uma edificação foram estudadas à parte, sendo identificadas como características primárias. Encontradas tendências com o uso das características primárias - Densidade de Carga Interna, eficiência do condicionador de ar, orientação da edificação e volumetria - a análise focou o envoltório da edificação. Medidas de Conservação de Energia, MCE, foram aplicadas nos protótipos ineficientes para obtenção do consumo anual de eletricidade através das simulações. As medidas simuladas são:

- Percentual de Área de Janela na Fachada, PJF;
- Fator Solar dos vidros, FS;
- Ângulo Vertical de Sombreamento, AVS;
- Ângulo Horizontal de Sombreamento, AHS;
- Transmitância Térmica da cobertura, U_{cob} ;
- Transmitância Térmica das paredes externas, U_{par} .

O critério de ordenação das simulações foi a seleção da alternativa com menor Custo da Energia Conservada para tornar-se o caso base do grupo seguinte de simulações. Neste novo grupo foram aplicadas as MCE restantes. Por fim, foram obtidos de 2 a 4 alternativas de elevada eficiência para cada atividade simulada: grandes e pequenos escritórios, grandes e pequenas lojas e hotéis.

Utilizando também simulações realizadas com escritórios verticais, duas equações de regressão linear multivariada foram desenvolvidas para estimar o consumo de energia proveniente do envoltório. Para tanto, consideraram-se constantes as características primárias, exceto a volumetria. Foram encontradas limitações no uso das equações, e uma MCE aplicada ao envoltório foi eliminada: Transmitância Térmica das paredes externas. Os resultados mostraram que, apesar da análise de eficiência do envoltório ser possível utilizando as equações, o resultado não deve ser entendido como consumo de eletricidade, mas como um Indicador de Consumo para o envoltório.

Os seguintes indicadores de custos complementaram a análise da eficiência do envoltório: Custo da Energia Conservada, Pay-back, Taxa Interna de Retorno e Custo do Ciclo de Vida. Eles foram comparados entre si utilizando-se o Indicador de Consumo e, posteriormente, ao avaliar a eficiência do envoltório propriamente dito. Os tipos de análise que proporcionam são diferenciados, mas todos possibilitam a formação de *benchmarking* do envoltório.

O item 4.2 apresenta a metodologia adotada no desenvolvimento do estudo. O item 4.3 apresenta os resultados acompanhados de discussões acerca dos potenciais e limitações encontrados. Por fim, o item 4.4 apresenta as principais conclusões observadas no capítulo.

4.2. Metodologia

A metodologia consta de procedimentos realizados para preparação de modelos computacionais, simulação do desempenho energético de diversos casos, tratamento dos resultados, levantamento de quantitativos e custos de materiais e, por fim, análise de custos envolvendo os dados levantados e simulados.

O programa utilizado foi o Energy Plus, nas versões mais atuais do momento das simulações. A metodologia apresentada neste Capítulo 4 (simulações e análise de custos) concentrou-se em Florianópolis, razão pela qual foi utilizado o arquivo climático TRY de Florianópolis, e foram levantados dados locais de custos de materiais e tarifas. Entretanto, testes foram necessários com outros climas, como Curitiba e Salvador, quando foram também utilizados TRY para estas cidades, todos compilados para o programa em questão (GOULART, 1997). Entende-se assim que todas as simulações foram realizadas para Florianópolis, exceto quando outras cidades são citadas.

4.2.1. Protótipos representativos

Os modelos comerciais representativos foram modelados no computador para criar protótipos de edificações comerciais para simulação computacional. Como cada modelo comercial apresentou características por demais distintas, foi necessário realizar ajustes para viabilizar a análise após a simulação.

O primeiro ajuste consistiu em alterar o Percentual de Área de Janela na Fachada, PJF, dos modelos representativos. Eles costumam ser diferenciados para cada fachada da edificação, o que induz ao uso de dois a quatro PJF diferentes em uma simulação. Este procedimento, no entanto, aumenta o número de variáveis analisadas, pois os resultados estão relacionados ao PJF da fachada principal, ao PJF das fachadas laterais e ao PJF da fachada posterior.

Para simplificar a análise, um só PJF foi adotado para todas as fachadas. O levantamento fotográfico foi utilizado para estabelecer as proporções de fachadas principais e dos fundos com fachadas laterais, dadas pela geometria da edificação. Foi então possível verificar a relação dos PJF de cada fachada com suas dimensões. Cada edificação em que tenha sido contabilizado o PJF das fachadas laterais, além dos PJF das fachadas principais, teve o seu PJF transformado em PJF_p , ou seja, Percentual de Área de Janela na Fachada ponderado.

Tomando como exemplo o protótipo da Figura 19, ele possui um PJF de 60% nas fachadas principal e posterior (7,8 m de extensão) e um PJF de 21% nas fachadas laterais (27 m de extensão). Foi modelado com um PJF ponderado de 30% para todas as fachadas. Assim, as fachadas laterais que tinham o menor PJF na maior fachada agora possuem um mesmo PJF que a fachada principal, o que implica em aberturas maiores nas fachadas laterais do que as aberturas da fachada principal.

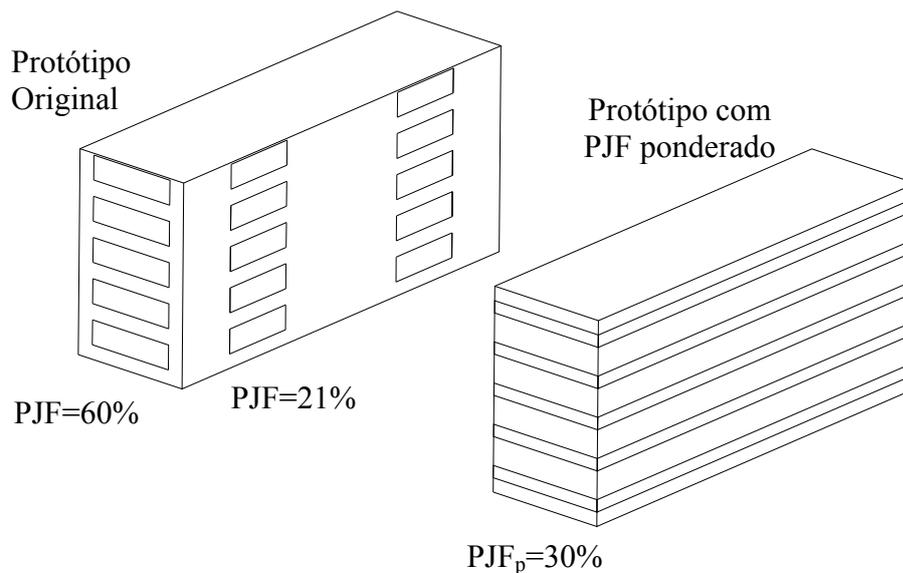


Figura 19 – Diferença dos efeitos do PJF para o PJF ponderado.

Foi então adotado o mesmo PJF ponderado para todas as fachadas dos protótipos, sendo:

- 25% para grandes escritórios;
- 15% para pequenos escritórios;
- 75% para grandes lojas;
- 35% para pequenas lojas;
- 25% para hotéis;
- 35% para escritórios verticais.

Em seguida, os sistemas de condicionamento de ar foram também alterados. Cada edificação visitada apresentou um tipo distinto de condicionador de ar, desde aparelhos de janela, encontrados em hotéis, passando por *split high wall* encontrados nas pequenas lojas, até sistemas centrais com *chillers* e torres de resfriamento, encontrados nas

grandes lojas. Como não é possível a comparação da eficiência energética de edificações com sistemas distintos, foi necessário padronizar o tipo de condicionador de ar. Optou-se pelo modelo mais simples, o aparelho de janela, comumente encontrado em edificações comerciais e de fácil aquisição. Embora não seja o mais eficiente, sua simplicidade atendeu ao principal objetivo deste trabalho ao viabilizar a comparação entre as eficiências de diversos modelos de edificações.

Um último parâmetro a ser uniformizado em todos os modelos foi a orientação solar da edificação. Como cada implantação na paisagem urbana é única e sabendo-se que a orientação solar pode influir nos resultados, foi necessário padronizar a orientação da edificação. As maiores fachadas foram assim orientadas a norte-sul.

Modificados estes três parâmetros, os modelos representativos foram usados para gerar protótipos de edificações para simulação. A Tabela 12 apresenta os parâmetros dos envoltórios dos protótipos representativos de cada atividade. Nela, estão contidos os números de pavimentos (N° Pav), os percentuais de área de janela ponderados (PJF_p), o fator solar dos vidros (FS), os ângulos de sombreamento vertical (AVS) e horizontal (AHS), transmitância térmica das paredes externas (U_{par}) e a transmitância térmica da cobertura (U_{cob}).

Tabela 12 – Características do envoltório dos protótipos representativos.

Atividade	N° Pav	PJF_p (%)	FS	AVS (graus)	AHS (graus)	U_{parP} (W/m ² K)	U_{cob} (W/m ² K)
Grandes escritórios	5	25	0,83	0	0	2,39	1,17
Pequenos escritórios	2	15	0,83	0	0	2,39	2,04
Grandes lojas	1	75	0,83	0	0	2,39	2,04
Pequenas lojas	1	35	0,83	35°	0	3,50	2,06
Hotéis	5	25	0,87	35°	0	1,80	1,75
Escritórios verticais	15	35	0,87	0	0	2,39	1,17

Alguns parâmetros apresentam maior variabilidade que outros. Enquanto há grande variação da área de janela (PJF_p), o fator solar dos vidros tende a se aproximar do vidro claro 3 mm (0,87) ou vidro simples fumê (0,83). Poucos protótipos apresentam brises

horizontais, apenas pequenas lojas e hotéis, e nenhum apresenta brise vertical. E a transmitância (U) dos componentes opacos, paredes e coberturas, tende a ser elevada, chegando a 3,5 W/m²K nas paredes das pequenas lojas, com exceção para a cobertura dos grandes escritórios, de transmitância 1,17 W/m²K (Tabela 12).

Já os parâmetros comuns a todos os modelos simulados foram:

- absorvância solar de paredes: original do modelo representativo;
- absorvância solar de coberturas: original da telha ou laje;
- valor nominal da taxa de infiltração (variável de acordo com padrão de uso adotado):
 - escritórios: 0,5 trocas/h;
 - lojas: 1,0 troca/h;
 - hotel: 0,8 trocas/h;
- zonas térmicas: as zonas térmicas de cada modelo são mostradas no anexo 2;
- temperaturas de *setpoint*: 18° para aquecimento e 24° para resfriamento;
- dimensionamento do sistema de condicionamento de ar: comando *autosize* do programa, baseado nos dias de projeto inseridos no arquivo de extensão *.idf;
- contato do piso com o solo: isolado, sem contato com o solo devido à existência de subsolo em grande parte dos modelos, exceto nas grandes lojas;
- entorno: o entorno urbano não foi considerado devido ao seu aspecto dinâmico e variável, que merece estudo à parte.

As características dos protótipos representativos mostradas na Tabela 12 não foram, no entanto, o ponto de partida para as simulações do envoltório, mas das simulações dos parâmetros globais da eficiência da edificação. Para as simulações do envoltório, os protótipos representativos foram utilizados para a criação dos protótipos ineficientes.

4.2.2. Protótipos ineficientes

Após as modificações realizadas nos protótipos representativos de cada atividade comercial, foram também criados protótipos com envoltórios pouco eficientes. Estes protótipos de envoltórios pouco eficientes tiveram características definidas através do

levantamento, porém tendo sido selecionadas aquelas que induzem a uma baixa eficiência da edificação, mesmo que pouco frequentes na amostra.

Desta forma, os protótipos poucos eficientes, a partir de agora chamados de protótipos ineficientes ou casos-base de simulação do envoltório, apresentaram as características mostradas na Tabela 13. Todas estas podem ser consideradas extremas e pouco eficientes, sendo algumas próximas de grandezas irreais, como no caso de PJF_p de 80% ou 90% para todas as fachadas. Entretanto, há edificações com tais áreas envidraçadas na paisagem urbana, e a pior situação deve ser representada pelo caso base de forma a inserir melhorias nas alternativas durante o processo de simulação.

Tabela 13 – Características do envoltório dos casos-base ineficientes.

Atividade	Nº Pav	PJF_p (%)	FS	AVS (graus)	AHS (graus)	U_{parP} (W/m ² K)	U_{cob} (W/m ² K)
Grandes escritórios	5	80	0,83	0	0	2,39	2,38
Pequenos escritórios	2	75	0,83	0	0	2,39	2,04
Grandes lojas	1	90	0,83	0	0	2,39	2,04
Pequenas lojas	1	75	0,83	0	0	3,50	2,06
Hotéis	5	60	0,87	0	0	2,39	1,75
Escritórios verticais	15	75	0,87	0	0	3,50	2,06

Antes, porém, de se concentrar no envoltório com o caso base ineficiente, procurou-se entender como outros parâmetros participam do desempenho energético da edificação. Assim, as características primárias foram investigadas no protótipo representativo segundo o procedimento descrito no próximo item.

4.2.3. Parâmetros globais: características primárias

Cada parâmetro participante do desempenho energético de uma edificação impacta o consumo de energia de forma distinta. Embora o foco desta pesquisa seja o envoltório, deve-se conhecer os impactos no consumo de eletricidade provocados também por estas variáveis. Esta etapa possibilitou focar as simulações nas variáveis cujas alterações têm

impactos pouco previsíveis no consumo e eliminar repetições quando tendências eram identificadas. Usando os protótipos representativos como modelos base para gerar alternativas de simulação, as seguintes variáveis foram investigadas em etapa anterior ao envoltório:

- Densidade de carga interna, DCI (W/m^2);
- Orientação solar;
- Eficiência do condicionador de ar;
- Volumetria.

Densidade de Carga Interna: foi verificado nos protótipos que cada atividade apresenta uma densidade de carga interna específica, de acordo com o seu uso. Sabe-se que a variação do consumo em função da DCI é linear, mas ainda carente de verificação nos protótipos. Para investigar o grau de influência deste parâmetro, optou-se por simular alternativas do protótipo com sua densidade original e com uma densidade maior ou menor que a original, de acordo com sua grandeza. Assim, as DCI foram definidas de acordo com a densidade existente na edificação visitada durante o levantamento de campo, e daí elas serem variáveis, como mostra a Tabela 14.

Tabela 14 – Densidades de carga interna originais e densidades alternativas.

Protótipo	DCI original	DCI alternativa
Grande escritório	18,90	28,90
Pequeno escritório	30,56	20,56
Hotel	15,30	24,20
Grande loja	37,60	24,00
Pequena loja	29,60	37,60
Escritório vertical	18,50	37,60

Eficiência do condicionador de ar: como já comentado, os protótipos tiveram o sistema de condicionamento de ar alterado do tipo original, *self*, *split* ou central, para o condicionador de ar de janela, comumente utilizado nas edificações comerciais. Este foi modelado com duas eficiências, a de Etiqueta de Eficiência A do INMETRO e uma de Etiqueta G. O condicionador de eficiência A possui um COP (*Coefficient of*

Performance) para resfriamento de 3,19 W/W e o condicionador de ar de eficiência G^3 possui um COP de 1,82 W/W.

Orientação solar: as aberturas transmitem cargas térmicas diferenciadas para a zona em que estão contidas mesmo que suas dimensões sejam igualmente proporcionais a suas fachadas, ou até mesmo se elas apresentarem o mesmo tamanho. Isto é devido às diferentes intensidades da radiação solar de cada orientação. Mesmo com a orientação das maiores fachadas das edificações alterada para norte-sul, optou-se por investigar os efeitos da orientação solar também na orientação leste-oeste. Desta forma, será de conhecimento do simulador qual modelo apresenta a carga térmica minimizada ou maximizada, mostrando assim os casos extremos. Deve-se salientar que este procedimento não inclui a investigação da intensidade da radiação solar por orientação em cada fachada individualmente, mas sim da orientação da edificação.

Volumetria: o estudo da volumetria envolve uma alteração mais substancial nos protótipos originais. Utilizando a planta do pavimento tipo de três protótipos representativos, o número de pavimentos foi variado e as demais características foram uniformizadas: Densidade de carga Interna, Padrão de uso, Percentual de Área de Abertura na Fachada, orientação solar, eficiência do condicionador de ar, tipo de vidro e materiais que compõem as paredes e coberturas. Desta forma, somente a volumetria das edificações pôde impactar o consumo de energia. Não foi necessário utilizar todos os 6 protótipos definidos anteriormente ao variar o número de pavimentos, pois haveria repetição de algumas volumetrias.

Os modelos de edificações que irão gerar novas alternativas para volumetria são mostrados na Tabela 15 e na Figura 20. Nelas, percebe-se 14 edificações que compõem diferentes volumetrias. Na Figura 20 é possível perceber o número de pavimentos de cada alternativa, enquanto a Tabela 15 apresenta informações como: um número identificador (ID) de cada alternativa de volumetria, as dimensões em metros, a altura do pé direito a ser combinada com o número de pavimentos, a área total da edificação e os dois indicadores de volumetria usados para representar as proporções de uma edificação (Fator de Forma, FF) e o número de pavimentos (Fator Altura, FA).

³ Segundo classificação do INMETRO do ano de 2005, período em que as simulações foram realizadas.

Tabela 15 – Alternativas de volumetrias para modelos de pavimento tipo de três protótipos.

Atividade comercial	ID	Num Pav	Dimensões (m)	Pé direito (m)	A _{total} (m ²)	Fator de Forma (A _{env} /V _{tot})	Fator Altura (A _{cob} /A _{tot})
Grande loja	1	1	44,5 x 67 x 5	5,0	2981,5	0,27	1,00
	2	2	44,5 x 67 x 10	5,0	5963,0	0,17	0,50
	3	5	44,5 x 67 x 25	5,0	14907,5	0,11	0,20
	4	10	44,5 x 67 x 50	5,0	29815,0	0,09	0,10
	5	25	44,5 x 67 x 125	5,0	74537,5	0,08	0,04
Escritório	6	1	7,5 x 27 x 2,6	2,6	202,5	0,73	1,00
	7	2	7,5 x 27 x 5,2	2,6	405,0	0,53	0,50
	8	5	7,5 x 27 x 13,0	2,6	1012,5	0,42	0,20
	9	10	7,5 x 27 x 26,0	2,6	2025,0	0,38	0,10
	10	15	7,5 x 27 x 39,0	2,6	3037,5	0,37	0,07
	11	25	7,5 x 27 x 65,0	2,6	5062,5	0,36	0,04
Pequena loja	12	1	6 x 10 x 3	3,0	60,0	0,87	1,00
	13	3	6 x 10 x 9	3,0	180,0	0,64	0,33
	14	5	6 x 10 x 15	3,0	300,0	0,60	0,20

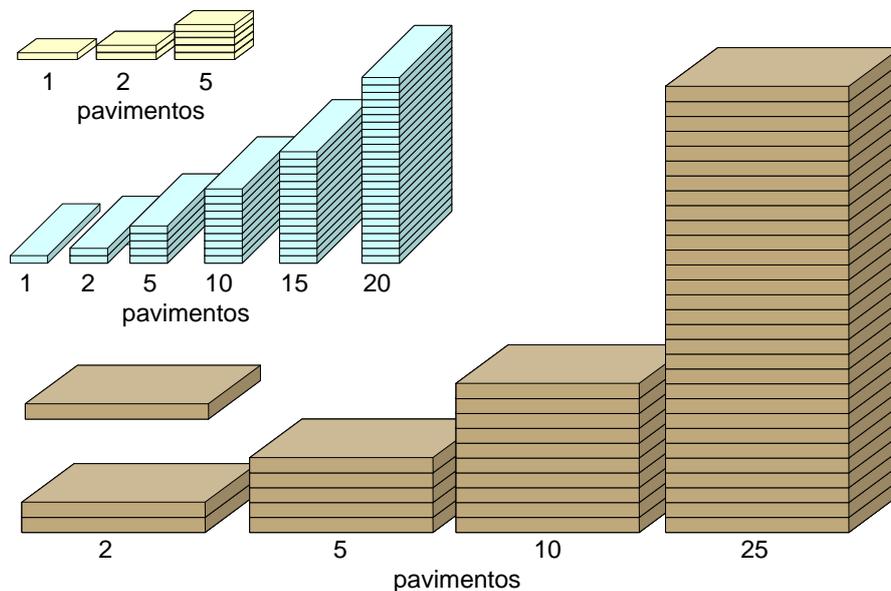


Figura 20 – Volumetrias simuladas para análise das variáveis globais.

Após conhecer o impacto geral da volumetria sobre o consumo, a densidade de carga interna e a eficiência do condicionador de ar foram modificadas a fim de verificar se os impactos da volumetria no consumo de energia se alteram. As DCI adotadas foram ainda mais extremas do que nos casos anteriores, enquanto as eficiências do condicionador de ar de janela foram as descritas como eficiência A e G. Com o mesmo objetivo, uma nova variável foi incluída neste grupo, o clima. Sabe-se bem que o clima é fator determinante no desempenho térmico e energético de uma edificação e que o envoltório deve ser pensado em função do clima. Para tanto, duas condições climáticas extremas existentes no Brasil foram analisadas: as alternativas de identificador 1 a 14 foram simuladas com o clima de Curitiba, representando a Zona Bioclimática 1, e com o clima de Salvador, representando a Zona Bioclimática 8.

Desta forma, as 14 alternativas em que a volumetria foi variada foram simuladas nas seguintes condições:

- Clima de Salvador, Eficiência A, $DCI = 10,7W/m^2$, considerado caso de referência;
- Curitiba, Eficiência A, $DCI = 10,7W/m^2$;
- Salvador, Eficiência A, $DCI = 34,4W/m^2$;
- Salvador, Eficiência G, $DCI = 34,4W/m^2$;

Os resultados foram analisados em função da volumetria representada pelos indicadores Fator de Forma (A_{env}/V_{tot}) e Fator Altura (A_{cob}/A_{tot}), tanto individualmente quanto combinados. A análise tradicional do consumo de energia é realizada em separado para cada indicador, em função, primeiramente do Fator Altura, e em seguida do Fator de Forma. Já a análise combinada consistiu em unir os dois fatores em um gráfico tridimensional onde x e y são variáveis independentes e o consumo de energia elétrica pela área a variável dependente z. Pode-se entender a relação entre os dois fatores através de um gráfico bidimensional, mostrado na Figura 21. Nele, o eixo das abscissas é composto pelo Fator Altura (A_{cob}/A_{tot}) e o eixo das ordenadas, pelo Fator de Forma da edificação (A_{env}/V_{tot}). A Figura 21 contém diversos exemplos de edificações no seu respectivo posicionamento no gráfico:

- os pontos laranja representam as edificações de grandes lojas, com identificadores de 1 a 5;

último caso refere-se a dois tipos de edificações. Aquelas com números de pavimentos intermediários como mezaninos ou com pavimentos que não ocupam toda a projeção horizontal da edificação. Assim, ou o Fator Altura é 1 para um pavimento ou é 0,5 para dois pavimentos, o que elimina uma área considerável do gráfico localizada entre este intervalo. E também àquelas cuja relevância é pequena para este estudo pelas suas pequenas dimensões ou pela própria dificuldade em se habitar ou construí-las, embora não sejam impossíveis de existir (3x8 m, 10 pavimentos, PD= 3 m: FF= 0,95 e FA=0,10). Conseqüentemente, o gráfico apresenta áreas mais densas, onde há maior variabilidade de edificações que são normalmente construídas, em contraste com áreas vazias e com outras que contêm edificações raras na paisagem urbana.

Esta figura foi utilizada como base para inserir os resultados de consumo de cada alternativa simulada (IDs de 1 a 14) no eixo z, formando assim uma imagem tridimensional onde o consumo anual de energia pela área é função dos indicadores Fator de Forma (FF) e Fator Altura (FA).

4.2.4. Análise de custos

Três indicadores foram utilizados para avaliar os custos de implementação de medidas que economizem energia, as Medidas de Conservação de Energia, MCE. O Custo da Energia Conservada, CEC, o Custo do Ciclo de Vida, CCV, e o Pay-back simples. Como complemento, eles foram comparados com a Taxa Interna de Retorno das alternativas. Os custos dos protótipos e de suas alternativas são provenientes de duas fontes: através de composição de custos publicados pelo Sistema Brasileiro de Custos (Boletim de Custos, 2005) e do periódico Construção Mercado (Construção Mercado, 2005), também de composição de custos. Ambos incluem custos diretos e indiretos, como materiais, mão-de-obra e impostos.

Baseado na revisão bibliográfica apresentada, o **Custo da Energia Conservada** (ROSENFELD, 1996) foi calculado de acordo com os custos de implementação da MCE e a energia economizada através desta medida. Exclui assim, os custos de construção do edifício completo, concentrando-se na viabilidade da medida. Deve-se lembrar que, caso o CEC seja menor que o custo de 1 kWh (tarifa de energia), este é considerado vantajoso. No entanto, para se calcular os custos de implementação da MCE, deve existir um edifício base onde as medidas serão aplicadas. Assim, este estudo

comparou CEC de diferentes alternativas referentes a MCE aplicadas a um caso base, além da comparação tradicional com a tarifa de energia.

A Equação 11 é equivalente à Equação 10 do Capítulo 2 (MARTINAITIS et al., 2004) e descreve o cálculo do CEC para uma alternativa composta por uma ou mais MCE.

$$CEC = (TCC / \Delta E) \cdot \left\{ d / \left[1 - (1 + d)^{-n} \right] \right\} \quad \text{(equação 11)}$$

Onde,

CEC custo da energia conservada (R\$/kWh);

TCC, custo da MCE (R\$);

ΔE , energia economizada pela implementação da MCE em relação a um caso base (kWh);

n, a vida útil da MCE (anos);

d, a taxa de desconto em base anual, equiparada ao INCC da Tabela 16 (adimensional).

Outro índice, o **Custo do Ciclo de Vida** foi utilizado de forma simplificada, considerando apenas os custos da implementação da MCE somada ao custo de construção da edificação e considerando também sua energia consumida. Ao contrário do CEC, este índice não necessita de um caso base para ser calculado, sendo válido para qualquer caso analisado, com ou sem MCE. A avaliação da implementação da medida foi realizada comparativamente a outras alternativas. O período do ciclo de vida foi considerado de 30 anos, calculando-se o valor presente como mostrado na Equação 12, baseada nas Equações 2 e 3 do Capítulo 2, de MCBRIDE (1995).

$$VPCCV = [(FC + VPE) / A] / n \quad \text{(equação 12)}$$

Onde,

VPCCV, valor presente do custo do ciclo de vida (R\$/m²/ano);

FC, primeiros custos, correspondentes aos custos com construção, incluindo a implementação da MCE e com o consumo de energia (R\$);

VPE, valor presente dos custos com consumo de energia (R\$);

A, área total de piso do edifício;

n, a vida útil do edifício (anos).

O valor presente dos custos com consumo de energia é calculado pela Equação 13:

$$VPE = (CE.T.e_T) + \sum_{i=0}^n [(CE.T.e_T)(1+d)^{-n}] \quad \text{(equação 13)}$$

Onde,

VPE, valor presente dos custos com consumo de energia (R\$);

CE, consumo anual de energia da alternativa simulada (kWh);

T, tarifa média de energia do setor comercial, mostrada na Tabela 11 do Capítulo 3 (R\$/kWh);

e_T, o reajuste anual do preço da tarifa de energia (%);

d, a taxa de desconto, em base anual, equiparada ao INCC da Tabela 16 (adimensional);

n, a vida útil do edifício (anos).

O CCV pode ser usado integralmente, em R\$. No entanto, para avaliar alternativas de edificações de diferentes dimensões, foi necessário dividir o CCV pela área. Igualmente, para avaliar o CCV em base anual, comparando com o consumo anual de energia elétrica, o CCV total foi dividido pelo número de anos. Este processo não altera o resultado final do CCV, mas apenas facilita sua visualização.

Já o **Pay-back simples** é calculado com a Equação 14.

$$PB = I/CA \quad \text{(equação 14)}$$

Onde,

PB, pay-back simples (anos);

I, investimento realizado (R\$);

CA, custo anual da energia que pode ser economizada (R\$/ano).

Por fim, a **Taxa Interna de Retorno**, TIR, foi usada como referência para avaliar os demais indicadores econômicos. Ela é a taxa de desconto necessária para igualar o valor presente de um investimento com os seus respectivos retornos futuros. Assim como o CEC, é válida neste estudo somente quando há uma diferença de custos entre duas opções, ou seja, entre uma alternativa de edificação e seu caso base ineficiente. A Taxa Interna de Retorno foi então aplicada para um valor presente da economia de um investimento, VPÉE, que é obtida pela diferença de custos entre o caso base ineficiente e sua alternativa, para um período de 30 anos. Quando VPÉE é zero, a TIR apresenta a possibilidade de retorno financeiro do investimento que priorizou a alternativa em relação ao caso base, e indica o potencial de retorno da alternativa independente do cenário econômico. Esta relação é descrita na Equação 15.

$$VPÉE = [(FC_{cb} - FC_{al}) + (C_{cb} - C_{al})T \cdot e_T] + \sum_{i=0}^n \{[(FC_{cb} - FC_{al}) + (C_{cb} - C_{al})T \cdot e_T](1 + TIR)^{-n}\} = 0 \quad \text{(equação 15)}$$

Onde,

VPÉE, valor presente da economia referente aos custos com construção e ao consumo de energia entre o caso base e a alternativa analisada (R\$);

FC, primeiros custos (R\$);

C, consumo anual de energia; (kWh);

cb, referente ao caso base ineficiente;

al, referente a uma alternativa qualquer a ser analisada;

T, tarifa média de energia do setor comercial, Tabela 11 do Capítulo 3, (R\$);

e_T, o reajuste anual do preço da tarifa de energia (%);

TIR, Taxa Interna de Retorno ao ano, que resulta em VPE = 0 (percentual);

n, a vida útil do edifício (anos).

4.2.4.1. Dados utilizados nas equações 11 a 15

Baseado no período do ciclo de vida do CCV, de 30 anos, este período foi adotado para os demais indicadores econômicos: CEC e TIR. Embora eles sejam anuais, os seus cálculos consideram o tempo e esta definição era necessária. No caso do CEC, as MCE

foram consideradas com uma **vida útil** de 30 anos ou mais, visto que reposições de elementos do envoltório não são rotineiros no país, e podem ocorrer em um período de tempo semelhante ao escolhido.

A **taxa de desconto** foi baseada no Índice Nacional da Construção Civil do IBGE. A Tabela 16 apresenta o INCC dos últimos cinco anos quando coletada no ano de 2005, cuja média é 10,76%. Esta média anual foi adotada como cenário único para os custos de construção.

Tabela 16 – Índice Nacional da Construção Civil do IBGE.

Custo médio, número índice e variações percentuais

Variável = Custo médio - variação percentual no ano (Percentual)					
dezembro 2000	dezembro 2001	dezembro 2002	dezembro 2003	dezembro 2004	Média
6,18	8,94	13,43	14,31	10,95	10,76

Fonte: SIDRA - IBGE - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/protabl.asp?z=t&o=12&i=P>

Já o **preço médio da tarifa de energia elétrica** utilizado foi apresentado nos resultados do Capítulo 3, e é de R\$0,33 para 1 kWh. A tarifa média foi utilizada nos cálculos de todos os indicadores econômicos, mesmo que, no caso do CEC, tenha sido usada para comparação apenas.

A taxa de **reajuste anual da tarifa de energia elétrica** baseia-se na evolução da tarifa média comercial nacional, de 1996 a 2007, conforme mostrado na Tabela 17. Nela, foi calculada a diferença percentual média de crescimento anual da tarifa usando as tarifas limites de cada intervalo de anos, finalizando com 5,73% para o período de 1995 a 2007.

É possível perceber que, para o ano de 2007, o preço do kWh é de R\$ 0,27 (0,2737). Como o levantamento de dados ocorreu nos anos de 2004 e 2005, não é recomendável utilizar esta tarifa atualizada devido aos custos de materiais e mão de obra obtidos no ano de 2005, e utilizados nas simulações ocorridas em 2005 e 2006. Igualmente, a tarifa de R\$ 0,26 (0,2627) do ano de 2005 não foi adotada, pois se refere a uma média nacional, enquanto os custos de construção foram obtidos através de fontes locais.

Para previsão futura, entretanto, foi considerado válido o índice de reajuste tarifário de 5,73% ao ano, por ser o mais recente registrado.

Tabela 17 - Evolução anual média do período ((ano_n - 1995)/n) das tarifas de energia elétrica do setor comercial no Brasil.

Ano (n)	Tarifa (R\$/ MWh)	Tarifa (R\$/ kWh)	Percentual acumulado (%)	Evolução (%)
2007	273,7	0,27	68,78	5,73
2006	274,0	0,27	63,60	5,78
2005	262,7	0,26	60,54	6,05
2004	238,5	0,24	59,22	6,58
2003	210,3	0,21	55,53	6,94
2002	185,6	0,19	50,02	7,15
2001	156,2	0,16	42,93	7,16
2000	136,8	0,14	32,18	6,44
1999	121,7	0,12	23,15	5,79
1998	111,6	0,11	12,84	4,28
1997	108,0	0,11	3,99	2,00
1996	99,6	0,10	-0,13	-0,13
1995	85,4	0,85	0,00	

Fonte: ANEEL, Tarifas médias por classe de consumo.

<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/tarifamedia/Default.cfm>

4.2.5. Medidas de Conservação de Energia: características secundárias

As Medidas de Conservação de Energia, MCE (*energy conservation measures*, ECM), são as alterações realizadas na edificação a fim de reduzir o seu consumo. Foram

aplicadas nos protótipos ineficientes para gerar as alternativas de envoltório na simulação do consumo de energia elétrica. As MCE são formadas pelas características secundárias da edificação, definidas neste trabalho como características de menor impacto no consumo que as características primárias, e ainda com uma variabilidade neste impacto em função destas últimas. As características secundárias são passíveis de regulação, o que não ocorre com a maioria das características primárias investigadas.

Estudos preliminares indicaram a relatividade da influência de algumas das características no consumo de energia elétrica em função de outras, e forneceram subsídios para a pré-definição das MCE. Foi visto que as dimensões da janela em relação à fachada, as propriedades de transmissão de energia térmica pelo vidro e os dispositivos de proteção solar têm influência inter-relacionada no consumo de energia elétrica das edificações. Da mesma forma, a Transmitância Térmica da cobertura e sua cor interferem mais no consumo de energia por metro quadrado quando a edificação apresenta menor número de pavimentos. Foram também verificadas algumas diferenças no consumo de energia provocadas pela mesma Transmitância Térmica de paredes externas com Capacidades Térmicas diferentes (CARLO et al., 2003). Estas relações entre grupos de características de edificações foram consideradas para se definir as principais MCE a serem aplicadas nas alternativas de edificações. Elas também indicam que a ordem de aplicação das MCE terá um efeito variável no consumo, fenômeno a ser discutido no item 4.2.6.

As MCE para todos os protótipos estão apresentadas na Tabela 18 e são discutidas a seguir. Foram definidas a partir das características presentes nos protótipos ineficientes e foram gradativamente alteradas a fim de elevar a eficiência do envoltório das alternativas de simulação. É possível perceber uma padronização nos valores numéricos utilizados, adotados para simplificar as simulações e para viabilizar as análises. Deve-se atentar que não há relação entre MCE contidas na mesma linha, todas são independentes e podem ser combinadas com qualquer outra, de acordo com o método de simulação a ser descrito a seguir. Na lista, foram incluídas as características presentes no protótipo representativo, ou seja, o modelo representativo de cada atividade foi, em algum momento, simulado dentre o total de alternativas obtidas.

Na Tabela 18, são mostradas as medidas de PJF_p que variam de 75% a 15% da área da fachada. O Fator Solar varia de 0,61 a 0,22, lembrando que o máximo possível é 0,87 e está presente em alguns protótipos ineficientes. Também deve-se comentar que o Fator

Solar mínimo encontrado no mercado brasileiro no ano de 2005 era 0,22. Os ângulos de sombreamento variam de zero, sem proteção solar, a 45°, ou seja, proteções solares de profundidade igual à altura ou largura das janelas a que elas pertencem. Já a transmitância das paredes externas apresenta mais variáveis, pois os termos U_{parP} e U_{parL} referem-se a paredes pesadas e leves. Em outras palavras, a paredes externas com elevada e baixa capacidades térmicas, definidas como sendo maiores e menores que 100 kJ/m²K, respectivamente. Dentre cada grupo de paredes leves ou de paredes pesadas, a capacidade térmica é a mais próxima possível considerando componentes reais. Por fim, a transmitância térmica da cobertura possui duas variações, de 1,20 a 0,70 W/m²K, considerando-se sempre uma baixa capacidade térmica.

Tabela 18 – Medidas de Conservação de Energia usadas nas simulações enfocando o envoltório.

	PJF _p (%)	FS	AVS (graus)	AHS (graus)	U _{parP} (Wm ² /K)	U _{parL} (Wm ² /K)	U _{cob} (Wm ² /K)
Grandes escritórios	60	0,61	35	45	1,80	2,25	1,17
	40	0,39	45	-	1,00	1,20	0,70
	25	0,22	-	-	0,50	0,25	-
Pequenos escritórios	50	0,61	35	45	1,80	2,25	1,20
	35	0,39	45	-	1,00	1,20	0,70
	15	0,22	-	-	0,50	0,25	-
Grande lojas	75	0,61	35	45	1,80	2,25	1,20
	50	0,39	45	-	1,00	1,20	0,70
	35	0,22	-	-	0,50	0,25	-
Pequenas lojas	50	0,61	35	45	2,39	2,25	1,20
	35	0,39	45	-	1,70	1,20	0,70
	15	0,22	-	-	1,00	0,25	-
Hotéis	40	0,61	35	45	1,80	2,25	1,20
	25	0,39	45	-	1,00	1,20	0,70
	-	0,22	-	-	0,50	0,25	-
Escritórios verticais	35	0,83	45	45	1,00	0,25	0,70
	-	0,22	-	-	-	-	-

É importante ressaltar que as absorções solares de componentes opacos, tanto de paredes quanto de coberturas, não foram incluídas dentre as MCE. Apesar de serem

relevantes no desempenho térmico e, portanto, na eficiência energética, há questões estéticas que influenciam na absorção e que geram discussões com focos distintos ao procurado neste trabalho, como não ser passível de ser regulada em normas e leis. Além disso, há poucas implicações da cor das superfícies opacas nos custos, pois geralmente a escolha da cor não altera o custo do material. Todas as análises e simulações realizadas neste trabalho consideraram absorções médias de 0,5, de forma a neutralizar ao máximo o efeito deste parâmetro.

Também se deve justificar a exclusão de análises do envoltório envolvendo o seu potencial de transmissão da luz natural para o interior da edificação. Tal análise envolveria a integração da luz natural com o sistema artificial, cujos custos não são analisados neste estudo. Além disso, o programa escolhido, EnergyPlus, ainda apresenta limitações na simulação da iluminação natural. Tal estudo deve ser realizado à parte, integrando outros programas de simulação da luz natural ao EnergyPlus e integrando os custos do sistema de iluminação artificial aos custos de modificações no envoltório, incluindo a reposição de lâmpadas e luminárias ao longo da vida útil do sistema. Diferentes configurações do sistema de iluminação artificial também devem ser consideradas. Assim, a investigação do potencial de aproveitamento da luz natural requer maior aprofundamento devido à sua complexidade; a ser realizada em um estudo exclusivamente com este objetivo.

4.2.6. Simulação das Medidas de Conservação de Energia

As Medidas de Conservação de Energia foram simuladas com melhoramentos gradativos nas alternativas a partir do caso base ineficiente. Como a ordem de aplicação das MCE poderia influir nos resultados, já que uma medida pode alterar os resultados da medida seguinte⁴, foi estabelecido um critério de aplicação das MCE usando o Custo da Energia Conservada (CEC). Desta forma, incorpora-se a MCE de maior viabilidade no caso base. Para tanto, as simulações foram divididas em ciclos e em blocos. Cada ciclo contém um número de blocos e cada bloco um número variado de alternativas simuladas, cada alternativa com uma diferente MCE.

O primeiro bloco, Bloco Zero, consiste de simulações das n MCE isoladamente, cada qual aplicada ao caso base ineficiente. Cada simulação fornece o consumo anual de energia elétrica daquela alternativa (caso base + MCE _{i}) e, por conseguinte, o Custo da Energia Conservada, CEC, daquela medida. Calculado o CEC para todas as medidas daquele bloco de simulações, a medida com o menor CEC é considerada a implementação mais atrativa. Esta medida é anexada ao caso base criando um segundo modelo computacional chamado de Caso 1.

A Figura 22 apresenta um exemplo para esta situação, onde o Bloco zero consiste da simulação do caso base com cada MCE e resulta no Caso 1. O Bloco 1 de simulações é composto da aplicação das MCE restantes ao Caso 1. Novamente, a medida com menor Custo da Energia Conservada é considerada a mais atrativa, e compõe o Caso 2 (Caso 1 + MCE de menor CEC). Este, por sua vez, é simulado no Bloco 2 com a aplicação das MCE restantes, identificando a medida com menor CEC.

⁴ Como exemplo, a redução da área envidraçada reduz a importância do fator solar no desempenho energética da edificação, enquanto o aumento da área envidraçada torna o fator solar baixo um item essencial para manter a eficiência de uma edificação.

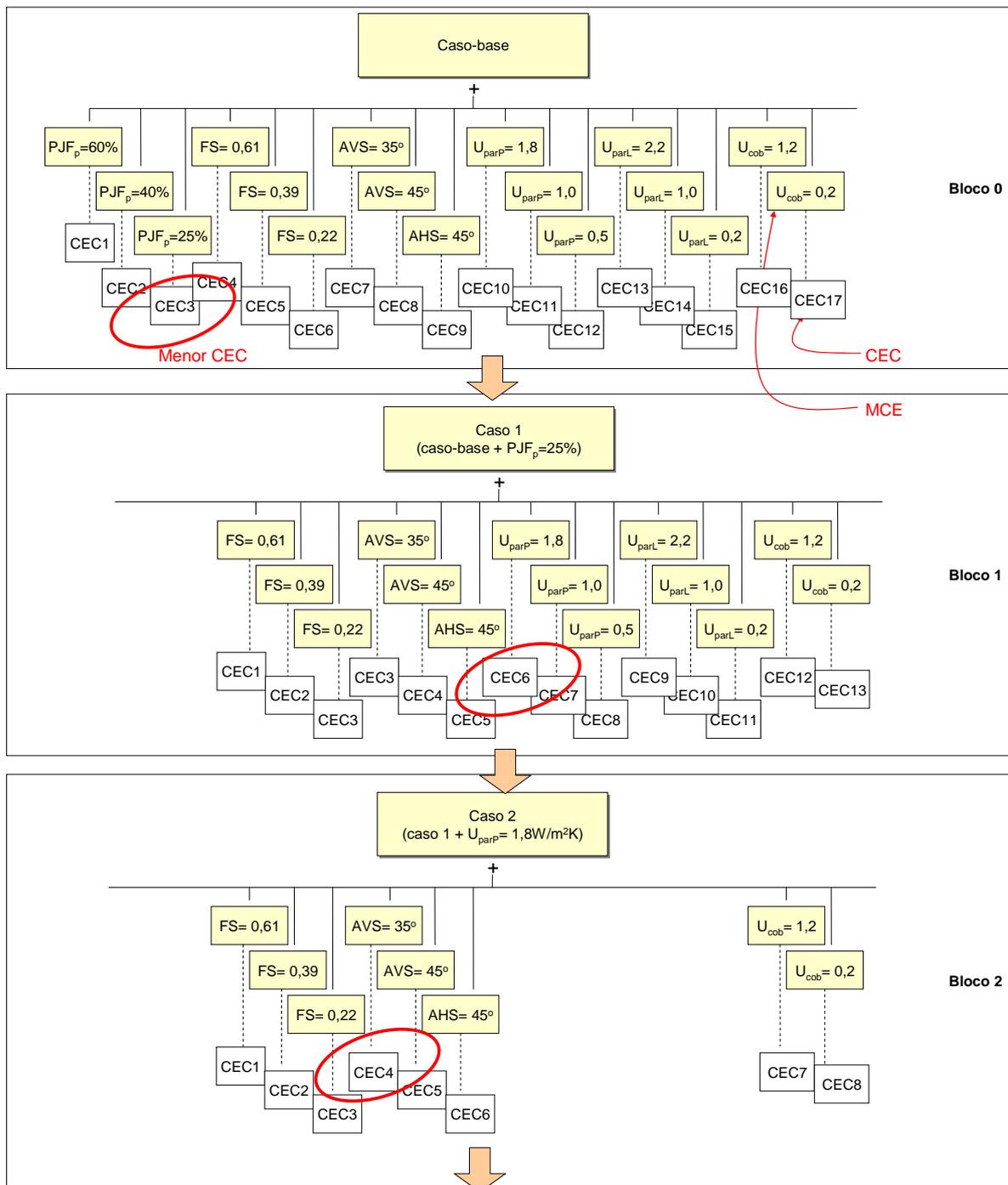


Figura 22 – Procedimento inicial de simulação das MCE, contendo 3 blocos pertencentes a um ciclo.

Este processo se repete nos Blocos 3 e 4, que são mostrados na Figura 23, até que o último bloco forneça a alternativa mais eficiente possível (Figura 24). O último bloco, entretanto, pode resultar em uma edificação não tão eficiente em 3 situações:

- se o menor CEC da alternativa for maior que o valor da tarifa de energia praticada;
- se a MCE proporcionar consumo idêntico ao caso simulado anteriormente e, portanto, o CEC é inexistente (Figura 25);
- e se houver aumento no consumo com a incorporação da MCE, o que irá resultar em um CEC negativo⁵.

Em todas as situações, a alternativa mais eficiente será o caso anterior simulado. Caso estas situações ocorram em todas as alternativas de um bloco 1, as simulações seguintes são inviabilizadas e o processo é interrompido.

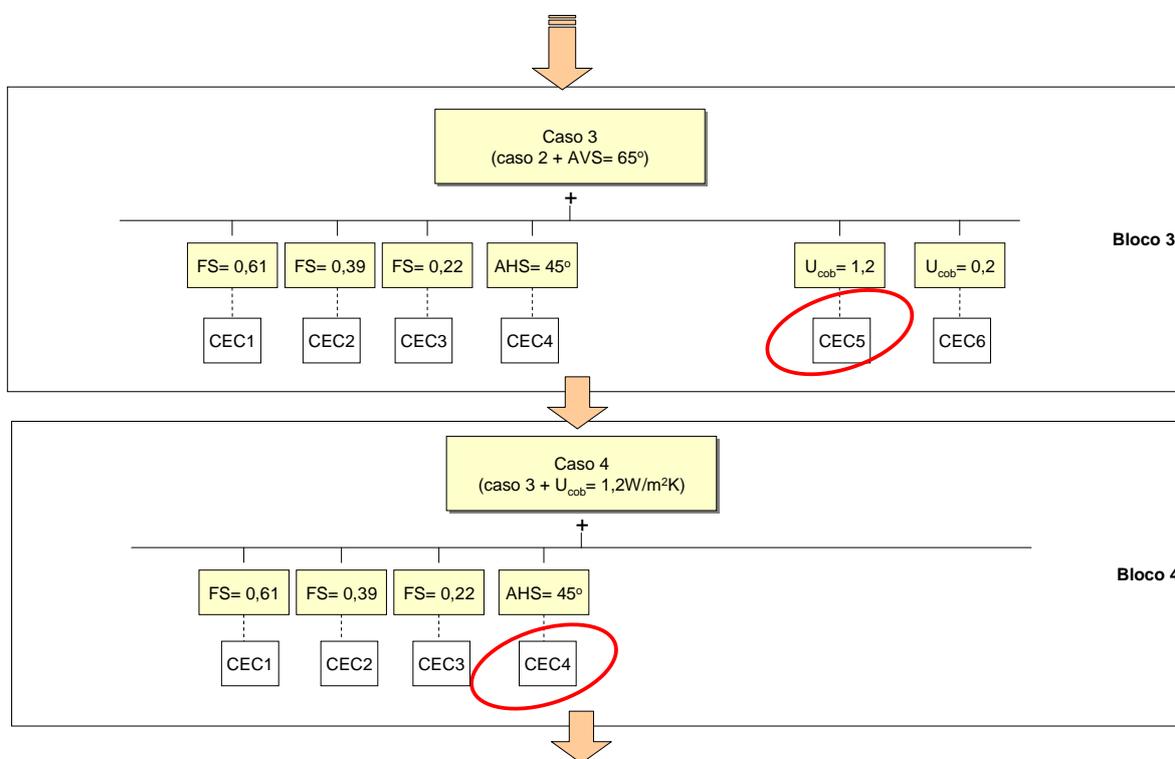


Figura 23 – Procedimento de simulação das MCE, blocos de simulação 3 e 4 do mesmo ciclo da figura anterior.

Por fim, terminado um ciclo de simulações, é obtida uma alternativa cuja eficiência é elevada em relação às demais. Os ciclos seguintes adotam o mesmo processo, porém iniciando no Bloco 1 e utilizando a segunda MCE mais baixa encontrada no Bloco Zero.

⁵ Há também casos de CEC negativo quando a adoção de uma ou mais MCE apresentam custos menores que os custos advindos de utilizar os componentes originais. Nesta situação, a MCE é inicialmente vantajosa, sendo necessário avaliar o consumo de energia que ela irá proporcionar. Tal situação é possível, entretanto, somente quando a avaliação é realizada para uma edificação a construir, e não é válida em reformas.

Outros ciclos também podem ser iniciados no Bloco 1 utilizando MCE que porventura tenham sido precocemente excluídas da simulação e que requeiram maior detalhamento. A partir do Ciclo 2, as alternativas finais são consideradas edificações de elevada eficiência, porém não tão eficientes quanto a alternativa obtida no Ciclo 1. Foram investigados de 3 a 5 ciclos, em média, por atividade comercial.

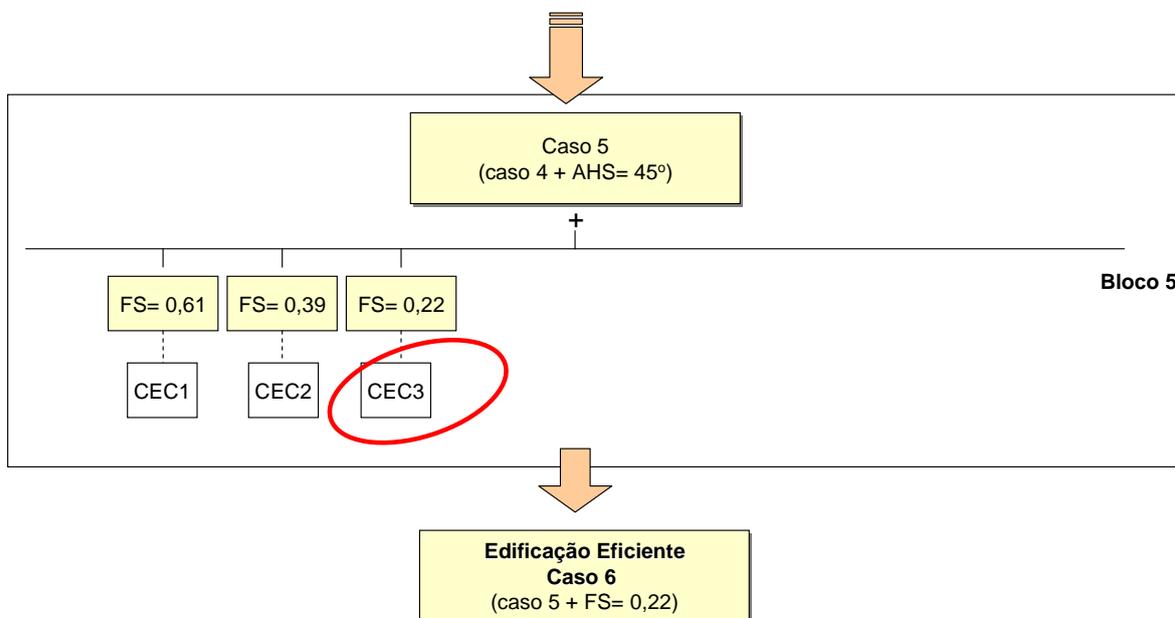


Figura 24 – Procedimento final de simulação pertencente a um ciclo: a alternativa mais eficiente encontrada é o Caso 6, composto do Caso 5 mais a última MCE de menor CEC.

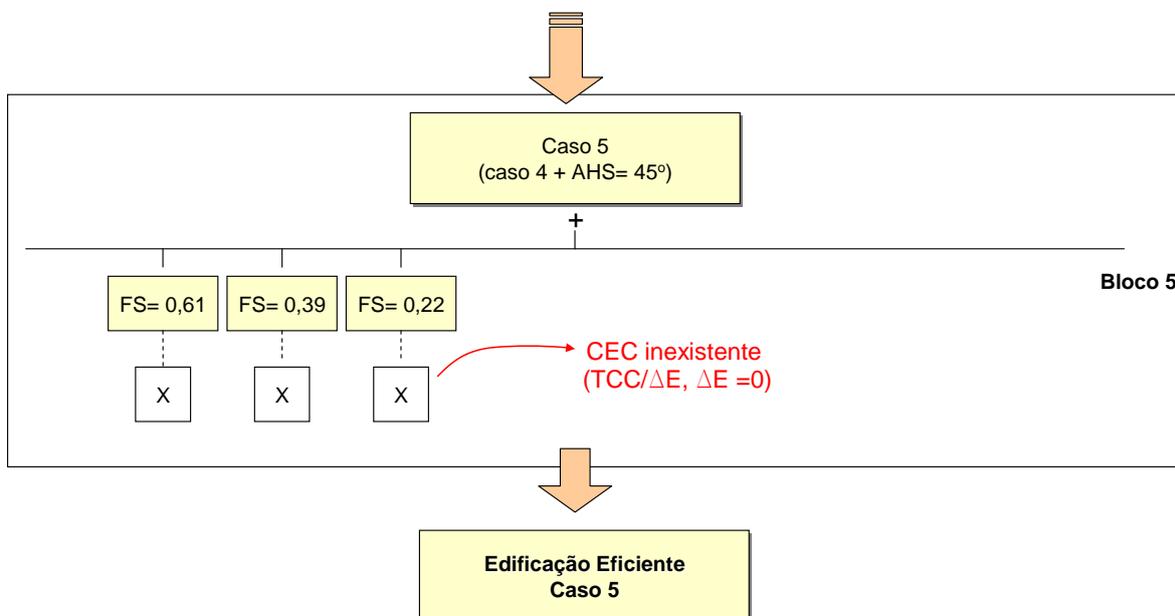


Figura 25 – Procedimento final de simulação pertencente a um ciclo: não há economia de energia, a edificação mais eficiente encontrada é o Caso 5, devido ao CEC inexistente nas simulações do Bloco 5. O Caso 5 possui vidros com Fator Solar igual ao caso-base.

Concluindo, o processo de simulação é composto por ciclos de simulações contendo cada um cerca de 5 a 6 blocos. Cada bloco se inicia com todas as Medidas de Conservação de Energia simuladas isoladamente junto ao caso base. A cada simulação, o Custo da Energia Conservada da MCE é calculado e o menor de todos os CEC de cada bloco é anexado ao caso base, tornando-se um novo caso a ser adotado no bloco seguinte. Após a simulação de todos os blocos necessários, ou seja, a cada ciclo de simulações, obtém-se uma edificação com um nível de eficiência elevada.

Os resultados analisados foram o consumo anual de energia elétrica das alternativas em um primeiro momento e os indicadores econômicos em um segundo momento.

4.2.7. Desenvolvimento de equação para avaliação da eficiência

A simulação forneceu dados de consumo de energia que foram utilizados para desenvolvimento de uma equação de regressão linear multivariada visando criar um indicador de eficiência energética do envoltório.

Dois grupos de variáveis foram utilizados na equação, as características primárias que consistem nos parâmetros globais analisados e as características secundárias que compõem o envoltório. Elas foram incluídas ou excluídas da análise de acordo com sua relevância no consumo de energia elétrica, avaliada com os resultados das simulações.

Para avaliar o potencial de cada variável, o consumo de energia elétrica em função de cada uma separadamente foi analisado, verificando-se a amplitude de seu intervalo de atuação. Foram também verificadas inter-relações prováveis entre as variáveis, como a área de vidro e o fator solar do vidro, ou a capacidade térmica das paredes e sua transmitância térmica.

Em seguida, os consumos das alternativas que continham as variáveis de interesse foram reunidos para elaborar uma equação de regressão linear, segundo ferramenta estatística existente em uma planilha eletrônica. A função calcula coeficientes b_n para variáveis de entrada x a fim de se obter y , usando o método de mínimos quadrados. Descreve, assim, uma tendência linear de y dependente de n variáveis x inseridas, sendo:

- x as características primárias e secundárias consideradas relevantes para o desempenho energético da edificação,

- y o consumo de energia elétrica, e
- n o número de variáveis x inseridas na equação.

Admitiu-se o uso de constante, quando necessário.

Para tanto, os resultados de consumo de energia das alternativas simuladas foram considerados os y conhecidos cuja relação com as variáveis x fornece os coeficientes b_n .

A análise incluiu:

- o coeficiente de determinação, que compara valores y estimados e reais, e que varia de 0 a 1, sendo 1 uma correlação perfeita;
- o desvio padrão para a estimativa;
- e o teste T com base comparativa em t crítico, para testar a igualdade das médias da amostra utilizada (simulada) com as médias dos consumos fornecidos pela equação ao verificar se suas variâncias são estatisticamente iguais.

Esperou-se, da equação, o fornecimento do consumo de energia elétrica da edificação que permite a avaliação da eficiência entre diferentes tipos de edificações, usando os parâmetros intervenientes no consumo de energia como variáveis de entrada.

4.2.8. Avaliação da eficiência energética do envoltório

A avaliação da eficiência energética do envoltório foi realizada utilizando os indicadores citados, Custos da Energia Conservada, CEC; Custo do Ciclo de Vida, CCV; Pay-back e Taxa Interna de Retorno, TIR, mais o consumo de energia.

Dois princípios são estabelecidos:

- uma edificação deve ter sua eficiência comparada com edificações de mesma volumetria, mas;
- é desejável estabelecer um critério geral de classificação da eficiência das edificações.

Partindo-se destas afirmações, modelos de referência cuja eficiência é conhecida foram criados para *benchmarking* da eficiência energética do envoltório. Usando os resultados do estudo de campo, dois tipos de envoltório foram estabelecidos: um muito eficiente e outro pouco eficiente. Os parâmetros do envoltório dos modelos de referência são mostrados na Tabela 19. O modelo de menor eficiência refere-se a parâmetros mais freqüentes encontrados no levantamento (modelo 1), enquanto o de maior eficiência

refere-se a parâmetros que promovem a eficiência energética (modelo 2). Ambos devem ser aplicados a alternativas com o mesmo Fator de Forma e Fator Altura.

Tabela 19 – Parâmetros de envoltório dos modelos de referência.

Modelo	Eficiência	PJF	FS	AVS	AHS	U_{cob}
1	Menor	0,60	0,61	0	0	2,00
2	Maior	0,05	0,87	0	0	0,70

Através destes modelos, é possível avaliar a eficiência do envoltório de uma edificação através de um método comparativo entre edificações teóricas cujas demais características são idênticas. Vale lembrar que é possível encontrar envoltórios mais eficientes que o modelo 2, assim como há envoltórios menos eficientes que o modelo 1 da Tabela 19. Deve-se enfatizar, assim, que estes modelos não são limites de uma escala, mas apenas modelos referenciais da eficiência do envoltório.

4.3. Resultados

4.3.1. Parâmetros Globais: características primárias

A Figura 26 apresenta o consumo anual de energia elétrica, para alternativas dos grandes escritórios, resultantes das combinações de densidade de carga interna (DCI), eficiência do condicionador de ar de janela (COP) e orientação solar. Na figura, o consumo de energia é função do COP em dois gráficos: o gráfico (a) mostra as alternativas com Densidade de Carga Interna (DCI) de 18,90 W/m² e o gráfico (b) mostra alternativas com DCI de 28,90 W/m². As densidades de carga interna utilizadas são descritas na Tabela 14 do item 4.2.3 da metodologia. Pontos claros são alternativas cujas maiores fachadas são orientadas a norte-sul e pontos escuros referem-se à orientação leste-oeste. Três pontos iguais alinhados, ou seja, com o mesmo COP, são alternativas com orientação e eficiência idênticas, porém com envoltórios distintos: uma alternativa de maior consumo (quadrado), o protótipo representativo (triângulo), e uma alternativa de menor consumo de energia (círculo). A variação do eixo das ordenadas é de 40 kWh/m² nos dois gráficos, permitindo portanto uma comparação visual das amplitudes do consumo anual de energia pela área, mesmo que em intervalos distintos. A Figura 26(a), inicia-se em 80 kWh/m², indo até 120 kWh/m², e a Figura 26(b) inicia-se em 125 kWh/m², chegando a 165 kWh/m².

A Figura 26(a) mostra como é elevado o impacto da eficiência do condicionador de ar no consumo de energia. Considerando os casos com orientação N-S, entre as alternativas de menor consumo, ou seja, mais eficientes, o consumo de energia elétrica foi reduzido de 96 kWh/m² para 83 kWh/m², diferença de **13 kWh/m²**, ao alterar a eficiência do condicionador de ar de G para A. Entre os protótipos representativos, a redução foi de 99 kWh/m² para 85 kWh/m², ou seja, de **14 kWh/m²**. E entre as alternativas de maior consumo, ou menos eficientes, a redução no consumo de energia foi de 110 kWh/m² para 92 kWh/m², ou seja, diferença de **18 kWh/m²**.

Já a alteração da orientação solar da edificação, de N-S para L-O, elevou o consumo da alternativa menos eficiente em **6 kWh/m²** (de 110 kWh/m² para 116 kWh/m²) para o condicionador de ar de eficiência G e em **3 kWh/m²** (de 92 kWh/m² para 95 kWh/m²) para o condicionador de ar de eficiência A.

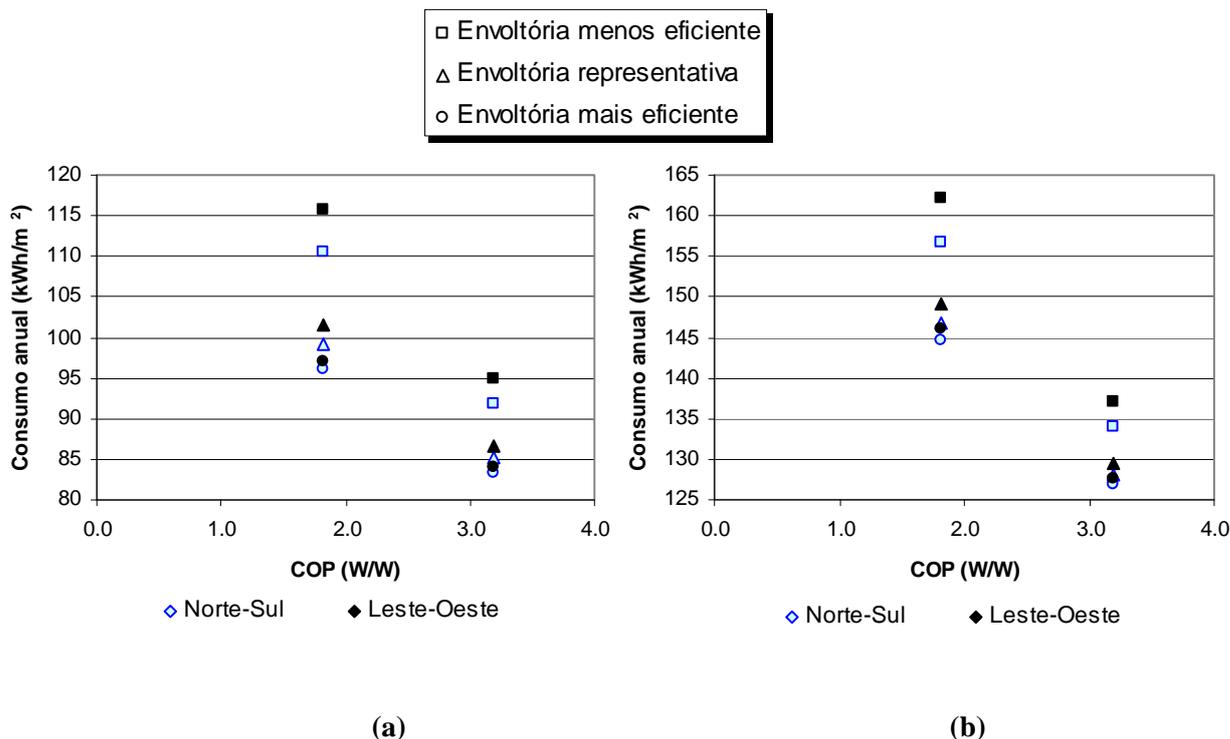


Figura 26 – Consumo anual de energia elétrica de alternativas e protótipos com DCI de 18,90 W/m² (a) e DCI de 28,90 W/m² (b). Três pontos idênticos e alinhados indicam, de cima para baixo: uso de envoltório do protótipo ineficiente, uso de envoltório do protótipo representativo e uso de envoltório eficiente.

Observando as diferenças provocadas pelo envoltório, a alteração da eficiência do sistema de condicionamento de ar de G para A, ou de 1,82 W/W para 3,19 W/W reduziu as diferenças entre os consumos de energia: para a orientação N-S, a diferença entre a alternativa de maior consumo de energia (quadrado) e a de menor consumo (círculo) é de **14 kWh/m²** (de 110 kWh/m² para 96 kWh/m²) com o condicionador de ar de eficiência G. Esta diferença cai para **9 kWh/m²** entre aquelas de maior e menor consumo (de 92 kWh/m² para 83 kWh/m²) com o condicionador de ar de eficiência A. Ou seja, há uma redução de 5 kWh/m². Realizando a mesma comparação, porém da influência da orientação solar no impacto do envoltório no consumo de energia, as diferenças são menores. A diferença do consumo de energia das alternativas extremas, de maior e menor consumo, com eficiência A é de **9 kWh/m²** (de 83 kWh/m² para 92 kWh/m²) na orientação N-S e passa para **11 kWh/m²** na orientação L-O (de 84 kWh/m² para 95 kWh/m²). Ou seja, há um aumento de 3 kWh/m².

Passando para a Figura 26(b), é possível perceber que as diferenças citadas acima foram reduzidas, embora os consumos sejam maiores. O aumento da DCI reduziu o impacto do envoltório sobre o consumo de energia. Se na Figura 26(a) as diferenças entre os protótipos de maior e menor consumo para orientação N-S e condicionador de ar A era de 9 kWh/m², na Figura 26(b) esta diferença passou para **7 kWh/m²**. Considerando a orientação N-S e condicionador de ar G, as diferenças eram de 14 kWh/m² e passaram para **12 kWh/m²**. Já a orientação solar não apresentou alterações significativas para as diferenças de consumo dos casos N-S e L-O.

É também interessante notar o grande impacto da densidade de carga interna (DCI) no consumo de energia. Nos casos com DCI de 18,90 W/m², o consumo máximo encontrado foi de 116 kWh/m². O aumento na DCI de 10 W/m², passando de DCI de 18,90 W/m² para 28,90 W/m² elevou o consumo de energia do mesmo modelo de edificação (orientação L-O, condicionador de ar com eficiência G) para 162 kWh/m², aumento de 42 kWh/m².

Em resumo, pode-se afirmar que, para os modelos baseados no protótipo representativo dos grandes escritórios, o condicionador de ar apresenta maior impacto no consumo de energia, chegando a um aumento de 18 kWh/m². Em seguida, o envoltório tem um impacto que pode chegar a 14 kWh/m² e a orientação solar da edificação pode gerar aumentos de apenas 6 kWh/m². Já a DCI tem variação do consumo dependente da densidade utilizada. Neste trabalho, o aumento chegou a 42 kWh/m² de um sistema de iluminação eficiente que gerou uma DCI 18,90 W/m² para um sistema ineficiente que resultou em 28,90 W/m².

Os resultados das simulações mostraram também o quanto os fatores orientação solar, DCI e eficiência do condicionador de ar influenciam o consumo de energia quando é alterado algum elemento do envoltório. Estes resultados orientaram o foco da pesquisa para a análise dos parâmetros de interesse, e confirmaram a relevância destes fatores nas etapas posteriores.

A investigação da volumetria exigiu simulações à parte, além daquelas exemplificadas na Figura 26. Primeiramente, são mostradas as análises individuais em função de cada indicador da volumetria, nas Figuras 27 e 28.

A princípio, acredita-se que o consumo anual de energia pela área se reduza com o aumento do número de pavimentos. Apesar de ser uma tendência geral, parâmetros

como o clima podem alterar este fenômeno. A Figura 27 apresenta este caso, em que a planta da grande loja é simulada com números de pavimentos de 1 a 25. Na Figura 27(a), clima de Salvador, a edificação de 1 pavimento apresentou os maiores consumos para todas as condições internas simuladas: Densidade de Carga Interna de 10,7 ou 34,4 W/m² (DCI) e eficiência A ou G do condicionador de ar (AC). Já na Figura 27(b), clima de Curitiba, a edificação com 1 pavimento apresentou consumos mais baixos que as demais, devido: ou aos ganhos de carga térmica pela cobertura, aquecendo o pavimento único, ou à perda da carga térmica interna dos casos com DCI de 34,4 W/m². As alternativas com DCI de 34,4 W/m² ainda apresentam uma particularidade: o consumo se eleva com o aumento do número de pavimentos até 5 andares, em função desta elevada carga interna. Em seguida, como o restante dos casos, ele decresce, quase se estabilizando após atingir 10 pavimentos. Este fenômeno se repete nas demais atividades.

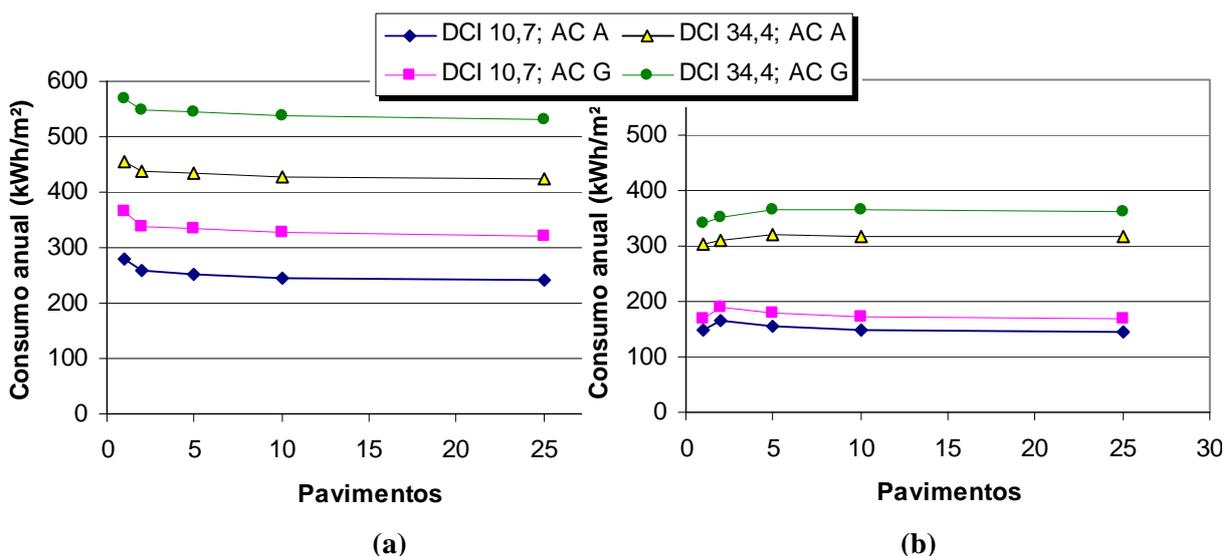


Figura 27 – Consumos anuais de energia elétrica pela área em função do número de pavimentos, usando edificações com ID 1 a 5, simuladas para o clima de Salvador (a) e Curitiba (b).

Ao analisar a Figura 28, em que os consumos são apresentados em função do Fator de Forma (A_{env}/V_{tot}), percebe-se que edificações menores consomem mais (Fator de Forma maior). No entanto, a curva do crescimento do consumo é mais acentuada nas edificações cuja eficiência do condicionador de ar é A, ou seja, a volumetria influi mais no consumo quando a eficiência do sistema de condicionamento de ar é elevada por evitar o mascaramento de sua influência por um sistema ineficiente. Há também um

destaque do caso com Densidade de Carga Interna elevada ($DCI = 34,4 \text{ W/m}^2$) e eficiência G do condicionador de ar, em que a curvatura é invertida em relação aos demais casos, tanto na Figura 28(a) como na Figura 28(b). Este fenômeno indica uma alteração da sensibilidade do consumo à volumetria, melhor visualizado a seguir.

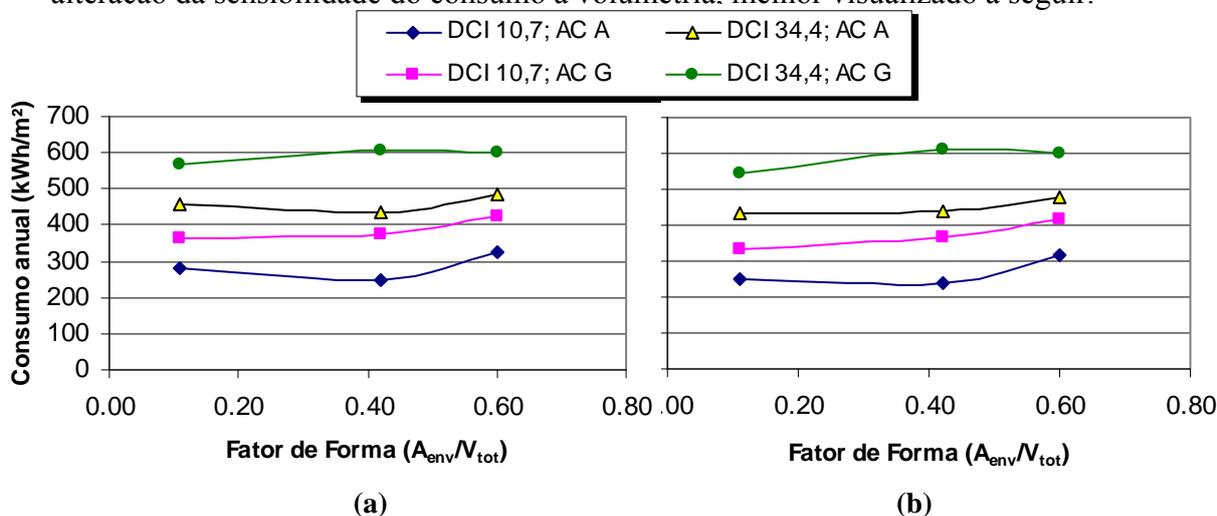


Figura 28 – Consumos anuais de energia elétrica pela área em função do Fator de Forma, para as edificações com ID 1, 6 e 12 de 1 pavimento (a) e com ID 3, 8 e 13 de 5 pavimentos (b).

A Figura 29 é a base bidimensional contendo o Fator de Forma (A_{env}/V_{tot}) e o Fator Altura (A_{cob}/A_{tot}) das 14 alternativas em que estes parâmetros foram variados, gerando 14 volumetrias distintas. Sobre ela, no eixo z, são mostrados os consumos de energia pela área das edificações, onde todas as demais características das edificações, exceto a volumetria, são idênticas.

A Figura 30 apresenta a primeira situação para estas edificações de ID 1 a 14, simuladas no clima de Salvador, com eficiência A do condicionador de ar de janela e com Densidade de Carga Interna baixa, de $10,7 \text{ W/m}^2$. Nela, percebe-se que edificações com plantas maiores e com grande número de pavimentos apresentam os menores consumos de energia elétrica pela área ao longo do ano (edificações tipo A). Há um pequeno aumento deste consumo nas edificações cujas plantas têm grandes dimensões, porém possuem poucos pavimentos (edificações tipo B). Em seguida, existe outro aumento no consumo de energia de edificações com planta média e de poucos pavimentos, no máximo 3 (edificações tipo C), e este aumento torna-se bastante significativo caso as dimensões da planta sejam realmente pequenas, tanto no caso representado com um pavimento (edificações tipo D), como em edificações com mais de um pavimento (edificações tipo E e F).

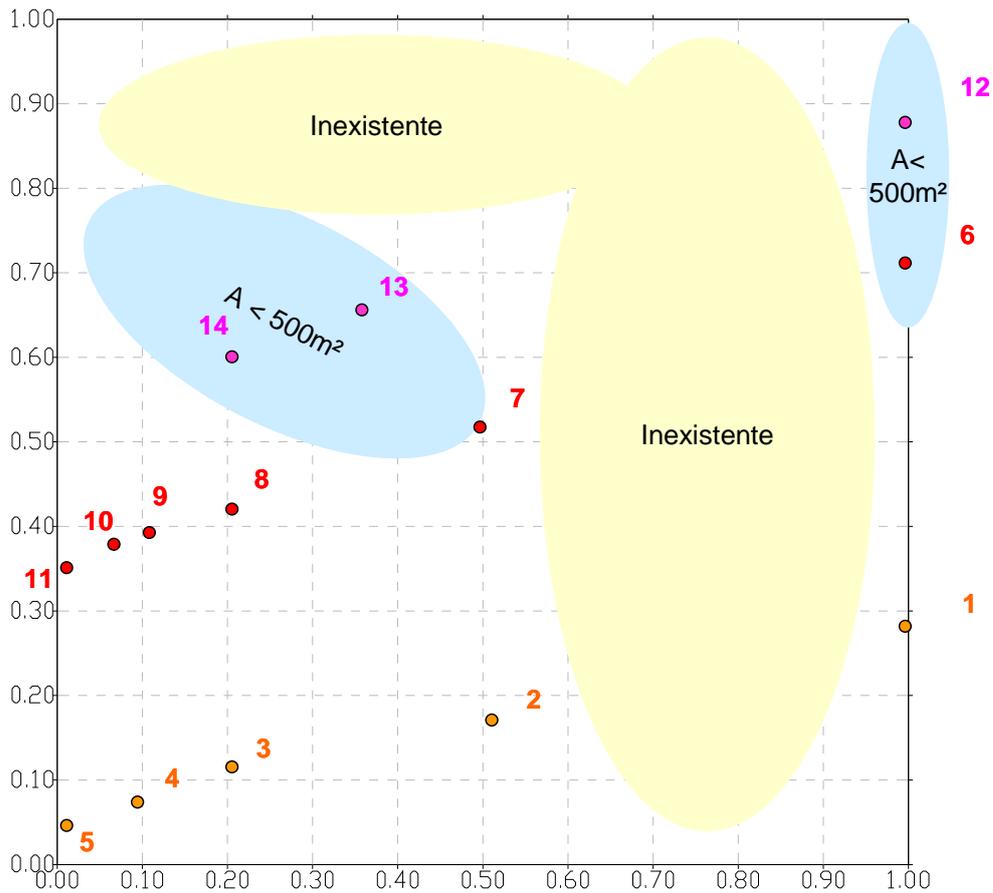


Figura 29 – Gráfico base das representações da volumetria de edificações comerciais contendo o Fator Altura e o Fator de Forma.

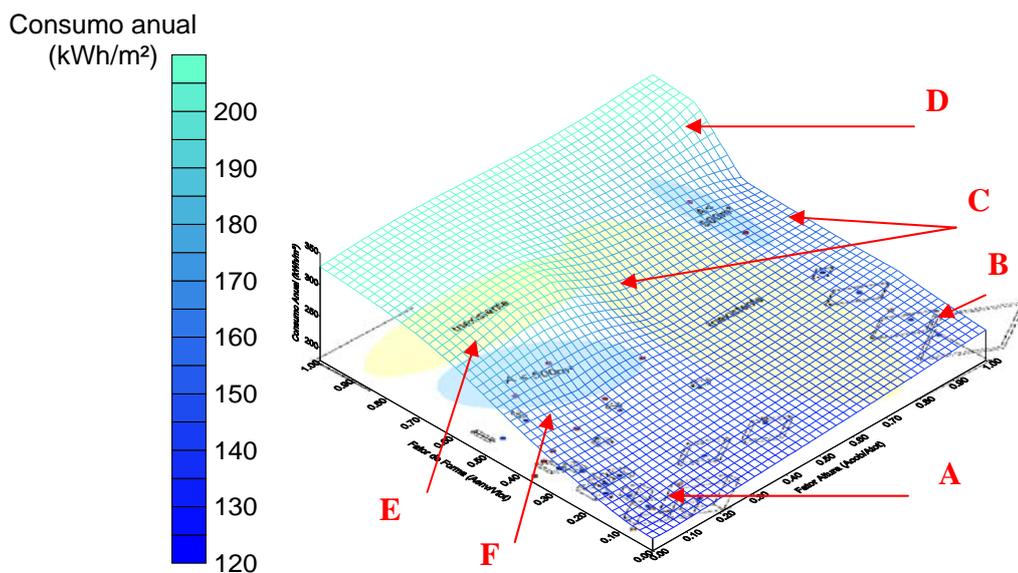


Figura 30 – Consumos anuais de energia elétrica pela área (kWh/m²) de edificações de acordo com sua volumetria, para Salvador, condicionador de ar de eficiência A e DCI = 10,7 W/m².

Analisada a Figura 30, pode-se concluir que a maior sensibilidade do consumo de energia elétrica está relacionada a uma volumetria de pequenas dimensões. A influência do envoltório sobre a edificação é mais sentida em uma edificação de pequenas dimensões, cujo volume de ar a ser resfriado ou aquecido é menor e está mais exposto ao clima externo. Esta influência, entretanto, refere-se ao clima, à eficiência A do condicionador de ar e às cargas internas descritas, e deve ser comparada às condições de contorno dos demais casos.

Para o clima de Curitiba, Zona Bioclimática 1 (Figura 31), a variação do consumo em relação à volumetria é semelhante à de Salvador, com apenas uma curvatura mais acentuada nas edificações do tipo C com 2 pavimentos, e nas edificações tipo F, região de transição de edificações de planta média para planta pequena. Em geral, pode-se notar que a variação climática brasileira não altera os efeitos da volumetria no consumo de energia elétrica pela área, exceto pelo já demonstrado na Figura 27, acerca do número de pavimentos. Mas altera, de fato, o consumo de energia pela área, como se pode observar na escala de cores da Figura 31.

Se não foram encontradas diferenças no impacto da volumetria no consumo de energia de um clima para outro, foram percebidas diferenças claras do impacto da volumetria no consumo quando as cargas internas são alteradas. O aumento da Densidade de Carga Interna, de $10,7 \text{ W/m}^2$ (Figura 30) para $34,4 \text{ W/m}^2$ (Figura 32) pode mascarar a sensibilidade de alguns tipos de edificações. Em outras palavras, o impacto da volumetria no consumo de eletricidade é menos relevante quando as cargas internas são elevadas, mesmo que haja um sistema de condicionamento de ar eficiente. Embora exista tal impacto, a Figura 32 mostra que ele é menos diferenciado nas edificações de plantas pequenas: para um mesmo número de pavimentos, há um aumento linear do consumo das grandes edificações (tipo A) para as pequenas edificações (tipo E). Ou seja, a região F, antes côncava nas Figuras 30 e 31, torna-se um plano inclinado na Figura 32.

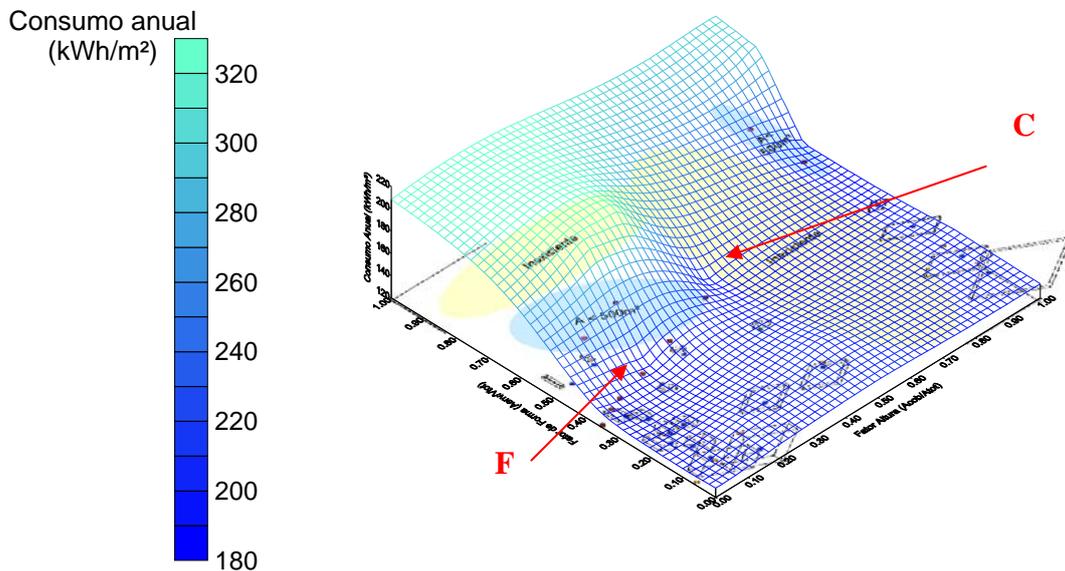


Figura 31 – Consumos anuais de energia elétrica pela área (kWh/m²) de edificações de acordo com sua volumetria, para Curitiba, condicionador de ar de eficiência A e DCI = 10,7 W/m².

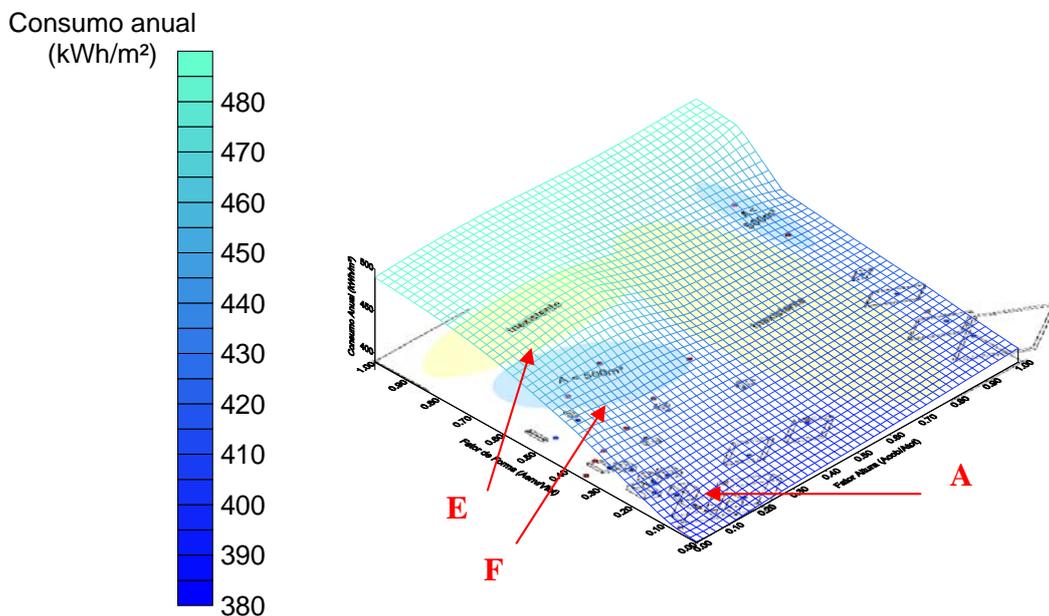


Figura 32 – Consumos anuais de energia elétrica pela área (kWh/m²) de edificações de acordo com sua volumetria, para Salvador, condicionador de ar de eficiência A e DCI = 34,4 W/m².

Este mascaramento dos efeitos da volumetria é predominante, no entanto, quando se mantém uma carga interna elevada com um sistema de condicionamento de ar pouco eficiente, ou seja, DCI de 34,4 W/m² e eficiência G (Figura 33). Neste caso, a sensibilidade do consumo de energia à volumetria se resume praticamente a dois grandes grupos de edificações: de grandes plantas e de pequenas plantas, ou dimensões reduzidas. As edificações de muitos pavimentos com planta média (tipo F) apresentam um consumo equivalente às de planta pequena (tipo E), e o consumo é diferenciado apenas em edificações de grandes dimensões (tipo A). O número de pavimentos torna-se mais relevante, com a tendência de edificações de planta média apresentarem um menor consumo quando possuem apenas um pavimento (tipo C). Este fenômeno pode ser explicado pela pouca relevância da carga térmica proveniente da cobertura frente às elevadas cargas internas, ou até mesmo pela perda de carga térmica interna pela cobertura, como citado. Vale atentar também para o elevado consumo pela área, devido aos mesmos fatores: DCI elevada e baixa eficiência do condicionador de ar.

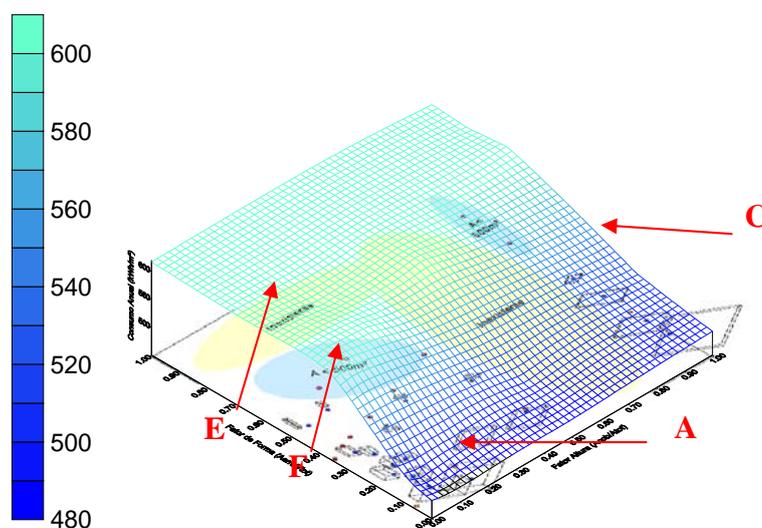


Figura 33 – Consumos anuais de energia elétrica pela área (kWh/m²) de edificações de acordo com sua volumetria, para Salvador, condicionador de ar de eficiência G e DCI = 34,4 W/m².

O maior consumo anual de energia pela área de uma edificação de um pavimento em relação à de edificações idênticas com mais pavimentos foi perceptível no clima quente de Salvador, mas não se repetiu no clima frio de Curitiba. Além da influência do clima, pôde-se observar que as cargas internas alteraram a curva do consumo de eletricidade

das edificações de até 5 pavimentos em Curitiba. Há uma perda de carga térmica pela cobertura nas edificações de 1 e 2 pavimentos que se mostra significativa quando as cargas internas são elevadas, no caso simulado, de $34,4 \text{ W/m}^2$. Desta forma, alternativas de 1 e 2 pavimentos apresentam um consumo pela área menor que de alternativas de 5 pavimentos. O mesmo não se repete em edificações de baixa carga interna, como de $10,7 \text{ W/m}^2$, onde o consumo de energia é maior nas edificações de 1 e 2 pavimentos. Tais fatores demonstram existir uma dependência do desempenho energético da edificação em relação à combinação de um clima, das cargas internas e da geometria da edificação. Vale lembrar que as propriedades térmicas do envoltório não foram alteradas.

De forma geral, edificações relevantes para a eficiência energética se encontram nas regiões C, E e F, devido à sua frequência na paisagem urbana. As pequenas edificações (tipo D e parte do tipo E), embora bastante comuns, não apresentam consumos de energia demasiadamente significativos devido à limitação pelas suas próprias dimensões. Ao contrário, edificações de grandes dimensões, (tipo A e B), embora pouco comuns na maioria das cidades brasileiras, apresentam um grande impacto e também merecem atenção. Em relação ao clima, percebeu-se que as alterações climáticas a que o Brasil está submetido alteram o impacto da volumetria sobre o consumo quando esta é combinada a fatores terceiros, como clima, volumetria e cargas internas. Somente o clima, isoladamente, não gera mudanças nos efeitos da volumetria sobre o consumo de energia elétrica pela área, exceto nas edificações consideradas médias.

Enfim, foi possível notar que as edificações com dimensões extremas (muito grandes ou muito pequenas) não apresentam alterações no impacto da volumetria no consumo de energia e, portanto, nos demais parâmetros que participam do desempenho energético. Excetuam-se as edificações de um pavimento, que sempre merecem atenção devido às trocas pela cobertura. No entanto, a sensibilidade do consumo a uma grande volumetria com 1 pavimento (tipo B), não ocorreu como esperado. Já as edificações de dimensões médias, seja no tamanho da planta ou no número de pavimentos, possuem volumetria com impacto variável no desempenho energético de acordo com outros parâmetros, e devem ser adotadas com os merecidos cuidados em simulações e avaliações energéticas.

4.3.2. Envolvimento: simulação das Medidas de Conservação de Energia

4.3.2.1. Relevância das MCE

A Tabela 20 apresenta a ordem de aplicação das MCE para as alternativas dos Grandes Escritórios no Ciclo 1 e no Ciclo 2 para orientação da maior fachada a N-S e duas eficiências de condicionador de ar: A e G.

Na Tabela 20 estão presentes todas as medidas que foram paulatinamente incorporadas ao caso base e aos casos posteriores. Usando a economia de energia elétrica de cada alternativa em relação ao consumo do caso base, percebe-se que a ordem de relevância das MCE é estável, independente do condicionador de ar. A área de janela (Percentual de Área de Janela na Fachada, PJF) apresenta maior impacto sobre o consumo, seguida do Ângulo Vertical de Sombreamento, AVS, do Ângulo Horizontal de Sombreamento, AHS, da Transmitância Térmica da cobertura, do Fator Solar do vidro e, por fim, da Transmitância das paredes externas. As 3 primeiras medidas são viáveis independente do ciclo ou da eficiência do condicionador de ar. Para as alternativas de eficiência A do condicionador de ar, a pequena área de janela das alternativas do ciclo 1 garante que o isolamento da cobertura seja viável, mas o mesmo não se repete no Ciclo 2, onde o Custo da Energia Conservada do Caso 4 ultrapassa a tarifa de R\$ 0,330/kWh.

Citando casos com eficiência A do condicionador de ar, a Tabela 20 mostra que a alternativa com envoltório mais eficiente para o protótipo de grandes escritórios é o Caso 5 do Ciclo 1, composta de PJF 20%, AVS 35°, AHS 45° e Transmitância Térmica da cobertura de 0,70 W/m²k. Também mostra que é mais interessante um envoltório como o Caso 6 do Ciclo 1, de CEC R\$ 0,334/kWh, que um como o Caso 4 do Ciclo 2, de CEC R\$ 0,365/kWh, embora a análise pelo CEC considera que ambos não são economicamente viáveis.

Em geral, percebe-se que o condicionador de ar com eficiência G gera CECs reduzidos em relação à eficiência A. Deve-se atentar, entretanto, que a economia de energia nas alternativas com eficiência G só é maior porque o sistema é ineficiente, ampliando a participação do envoltório na redução do consumo. Recomenda-se assim, primeiramente elevar a eficiência do sistema de condicionamento para, finalmente, interferir no envoltório. Caso esta medida não seja possível, a relevância das MCE no envoltório será maior, gerando CECs mais baixos. Este fator demonstra, mais uma vez,

que a eficiência deve ser analisada respeitando certos agrupamentos cujas características sejam comuns, como o tipo de condicionador de ar e sua eficiência.

Tabela 20 - Ordem de incorporação das MCE nos casos de cada bloco do Ciclo 1 e 2 dos Grandes Escritórios, com condicionador de ar com etiqueta de eficiência energética A e G para orientação N-S.

		Eficiência do condicionador de ar			
		A		G	
		MCE	CEC (R\$/kWh)	MCE	CEC (R\$/kWh)
Ciclo 1	Caso base	-		-	
	Caso 2	PJF _p 20%	0,081	PJF _p 20%	0,048
	Caso 3	AVS 35	0,107	AVS 35	0,063
	Caso 4	AHS 45	0,153	AHS 45	0,089
	Caso 5	U _{cob} 0,70	0,223	U _{cob} 0,70	0,130
	Caso 6	FS 0,61	0,334	FS 0,61	0,196
	Caso 7	U _{parL} 2,25	0,424	U _{parL} 2,25	0,249
Ciclo 2	Caso 1	PJF _p 40%	0,276	PJF _p 40%	0,162
	Caso 2	AVS 35	0,222	AVS 35	0,145
	Caso 3	AHS 45	0,300	AHS 45	0,187
	Caso 4	U _{cob} 0,70	0,365	U _{cob} 0,70	0,225
	Caso 5	FS 0,61	0,604	FS 0,61	0,365
	Caso 6	U _{parL} 2,25	0,691	U _{parL} 2,25	0,417

Para verificar as demais MCE que não estão presentes na tabela, a Figura 34 apresenta o CEC das alternativas de Grande Escritórios simuladas com a maior fachada voltada a N-S, com DPI de 10 W/m² e etiqueta de eficiência A para o condicionador de ar. Ela contém o Ciclo 1, 2 e 4. Vale comentar que o Ciclo 3 iniciou-se com um Fator Solar de 0,22 cujo CEC de R\$ 1,35/kWh (devido ao elevado custo do material e elevado PJF_p) ultrapassou o valor da tarifa já no Bloco 1 e as simulações conseguintes foram interrompidas.

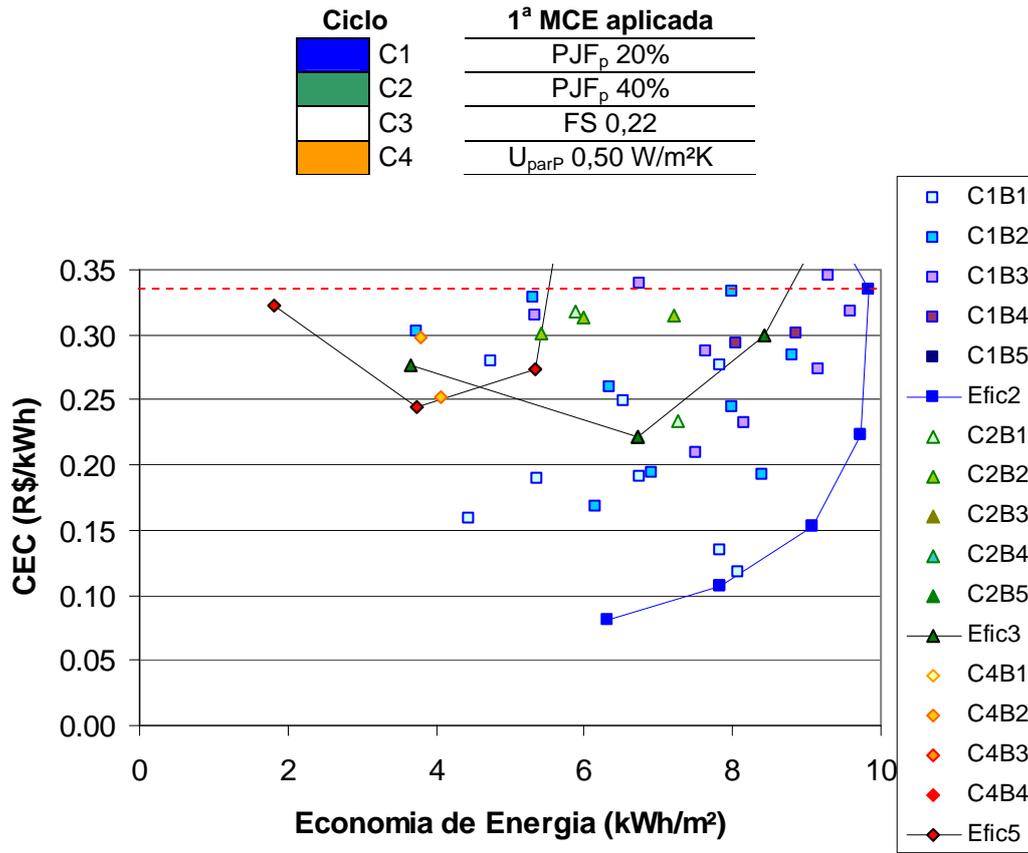


Figura 34 - CEC das alternativas de Grandes Escritórios simuladas com a maior fachada orientada a N-S, com DPI de 10 W/m² e eficiência A do condicionador de ar.

A Figura 34 refere-se a economias de eletricidade relacionadas a um consumo de 110 kWh/m². As cores dividem os ciclos de acordo com as legendas, sendo os quadrados pertencentes ao Ciclo 1, que contém as alternativas cuja 1ª MCE é o PJF 20%; os triângulos pertencentes ao Ciclo 2, que contém as alternativas cuja 1ª MCE é o PJF 40%; e o losangos pertencentes ao Ciclo 4, que contém as alternativas cuja 1ª MCE é a U_{par} 0,50 W/m²k. Quanto mais o CEC se afasta da origem, menos economicamente interessante é a MCE. Por outro lado, quanto mais a alternativa se afasta da origem no eixo das abscissas, maior é a economia de energia acumulada que foi proporcionada pelas MCE aplicadas. Caso o CEC da última MCE seja menor que o valor da tarifa comercial de energia elétrica, R\$0,33/kWh, a alternativa com maior economia de energia é a mais interessante. Uma alternativa eficiente pode ser entendida, então, como aquela cujo ponto no gráfico está mais à direita enquanto se mantém abaixo de R\$0,33/kWh.

Os três primeiros Ciclos da Figura 34 estão delimitados por linhas que ligam algumas alternativas. Estas indicam o processo pelo qual se obteve a edificação eficiente: são as alternativas que contêm as MCE que foram progressivamente incorporadas ao caso base e aos casos subseqüentes, até gerar o caso mais eficiente possível. Contudo, deve-se atentar algumas características destas linhas, como para o recuo na economia de energia mostrado no limite de eficiência do Ciclo 1. As 4 primeiras MCE incorporadas ao caso eficientes geram uma alternativa com uma economia de energia próxima a 10 kWh/m². A incorporação da quinta MCE não eleva a economia de energia, embora aumente o CEC, ou seja, os custos incorporados ao conjunto de MCE. É assim, recomendável não incorporar a quinta medida, que, como visto na Tabela 20, é o Fator Solar de 0,61. De fato, seu CEC ultrapassa a tarifa em R\$ 0,004.

As linhas que delimitam os casos mais eficientes dos Ciclo 2 e 3 apresentam uma particularidade: elas decrescem no eixo das ordenadas da 1^a para a 2^a MCE por não terem sido iniciadas com a MCE mais vantajosa.

No Ciclo 2, embora a 1^a MCE aplicada seja o PJF de 40%, a relação de custo e de economia de energia da segunda MCE aplicada, AVS 35° (para um PJF de 40%), é mais interessante. Esta relação é vista no Bloco 0, onde AVS 35° para PJF de 80% é mais interessante que o PJF de 40% se aplicado isoladamente (Tabela 21). Assim, embora a ordem de aplicação das medidas no Ciclo 1 seja primeiramente o PJF, no Ciclo 2 deveria ser o AVS. Esta foi mantida propositadamente para verificar como os resultados se apresentam quando as simulações não se iniciam com a MCE mais eficiente: percebe-se que o próprio resultado indica a correção na ordem de simulação.

O mesmo ocorreu para o Ciclo 4 na Figura 34, onde há duas MCE consideradas mais eficientes que a transmitância da parede externa quando esta já está incorporada ao modelo. Notar que, sem a presença de paredes com transmitância de 0,50 W/m²K, outras MCE seriam mais vantajosas.

A tendência vista para as alternativas de grandes escritórios se repete em todos os Ciclos: o PJF, em geral, é o mais vantajoso, seguido das proteções solares. Ocasionalmente, para elevados percentuais de área de vidro, a proteção solar pode ser mais interessante. O Fator Solar e a Transmitância Térmica das paredes externas tendem a ser as MCE de maior CEC. Surpreendentemente, a Transmitância Térmica da cobertura mostrou ser mais vantajosa em edificações verticais que em edificações com grandes áreas cobertas. De fato, o custo obtido para o isolamento térmico foi elevado, e

o CEC destas alternativas foi superestimado. A adoção de isolantes menos onerosos pode alterar estes resultados

Tabela 21 - Custo da Energia Conservada, em R\$/kWh de todas as MCE do Bloco 0 e do Ciclo 1.

		Caso base +				Caso 1 +				Caso 2 +	
		MCE	CEC			MCE	CEC			MCE	CEC
Bloco 0 Caso base				Bloco 1 Caso 1: PJF _p 20%	U _{parL} 0,25	0,986	Bloco 2 Caso 2: PJF _p 20%; AVS 35°				
			U _{parP} 0,50		0,445	U _{parL} 0,25		0,530			
			U _{parP} 1,00		0,401	FS 0,22		0,384			
			FS 0,22		0,392	U _{cob} 1,17		0,334			
		FS 0,22	10,211		U _{cob} 1,17	0,367		U _{parP} 1,00	0,329		
		U _{cob} 0,7	5,033		U _{parL} 1,20	0,279		U _{parP} 0,50	0,303		
		FS 0,39	3,009		FS 0,39	0,277		FS 0,39	0,284		
		PJF 60%	1,050		FS 0,61	0,249		U _{parL} 1,20	0,261		
		AHS 45°	0,635		U _{cob} 0,70	0,192		FS 0,61	0,245		
		PJF 40%	0,276		U _{parP} 0,50	0,189		U _{parL} 2,25	0,195		
		AVS 45°	0,276		AHS 45°	0,135		U _{cob} 0,70	0,193		
		AVS 35°	0,259		AVS 45°	0,117		U _{parP} 1,80	0,168		
		PJF 20%	0,081		AVS 35°	0,107		AHS 45°	0,153		

		Caso 3 +				Caso 4 +		Caso Eficiente, Ciclo 1	
		MCE	CEC			MCE	CEC		
Bloco 3 Caso 3: PJF _p 20%; AVS 35°; AHS 45°				Bloco 4 Caso 4: PJF _p 20%; AVS 35°; AHS 45°; U _{cob} 0,70;			Caso 4 PJF _p 20%; AVS 35°; AHS 45°; U _{cob} 0,70		
			U _{parL} 0,25		0,470				
			FS 0,22		0,410				
			U _{cob} 1,17		0,346				
			U _{parP} 1,00		0,339	U _{parL} 0,25		0,579	
			FS 0,39		0,317	FS 0,22		0,458	
			U _{parP} 0,50		0,315	U _{parP} 0,50		0,433	
			U _{parL} 1,20		0,287	U _{parP} 1,00		0,425	
			FS 0,61		0,273	FS 0,39		0,372	
			U _{parL} 2,25		0,232	U _{parL} 1,20		0,357	
		U _{cob} 0,70	0,223	FS 0,61	0,334				

4.3.2.2. Consumo de energia elétrica

Além de fornecer subsídios para o CEC, a simulação das Medidas de Conservação de Energia também mostraram a variação do consumo de energia em função do envoltório exclusivamente, até se alcançar uma alternativa com a eficiência mais elevada possível dentre as combinações das MCE adotadas. A Figura 35 apresenta os consumos simulados dos grandes escritórios com o protótipo ineficiente como alternativa 1, o protótipo representativo como alternativa 17, mais as 14 alternativas simuladas no Bloco 0 e uma alternativa considerada de baixo consumo, alternativa 19. Todas as MCE são identificadas na Tabela 22.

Na Figura 35, a legenda indica a orientação das maiores fachadas, as cargas de iluminação e a eficiência do condicionador de ar, formando agrupamentos em que as MCE foram aplicadas. Estas combinações foram realizadas para Densidade de Potência de Iluminação interna (DPI) de 10 W/m², mas foram também simulados os consumos anuais para os protótipos, ineficiente e representativo, mais uma alternativa com alta eficiência com DPI de 20 W/m².

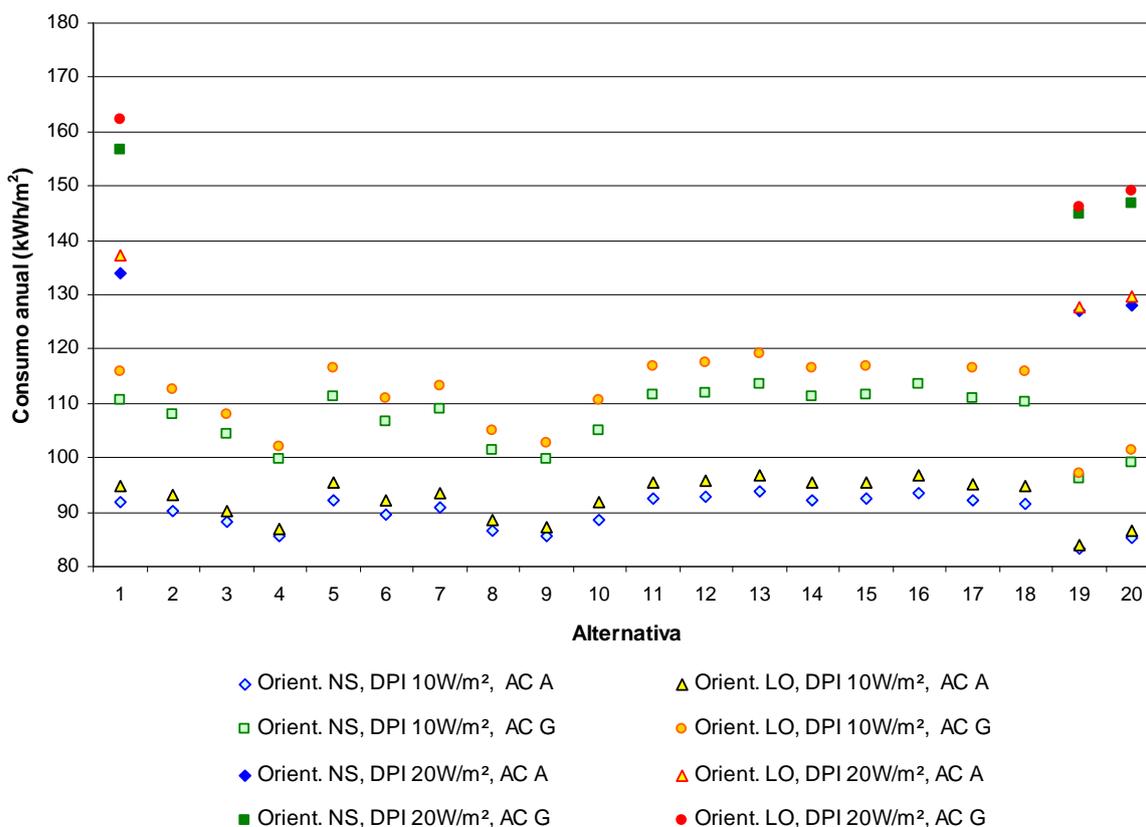


Figura 35 – Consumos anuais pela área de alternativas contendo diferentes MCE para os grandes escritórios no clima de Florianópolis.

É possível perceber que, em qualquer caso, a variação das MCE é proporcional independentemente da orientação solar, da carga interna ou da eficiência do condicionador de ar: para o mesmo grupo, o caso base ineficiente (alternativa 1) consome mais que a alternativa 2, que consome mais que a 4 e menos que a alternativa 5, e assim por diante. Ou seja, aplicando-se uma MCE, o consumo se eleva ou se reduz independentemente das cargas internas, da eficiência do condicionador de ar ou da orientação solar. O impacto destas três variáveis é percebido no quanto o consumo se eleva ou se reduz.

Tabela 22 – Medidas de Conservação de Energia utilizadas nas simulações cujos resultados são mostrados na Figura 35.

Alternativa	MCE	Valor	Observação
1	PJF	80%	Caso base (protótipo ineficiente)
	FS	0,83	
	AVS	0	
	AHS	0	
	U_{par}	2,39 W/m ² K	
	U_{cob}	2,38 W/m ² K	
2	PJF	60%	
3	PJF	40%	
4	PJF	20%	
5	Fator solar	0,61	
6	Fator solar	0,39	
7	Fator solar	0,22	
8	AVS	35°	Paredes pesadas
9	AVS	45°	Paredes pesadas
10	AHS	45°	Paredes pesadas
11	U_{par}	1,80 W/m ² K	Paredes leves
12	U_{par}	1,00 W/m ² K	Paredes leves
13	U_{par}	0,50 W/m ² K	Paredes leves
14	U_{par}	2,25 W/m ² K	

15	U_{par}	1,20 W/m ² K	
16	U_{par}	0,25 W/m ² K	
17	U_{cob}	1,17 W/m ² K	
18	U_{cob}	0,70 W/m ² K	
19	PJF	20%	Protótipo com combinações de baixo consumo de eletricidade
	FS	0,22	
	AVS	35°	
	AHS	45°	
	U_{par}	1,80 W/m ² K	
	U_{cob}	0,70 W/m ² K	
20	PJF	20%	Protótipo representativo
	FS	0,87	
	AVS	0	
	AHS	0	
	U_{par}	2,39 W/m ² K	
	U_{cob}	1,17 W/m ² K	

A proporcionalidade vista na Figura 35 para os grandes escritórios se repete com as demais atividades. Pode-se afirmar, assim, que qualquer dos agrupamentos contidos na Figura 35 pode indicar a eficiência do envoltório sem demais interferências nas MCE. Este fator possibilita focar o estudo da eficiência do envoltório em apenas um grupo, dispensando as repetições que seriam encontradas nos demais grupos e reduzindo significativamente o número de simulações.

Por fim, foram simulados 645 alternativas e protótipos de grandes escritórios, 331 de pequenos escritórios, 335 de grandes lojas, 320 de pequenas lojas, 259 de hotéis e 66 de escritórios verticais, totalizando 1956 simulações para avaliação do envoltório. Todas as alternativas simuladas são apresentadas no Anexo 3.

4.3.3. Desenvolvimento de equação para avaliação da eficiência

Das 1956 alternativas de simulação que foram analisadas na segunda etapa, 970 alternativas foram utilizadas para avaliação da eficiência energética focando somente o seu consumo de energia. A análise das características visando o desenvolvimento de uma equação de regressão multivariada indicou os seguintes parâmetros a ser incluídos:

- Densidade de Carga Interna: influencia na grandeza do consumo de energia, embora não altere o impacto do envoltório sobre o consumo;
- Padrão de uso: embora não tenha sido analisado, sabe-se que sua influência é semelhante à DCI;
- Volumetria: descrita pelos indicadores Fator de Forma e Fator Altura, altera o impacto do envoltório sobre o consumo anual de energia elétrica;
- Medidas de Conservação de Energia: referentes ao envoltório e foco deste trabalho.

Foram assim excluídas a eficiência do sistema de condicionamento de ar, cuja variação altera o impacto do envoltório sobre o consumo de forma proporcional à eficiência, e a orientação das maiores fachadas que, embora apresentem alterações no impacto do envoltório, estas foram consideradas pequenas em relação às demais alterações. Para estes parâmetros, os exemplos mais eficientes foram selecionados para compor a equação: eficiência A do condicionador de ar de janela e maiores fachadas voltadas a norte e a sul. Durante a análise, a Transmitância Térmica das paredes externas também foi eliminada, dada a complexidade de seus resultados, que incluíram investigações com outros climas.

Duas equações foram desenvolvidas baseadas no tamanho da planta: alternativas com área de projeção da edificação (geralmente coincidente com a área de projeção de cobertura) maiores e menores que 500 m² foram separadas. Tal separação se baseou na impossibilidade de uma equação de regressão linear, mesmo que multivariada, descrever com precisão todas as variações de volumetria estudadas. Não obstante, ainda foram encontradas limitações de Fator de Forma para as duas equações que representam o clima de Florianópolis, a ser discutidos à frente.

Como o objetivo é analisar o envoltório, além de parâmetros já padronizados como eficiência do condicionador de ar e orientação solar, a Densidade de Carga Interna e o

padrão de uso foram também uniformizados para 25 W/m² e 11 horas, respectivamente. Embora as equações tenham sido desenvolvidas com estas variáveis, não é foco gerar subsídios para extrapolação destes resultados para outras cargas internas e padrões de uso. Tal extrapolação mascararia os resultados do envoltório, sendo que as variáveis foram usadas somente para ajuste dos dados.

As equações são: Equação 16 para edifícios cuja planta (ou área de projeção) é menor 500 m² e Equação 17, para edifícios cuja planta é maior que 500 m².

Para $A_{pcob} < 500 \text{ m}^2$

Limite: Fator de forma máximo (A_{env}/V_{tot}) = 0,70

$$\begin{aligned}
 IC_{env} = & -175,30 \left(\frac{A_{pcob}}{A_{tot}} \right) - 212,79 \left(\frac{A_{env}}{V_{tot}} \right) + 21,86.PAF_T + 5.59.FS \\
 & - 0,19.AVS + 0,15.AHS + 275,19 \left(\frac{A_{pcob}}{A_{tot}} \right) \left(\frac{V_{tot}}{A_{env}} \right) + 213,35 \left(\frac{A_{pcob}}{A_{tot}} \right) \left(\frac{A_{env}}{V_{tot}} \right) \\
 & - 0,04.PAF_T.FS.AVS - 0,45.PAF_T.AHS + 190,42
 \end{aligned} \tag{equação 16}$$

$A_{pcob} > 500 \text{ m}^2$

Limite: Fator de forma mínimo (A_{env}/V_{tot}) = 0,15

$$\begin{aligned}
 IC_{env} = & -14,14 \left(\frac{A_{pcob}}{A_{tot}} \right) - 113,94 \left(\frac{A_{env}}{V_{tot}} \right) + 50,82.PJF + 4,86.FS \\
 & - 0,32.AVS + 0,26.AHS - 1,76.U_{cob} - 35,75 \left(\frac{V_{tot}}{A_{env}} \right) \\
 & - 0,54.PJF.AHS + 280,46
 \end{aligned} \tag{equação 17}$$

Onde,

IC: Indicador de Consumo (adimensional);

A_{pcob} : Área de projeção da cobertura (m²);

A_{tot} : Área total de piso (m²);

A_{env} : Área do envoltório (m²);

AVS: Ângulo Vertical de Sombreamento (graus);

AHS: Ângulo Horizontal de Sombreamento (graus);

PJF: Percentual de Área de Janela na Fachada (adimensional, para uso na equação);

U_{cob} : Transmitância Térmica da cobertura ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);

V_{tot} : Volume total da edificação (m^3).

A Figura 36 refere-se a edificações de planta pequena (área de projeção menor que 500 m^2) e à Equação 16. Ela apresenta os consumos anuais pela área simulados no eixo das abscissas, e o consumo produzido pela equação no eixo das ordenadas. Embora a correlação não seja representativa, por se tratar dos dados fonte para desenvolvimento da equação, a Figura 36 mostra as atividades comerciais e a grandeza dos seus consumos anuais que foram usados para desenvolver a equação para edificações de planta pequena. Foram utilizadas quatro atividades: grandes escritórios (azul), pequenas lojas (laranja), pequenos escritórios (verde) e escritórios verticais (rosa). Os consumos estão concentrados entre os $60 \text{ kWh}/\text{m}^2$ e $200 \text{ kWh}/\text{m}^2$. Além deste intervalo, outros dois são formados com as atividades de pequenas lojas (laranja) e pequenos escritórios (verde) entre $240 \text{ kWh}/\text{m}^2$ e $300 \text{ kWh}/\text{m}^2$ e somente com a atividade de pequenos escritórios (verde) entre $365 \text{ kWh}/\text{m}^2$ e $410 \text{ kWh}/\text{m}^2$. Estes últimos intervalos destacados do grupo são devido à Densidade de Carga Interna e ao padrão de uso elevado.

Da mesma forma, a Figura 37 apresenta os dados utilizados para as edificações de planta grande (projeção maior que 500 m^2) para desenvolvimento da Equação 17, usando alternativas de grandes lojas (amarelo) e hotéis (azul). Não há uma dispersão que indique um intervalo representativo de consumo de energia pela área para este tipo de edificação, com pontos distribuídos em 3 grupos, variando de $75 \text{ kWh}/\text{m}^2$ a $275 \text{ kWh}/\text{m}^2$, mas com amostras alcançando até $450 \text{ kWh}/\text{m}^2$. Estas últimas, também devido a DCI e padrões de uso elevados.

A correlação entre os dados simulados e equacionados gerou coeficientes de determinação de 0,9978 para a Equação 16 e 0,9989 para a Equação 17, com desvios padrão de 7,28 e 6,80, respectivamente. O teste T mostrou que as médias das amostras simuladas e a equacionada são consideradas iguais, utilizando as variâncias referentes a cada coeficiente adotado na equação.

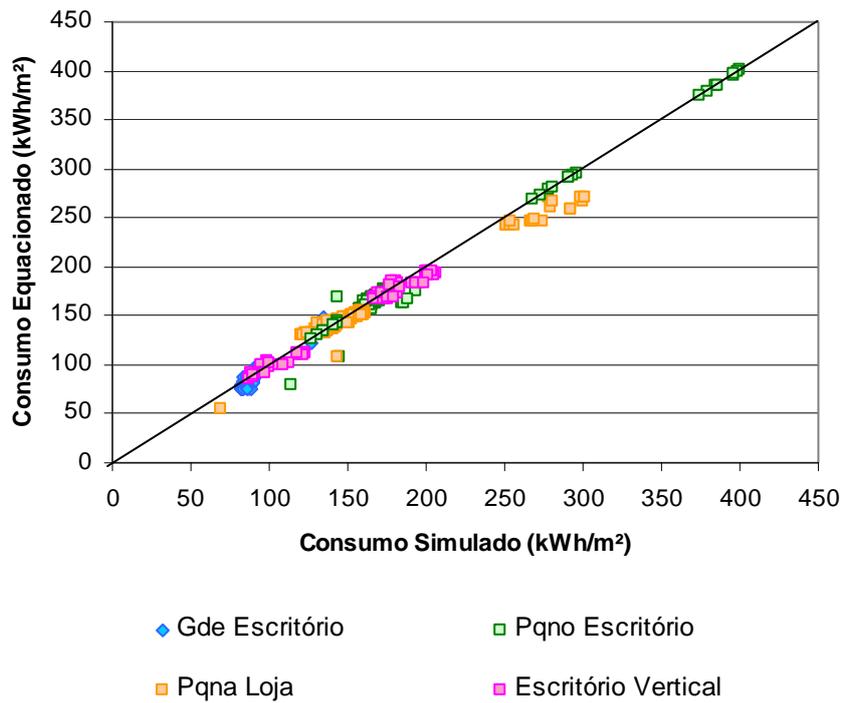


Figura 36 – Consumo anual de energia simulado e equacionado para edificações cuja área da planta é menor que 500 m².

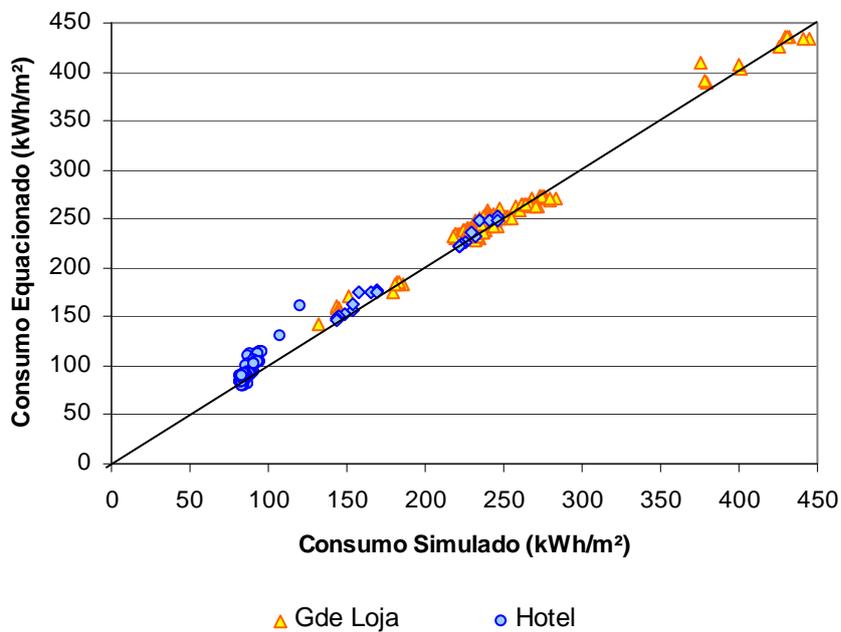


Figura 37 – Consumo anual de energia simulado e equacionado para edificações cuja área da planta é maior que 500 m².

4.3.3.1. Limitações das equações

Como comentado, as equações apresentam limitações quanto ao seu uso, referente ao Fator de Forma (FF) da edificação, ou seja, à sua volumetria. A Equação 16 apresenta um limite de FF máximo de 0,92 e a Equação 17 apresenta um limite mínimo de 0,15. Os Fatores de Forma utilizados para desenvolvimento das equações são 0,41 para grandes escritórios, 0,39 para pequenos escritórios, 0,66 para pequenas lojas e 0,35 para escritórios verticais. Ou seja, as amostras utilizadas não representam totalmente o universo de edificações passíveis de existirem na paisagem urbana, pois intervalos de 1 a 0,67 e abaixo de 0,34 não são contemplados no desenvolvimento da Equação 16. Igualmente, os FF das grandes lojas são 0,27 e dos hotéis são 0,23, excluindo os intervalos de 0 a 0,22.

Com esta restrição nos Fatores de Forma, os consumos não podem ser considerados válidos para qualquer edificação e, principalmente, não se deve extrapolar estes resultados para edificações com Fatores de Forma além do intervalo contendo as alternativas simuladas. Devem ser considerados apenas Indicadores de Consumo para comparação entre alternativas de edificações cujas características primárias são idênticas, de forma que representem as variações de eficiência decorrentes do envoltório.

Por este princípio, a aplicação dos Indicadores de consumo pôde ser ampliada para outras volumetrias. Foram estabelecidos limites conforme vistos na Figura 38 para edificações de área de projeção inferior a 500 m². A Equação 16 pode ser utilizada por edificações cujo Fator de Forma seja menor que 0,92 para que seja positivo, ou até 0,73 para Indicadores de Consumo mais plausíveis. E na Figura 39, o mesmo se repete para edificações com área de projeção maior que 500 m², com um limite mínimo para edificações com FF de 0,12 para evitar indicadores negativos ou com FF de 0,15 como margem de segurança.

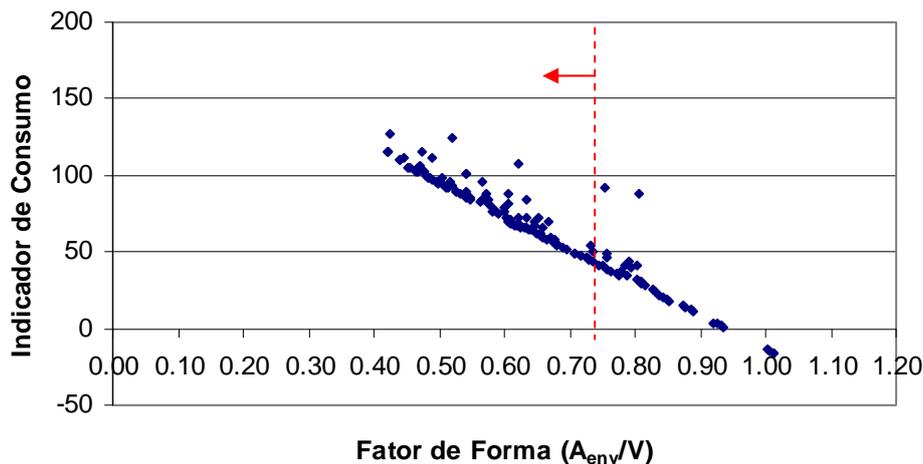


Figura 38- Indicadores de consumo estimados com a Equação 16 em função do Fator de Forma de um universo de edificações com área de projeção inferior a 500 m².

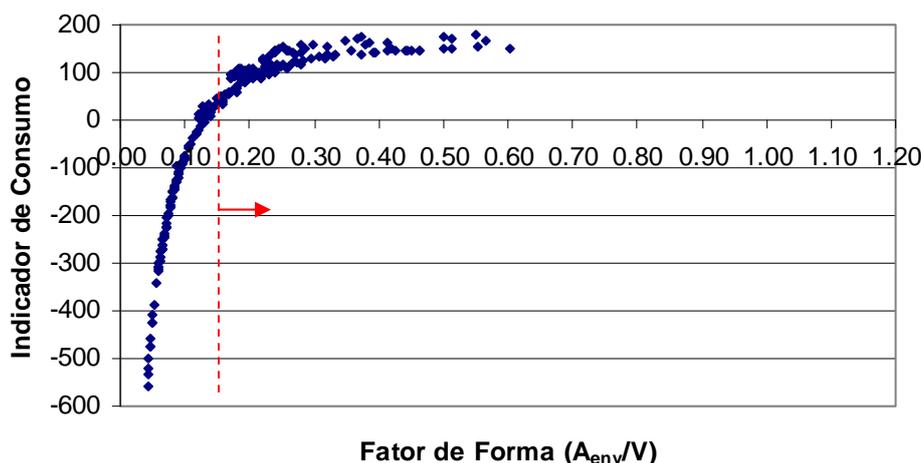


Figura 39 – Indicadores de consumo estimados com a Equação 17 em função do Fator de Forma de um universo de edificações com área de projeção maior que 500 m².

Outros condicionantes das equações para estabelecer os limites de Fator de Forma são DCI de 25 W/m² e padrão de uso médio comercial, de 11 horas (8 horas comerciais + 2 de almoço + ½ hora adicional antes e depois do expediente).

Desta forma, usando o gráfico que descreve a volumetria, pode-se estabelecer a abrangência de aplicação das equações, mostrada na Figura 40. Nela, pode-se observar um intervalo demarcado em vermelho, que se refere à área em que as equações são válidas, desde que o resultado seja considerado um indicador da eficiência do envoltório. Este intervalo abrange a grande maioria de edificações comerciais

comumente construídas no país, excetuando-se edificações de grandes dimensões, como galpões de centros de exposição de 100x100x10 m, e as de dimensões muito pequenas, como lojas de 10x10x3 m.

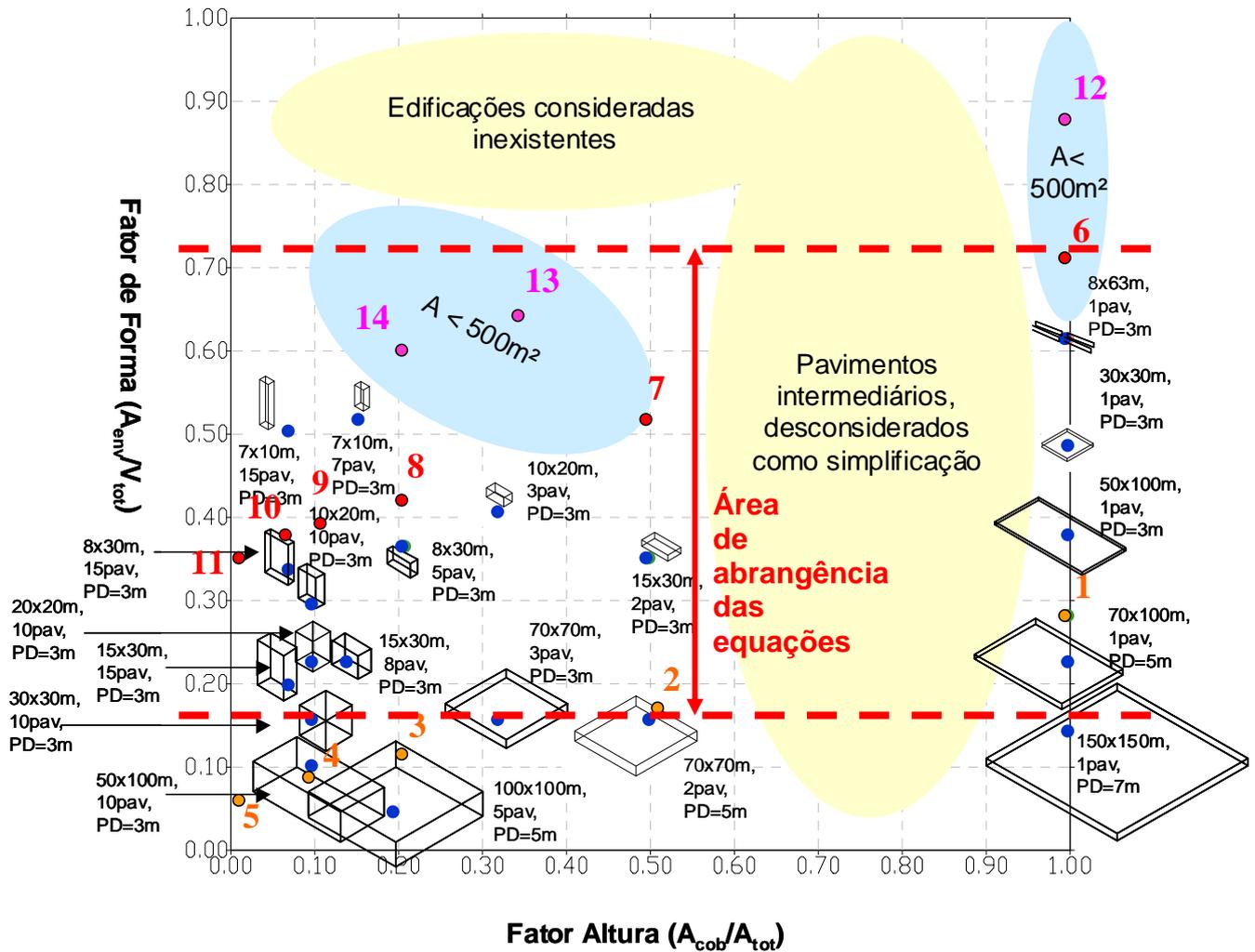


Figura 40 – Fator de Forma válido para aplicação das equações (linha tracejada vermelha).

4.3.3.2. Variação das MCE do envoltório usando as equações

Testes com as equações indicam como os parâmetros variam. A Figura 41 apresenta o Indicador de Consumo de energia pela área de janela na fachada, representado pelo PJF, para cinco diferentes volumetrias cuja área de projeção é menor que 500 m², ou seja, foi usada a Equação 16. A legenda indica as dimensões da edificação, o seu número de pavimentos e a altura do pé direito, todos em metros. É possível visualizar como o indicador é crescente com o aumento da área de janela. Não há diferenças na inclinação deste crescimento, mesmo na edificação de 20 x 25 m e 10 pavimentos, que se destaca das demais retas com um Indicador de Consumo de 32 unidades a mais que a edificação

com indicador mais próxima, de 8 x 40 m, 15 pavimentos e pé direito de 2,6m. O aumento do PJJ de 10% (0,10 no gráfico) para 100% (1,00 no gráfico) elevou o Indicador de Consumo em 19,7 unidades usando vidros claros 3mm (Fator Solar de 0,87) e nenhum sombreamento.

A Figura 42 apresenta as mesmas edificações, porém com o Indicador de Consumo variando em função do Fator Solar dos vidros. O parâmetro Fator Solar, referente à qualidade dos vidros, é menos significativo na equação do que o parâmetro PJJ, referente à área dos vidros. Isto é perceptível na Figura 42 ao se observar a inclinação das retas no crescimento do Indicador de Consumo com o aumento do Fator Solar de 0,20 para 0,87. Este crescimento é de, no máximo, 3,7 unidades para 80% de área de janela na fachada e nenhum sombreamento.

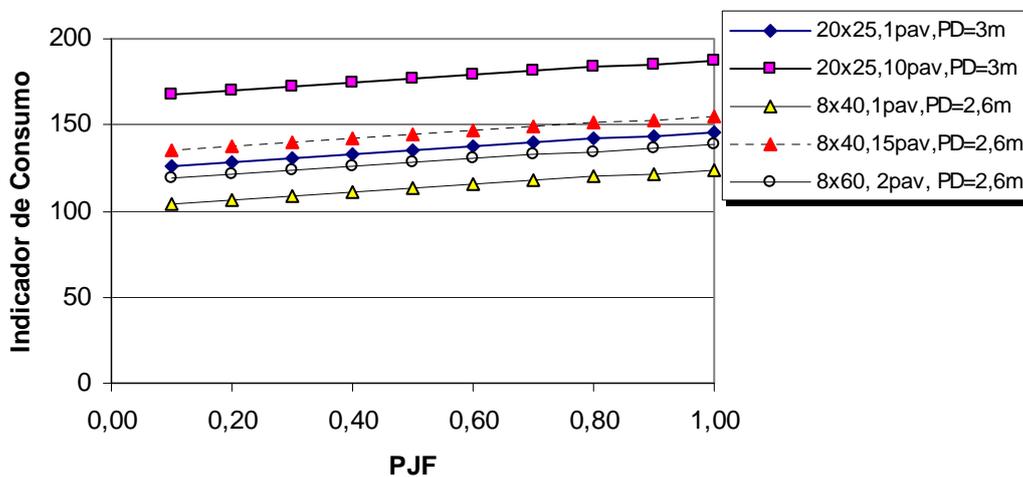


Figura 41 – Indicador de Consumo produzido pela equação para edificações com área de projeção > 500 m² em função do Percentual de área de Janela na Fachada (PJJ).

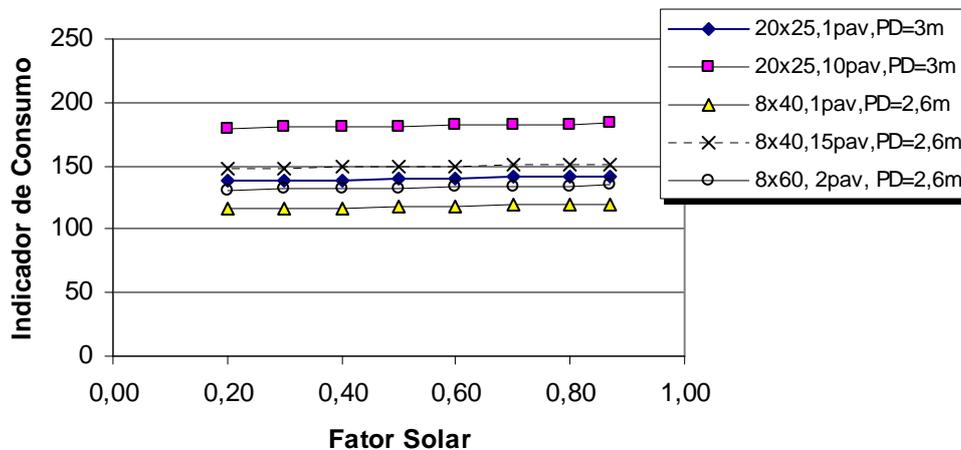


Figura 42 – Indicador de Consumo produzido pela equação em função do Fator Solar dos vidros (FS).

Proteções solares, ao contrário, apresentam redução no Indicador de Consumo devido ao aumento do sombreamento e conseqüente redução da carga térmica ao aumentar o ângulo de sombreamento em relação à janela. O AVS, Ângulo de Sombreamento Vertical presente em proteções horizontais, é mostrado na Figura 43 no eixo das abscissas e o Indicador de Consumo é mostrado no eixo das ordenadas. Há inclinação negativa para todas as edificações mostradas, com redução no indicador de 9,7 unidades ao aumentar o AVS em 45°, para 80% de PJJ e vidros claros 3mm com Fator Solar de 0,87. Igualmente, há redução no indicador quando o AHS, Ângulo de Sombreamento Horizontal da proteção solar vertical da Figura 44. Para as mesmas condições de PJJ e FS da Figura 43, a redução no Indicador de Consumo na Figura 44 é de 9,2 unidades.

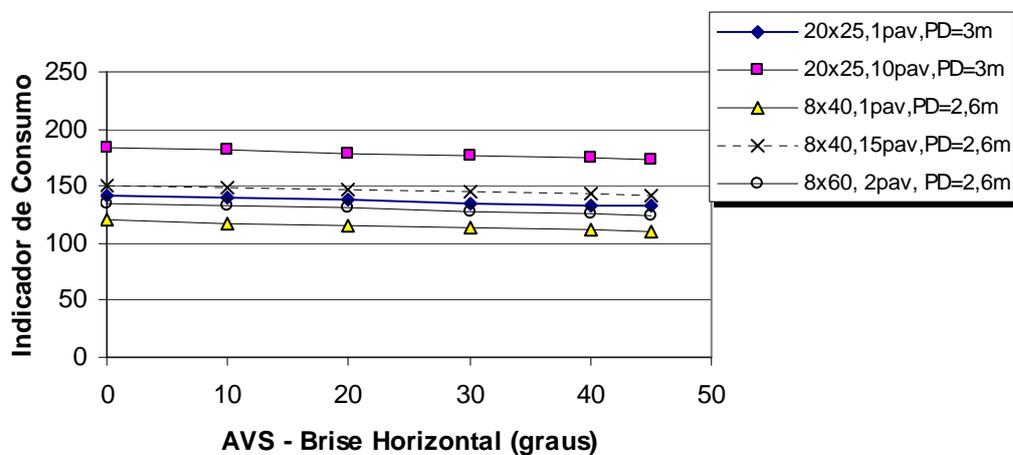


Figura 43 – Indicador de Consumo da equação para edificações com área de projeção > 500 m² em função do Ângulo Vertical de Sombreamento da proteção horizontal.

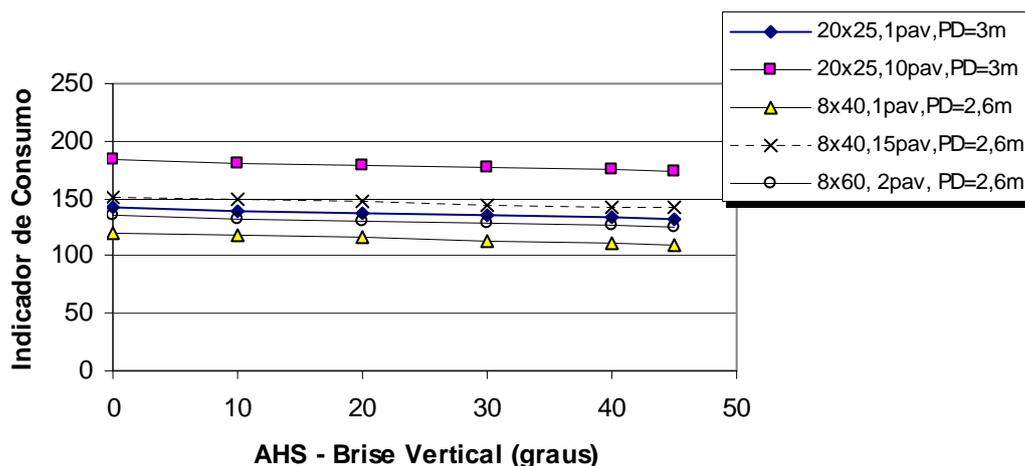


Figura 44 – Indicador de Consumo da equação para edificações com área de projeção > 500 m² em função do Ângulo Horizontal de Sombreamento da proteção vertical.

Completando as variáveis do envoltório presentes na equação, o aumento da Transmitância Térmica da cobertura de $3,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ gera um aumento no Indicador de Consumo de 7,5 unidades, como mostrado na Figura 45. Esta redução pode ser considerada pequena para a cobertura, mas deve-se lembrar que não inclui efeitos da absorvância solar, que não é uma variável da lista das Medidas de Conservação de Energia aplicadas nas simulações, tendo sido considerada 0,5 para todas as superfícies opacas. Deve-se também notar que não foi possível transferir para a equação os efeitos do número de pavimentos, resultando na mesma inclinação de reta para qualquer geometria. Considerando que as condições de conforto devem ser mantidas tanto no último pavimento como nos demais, tal limitação foi considerada aceitável, mesmo que as equações estejam voltadas para a descrição do consumo de energia. Da mesma forma, não se deve impactar a carga térmica do último pavimento simplesmente porque o consumo irá se diluir quando somado aos demais pavimentos.

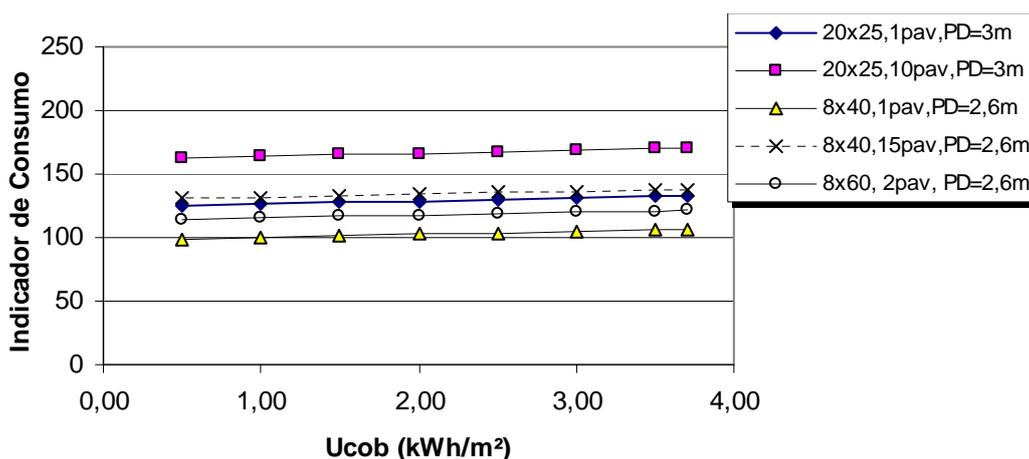


Figura 45 – Indicador de Consumo produzido pela equação para edificações com área de projeção menor que 500 m^2 em função da Transmitância Térmica da cobertura.

Tendências de aumento ou redução do Indicador de Consumo são equivalentes para as edificações com área de projeção maior que 500 m^2 , cuja eficiência do envoltório é avaliada Equação 17. Considerando parâmetros base de PJF de 50%, vidros claros 3 mm que apresentam Fator Solar de 0,87, sem sombreamento (AVS e AHS zero) e com Transmitância Térmica da cobertura de $2,00 \text{ W/m}^2\text{K}$, quando um destes é variado, tem-se:

- PJF: aumento de 10% para 100%: aumento do Indicador de Consumo de 45,7 unidades;

- FS: aumento de 0,20 para 0,87: aumento do Indicador de Consumo de 3,3 unidades;
- AVS: aumento de 0 para 45°: redução do Indicador de Consumo de 14,6 unidades;
- AHS: aumento de 0 para 45°: redução do Indicador de Consumo de 0,5 unidades;
- U_{cob} : aumento de 0,5 W/m²K para 3,7 W/m²K: aumento do Indicador de Consumo de 5,6 unidades.

Dos parâmetros acima, pode-se observar como o Ângulo Horizontal de Sombreamento, AHS, tem influência diminuta no Indicador de Consumo quando o Percentual de Área de Janela na Fachada é de 50%. No entanto, ao elevar o PJF para 100%, a redução do Indicador de Consumo passa de 0,5 unidades para 12,7. Esta mudança na relevância deste parâmetro mostra as inter-relações entre as variáveis PJF e os ângulos de sombreamento.

Este fenômeno, no entanto, não foi possível de ser modelado para o Fator Solar dos vidros, sendo sua influência no Indicador de Consumo constante para qualquer área de janela. De fato, o programa EnergyPlus não apresenta, dentre suas variáveis de entrada, o parâmetro Fator Solar de vidros. Foi necessário então utilizar dados de catálogos de fabricantes de vidros com dados de transmitâncias, absortâncias e refletâncias chamadas de “Fatores Energéticos” (em contrapartida com “Fatores Luminosos”, também presentes nos catálogos), que se acredita ser propriedades térmicas. Os Fatores Solar de vidros também são especificados, tendo sido usada esta relação. Elas não parecem, no entanto, reproduzir a contento o efeito térmico dos vidros no desempenho térmico da edificação, e esta condição se refletiu tanto nas simulações quando nas equações de consumo. Durante o desenvolvimento da equação, a tentativa de relacionar o Fator Solar com o PJF não obteve sucesso como realizado com os ângulos de sombreamento. Esta variável requer maiores estudos para que seja possível integrá-la a contento nas equações.

Da mesma forma, recomenda-se maior cuidado com a Transmitância Térmica da cobertura, como comentado. Entretanto, a complexidade da variável Transmitância Térmica da cobertura pode ser adiantada pelos estudos realizados para a Transmitância Térmica das paredes externas.

4.3.3.3. Exclusão da Transmitância Térmica das paredes

É possível perceber nas equações a ausência do parâmetro Transmitância Térmica de paredes. Os resultados das simulações de alternativas com diferentes transmitâncias térmicas nas paredes externas mostraram existir uma variabilidade que não é possível ser descrita em uma equação de regressão linear. A Transmitância Térmica de paredes é dependente de suas Capacidades Térmicas, de temperaturas internas e externas e da volumetria da edificação.

A complexidade dos resultados indicou a necessidade de se ampliar o estudo para avaliar o fenômeno perante outros climas. A Transmitância Térmica das paredes (U_{par}) foi simulada com um aumento gradual até um máximo de $3,70 \text{ Wm}^2/\text{K}$. Três atividades foram utilizadas - hotéis, grandes escritórios e escritórios verticais - para verificar o desempenho da edificação perante alterações da Transmitância Térmica em uma cidade de 7 das 8 zonas bioclimáticas existentes no Brasil⁶: Curitiba (ZB 8), Santa Maria (ZB 2), Florianópolis (ZB 3), Brasília (ZB 4), Campo Grande (ZB 6), Cuiabá (ZB 7) e Salvador (ZB 8). São mostrados resultados dos extremos: Curitiba (ZB 1) e Salvador (ZB 8).

Na Figura 46, é percebido que um aumento na U_{par} gera um aumento no consumo de energia elétrica quando as cargas internas são baixas, e uma redução quando as cargas internas são elevadas⁷. É importante enfatizar que a curva de consumo decresce com o aumento da U_{par} das paredes independentemente da Capacidade Térmica ou das cargas internas em qualquer outra das volumetrias/atividades simuladas em Curitiba (Figura 47). Por outro lado, o fenômeno da Figura 46 ocorre com qualquer Capacidade Térmica nas alternativas dos hotéis em Curitiba. Assim, pode-se afirmar que a combinação de uma volumetria específica, de uma carga interna e de temperaturas externas gerou alterações na tendência da curva de consumo, sendo que a Capacidade Térmica não influenciou o fenômeno.

⁶ Não há, até o momento, arquivo climático representando as condições de uma cidade pertencente à Zona Bioclimática 5.

⁷ O edifício tende a perder parte de sua carga térmica pelo envoltório quando as cargas internas são elevadas e o ambiente externo tem temperaturas mais baixas que o ambiente interno, daí o aumento da transmitância térmica ser benéfico em climas frios.

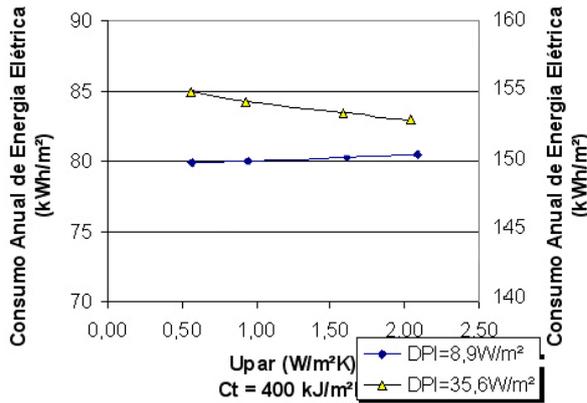


Figura 46 – Consumo anual de energia elétrica pela área (kWh/m²) para alternativas dos hotéis, simuladas em Curitiba, em função da U_{par} com uma Capacidade Térmica de 400 kJ/m²K.

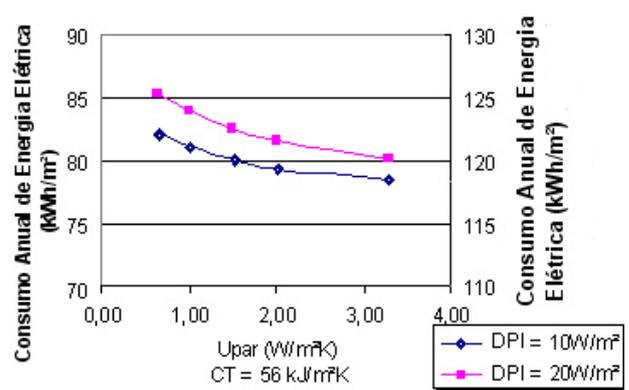


Figura 47 – Consumo anual de energia elétrica pela área (kWh/m²) para alternativas dos grandes escritórios, simuladas em Curitiba, em função da U_{par} com uma Capacidade Térmica de 100 kJ/m²K.

Entretanto, o impacto da Capacidade Térmica foi observado em outras situações. A tendência do consumo na Figura 46, com hotéis, é distinta da tendência ocorrida nas alternativas de escritórios verticais (Figura 48) e de hotéis localizados em climas quentes como Salvador. A Figura 48 apresenta o impacto das cargas internas na tendência da curva de consumo de escritórios verticais, onde a Capacidade Térmica das paredes externas é baixa. Nas alternativas de hotéis, por outro lado, o consumo anual de energia elétrica é crescente com o aumento da Transmitância Térmica não importa a Capacidade Térmica ou as cargas internas (Figura 49). Portanto, pode-se afirmar agora que a Capacidade Térmica pode apresentar impacto na tendência do consumo anual de energia elétrica para uma volumetria e carga interna específicas. Esta volumetria refere-se a pequenas edificações, desde que localizadas em climas de temperatura elevada.

Apesar desta análise, estes fatores devem ser avaliados com maior profundidade para alcançar resultados mais consistentes. Neste estudo, a análise mostrou a complexidade da relação entre o consumo anual de energia elétrica e da Transmitância Térmica de paredes externas, apontando para as limitações de representatividade da equação para descrever fenômenos complexos e não lineares. Desta forma, a Transmitância Térmica das paredes externas foi excluída das equações apresentadas no início deste item 4.3.3, de desenvolvimento da equação para avaliação da eficiência.

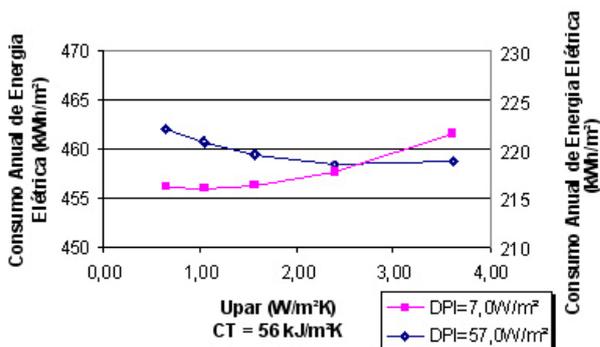


Figura 48 – Consumo anual de energia elétrica pela área (kWh/m²) para alternativas dos escritórios verticais, simuladas em Salvador, em função da U_{par} com uma Capacidade Térmica de 56 kJ/m²K.

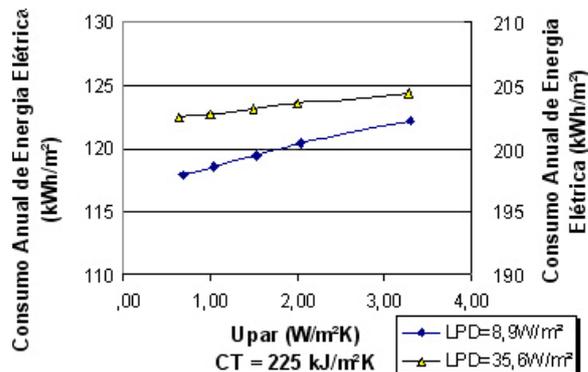


Figura 49 – Consumo anual de energia elétrica pela área (kWh/m²) para alternativas dos hotéis, simuladas em Salvador, em função da U_{par} com uma Capacidade Térmica de 225 kJ/m²K.

4.3.4. Análise de Custos

As equações de avaliação da eficiência do envoltório permitiram a rápida previsão do consumo das alternativas geradas a partir dos protótipos ineficientes⁸. Foram usados quatro indicadores para avaliação, sendo três deles indicadores envolvidos com custos de construção e consumo de energia elétrica: o Indicador de Consumo em si, IC, o Custo da Energia Conservada (CEC), o Custo no Ciclo de Vida (CCV) e o pay-back simples. Para avaliar estes indicadores econômicos, foi usado ainda um quarto indicador, a Taxa Interna de Retorno (TIR).

A Tabela 1 do Anexo 4 apresenta as características do envoltório das alternativas testadas e o seu consumo anual médio de energia elétrica estimado através das equações do item 4.3.3, para uma Densidade de Carga Interna de 25 W/m² e 11 horas de uso. Os custos envolvidos são apresentados na Tabela 2 do Anexo 4.

Os indicadores de custos das alternativas analisadas são mostrados na Tabela 23: o Indicador de Consumo representando o consumo anual de eletricidade, o Custo da Energia Conservada (CEC), o Pay-back, o Custo do Ciclo de Vida (CCV) e a Taxa Interna de Retorno (TIR). São 65 alternativas dos protótipos do levantamento in loco,

⁸ Não é recomendável utilizar o Indicador de Consumo como consumo de energia. Mas como este exemplo necessita de edificações de diferentes volumetrias com as demais características primárias idênticas e as edificações apresentadas neste item são as alternativas simuladas para desenvolvimento das equações de predição do IC, o método foi considerado válido somente para este exemplo. Assim, todas as alternativas listadas possuem DCI de 25 W/m² e 11 horas de uso, considerando também um sistema de condicionador de ar eficiente.

sendo que a edificação vertical teórica de escritórios não está incluída. Todas as alternativas estão identificadas pelas iniciais de suas atividades comerciais e numeradas. Os códigos dos identificadores são:

- GE, grandes escritórios;
- GL, grandes lojas;
- PL, pequenas lojas;
- PE, pequenos escritórios;
- HO, hotéis.

Para cada atividade, o número 1 indica o caso base ineficiente, marcado na tabela com um asterisco. Sendo o caso base aquele através do qual as demais alternativas são comparadas, estes protótipos não possuem CEC, Pay-back ou TIR. Para estes, somente o Indicador de Consumo e o Custo do Ciclo de Vida estão presentes na tabela.

A seleção destas alternativas foi realizada através de sua viabilidade aplicando-se o CEC. Em outras palavras, não são considerados CEC acima do valor estabelecido neste trabalho para a tarifa comercial de energia elétrica, de R\$ 0,33/kWh. Neste intervalo estão incluídos CEC próximos de zero, considerados zero na tabela devido ao uso de até 2 casas decimais para este indicador. São alternativas de elevada viabilidade econômica de acordo com este indicador: PE4 (R\$ 0,001/kWh), PE14 (R\$ 0,003/kWh) e PL6 (R\$ 0,002/kWh).

O mesmo ocorre para alternativas em que o Pay-back é próximo de zero. Ou seja, o investimento traz retorno quase imediato, e ocorre na alternativa PE4. Alternativas com Pay-back menores que 1 ano indicam retorno no primeiro ano de investimento. Estas são: GE14, PE4, PE6, PE11, PE14, GL9, PL5, PL6, PL12, HO3, HO4, HO8 e HO13.

Há também Taxas Internas de Retorno (TIR) inexistentes na Tabela 23. Elas ocorrem em alternativas em que os custos de substituição da MCE somados aos custos do consumo de energia no ano zero são negativos. Ou seja, é mais vantajoso construir a edificação com tais MCE, pois o retorno ocorrerá no 1º ano. O cálculo para valor presente zero torna-se inviável pois não há custo envolvido, somente benefício. Por conseguinte, a TIR tende ao infinito. Da mesma forma, percebe-se que todas as

alternativas⁹ cuja TIR é ausente na tabela apresentam Pay-back menor ou igual a 1 ano. As alternativas com TIR tendendo ao infinito são GE3, GE14, PE4, PE6, PE11, PE14, PE16, GL9, PL5, PL6, PL12, HO3, HO4, HO8 e HO13.

Tabela 23 – Indicadores de custos para as alternativas analisadas.

ID	Indicador de Consumo	CEC (R\$/kWh)	Pay-back (anos)	CCV (R\$/m ² /ano)	TIR (%)
GE1*	132	-		35,7	-
GE2	122	0,18	3,2	34,1	54
GE3	118	0,05	1,0	33,1	-
GE4	121	0,31	5,5	34,2	29
GE5	116	0,10	1,9	33,0	128
GE6	115	0,06	1,1	32,5	831
GE7	116	0,18	3,2	33,1	54
GE8	124	0,17	2,9	34,5	60
GE9	127	0,24	4,3	35,0	38
GE10	123	0,24	4,3	34,4	38
GE11	113	0,11	1,9	32,5	125
GE12	116	0,17	3,1	33,1	57
GE13	128	1,45	13,9	35,6	13
GE14	125	0,05	0,8	34,5	-
PE1*	152	-	-	51,4	-
PE2	145	0,20	8,0	50,6	21
PE3	142	0,08	3,1	49,7	56
PE4	137	0,00	0,04	48,5	-
PE5	144	0,06	2,3	50,0	89

⁹ Excetuam-se os casos-base.

PE6	141	0,01	0,5	49,2	-
PE7	140	0,26	10,5	50,4	16
PE8	135	0,06	2,5	48,6	75
PE9	135	0,05	2,1	48,4	103
PE10	131	0,05	1,8	47,6	140
PE11	150	0,01	0,6	51,0	-
PE12	129	0,03	1,2	47,3	508
PE13	138	0,23	9,1	50,0	18
PE14	136	0,00	0,1	48,2	-
PE15	136	0,17	6,7	49,4	24
PE16	132	0,03	1,0	47,6	-
GL1*	152	-	-	46,1	-
GL2	131	0,17	4,9	43,0	33
GL3	138	0,12	3,7	43,9	45
GL4	141	0,11	3,2	44,3	54
GL5	131	0,06	1,6	42,3	172
GL6	125	0,05	1,4	41,1	279
GL7	123	0,08	2,2	41,0	94
GL8	121	0,04	1,1	40,3	1084
GL9	112	0,02	0,9	38,5	-
GL10	129	0,32	8,0	41,8	20
PL1*	121	-	-	46,3	-
PL2	111	0,20	5,7	45,0	28
PL3	108	0,05	1,5	43,9	211

PL4	115	0,25	7,2	45,6	23
PL5	110	0,03	0,7	44,2	-
PL6	105	0,00	0,1	43,1	-
PL7	106	0,34	9,7	44,9	17
PL8	102	0,04	1,2	42,8	656
PL9	100	0,06	1,6	42,5	195
PL10	106	0,12	3,6	43,9	47
PL11	104	0,34	7,3	44,3	22
PL12	102	0,02	0,5	42,7	-
HO1*	127	-	-	43,8	-
HO2	115	0,11	2,0	41,7	108
HO3	105	0,03	0,5	39,6	-
HO4	114	0,03	0,5	41,3	-
HO5	103	0,12	2,2	39,6	92
HO6	92	0,11	2,0	37,6	114
HO7	115	0,18	3,1	41,8	57
HO8	105	0,04	0,7	39,6	-
HO9	94	0,20	3,6	38,6	46
HO10	105	0,20	3,7	40,3	45
HO11	106	0,13	2,3	40,2	85
HO12	104	0,12	2,1	39,8	100
HO13	93	0,02	0,4	37,2	-

A relação entre estes indicadores é visualizada quando eles são comparados dois a dois a fim de verificar os seus potenciais em relação ao consumo de energia, além de identificar se estes indicadores apresentam correlações entre si.

As Figuras 50 a 53 apresentam, respectivamente, as relações entre o Custo da Energia Conservada (CEC), o Pay-back, a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Custo do Ciclo de Vida (CCV), cada qual com o consumo de energia de cada alternativa da Tabela 23. Pelas figuras, percebe-se que, enquanto não se obtém qualquer correlação entre o CEC (Figura 50), o Pay-back (Figura 51) e a TIR (Figura 52) com os consumos anuais de eletricidade, há uma relação linear entre o Custo do Ciclo de Vida e o consumo anual de energia (Figura 53).

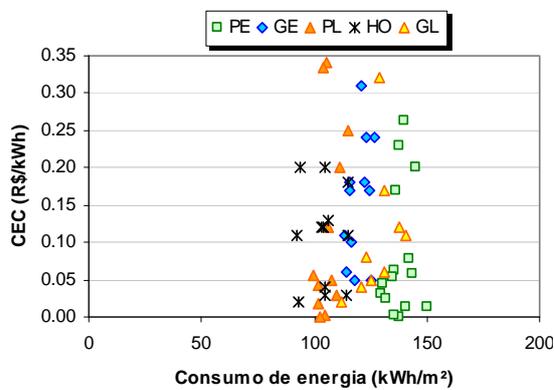


Figura 50 – Custo da Energia Conservada (CEC, R\$/kWh) em função do Consumo de Energia (kWh/m²).

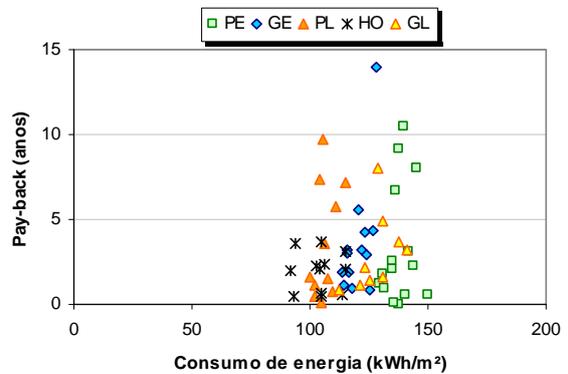


Figura 51 – Pay-back (anos) em função do Consumo de Energia (kWh/m²).

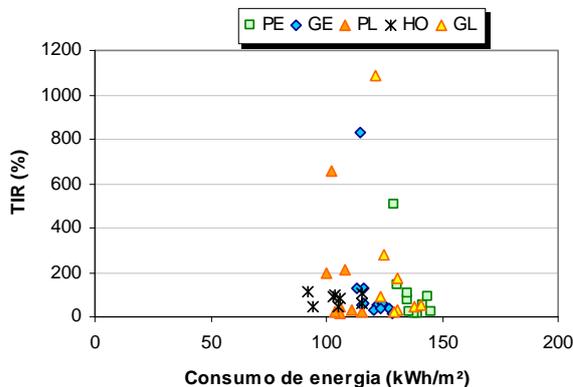


Figura 52 – Taxa Interna de Retorno (%) em função do Consumo de Energia (kWh/m²).

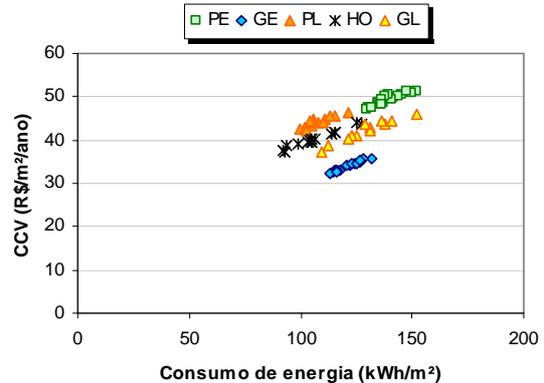


Figura 53 – Custo do Ciclo de Vida (CCV, R\$/m²/ano) em função do Consumo de Energia (kWh/m²).

A Figura 53 mostra, além da linearidade do indicador, uma tendência de inclinação das retas, independente da atividade comercial. Esta inclinação depende de fatores como o valor da tarifa de energia e de seu índice de reajuste, e independe do tipo de edificação ou da Medida de Conservação de Energia aplicada. Estes dois últimos fatores estão presentes no posicionamento das alternativas no gráfico. Em outras palavras, um mesmo tipo de edificação agrupa suas alternativas em um intervalo de consumo e de CCV e, dentro destes intervalos, a dispersão se diferencia pela MCE utilizada. Esta dispersão tende a uma reta cuja inclinação está diretamente ligada à tarifa de energia adotada. Deve-se lembrar que não estão incluídos nesta relação outros custos da edificação, como manutenção.

Voltando aos parâmetros anteriores, CEC, Pay-back e TIR, foi possível encontrar correlações entre eles. A Figura 54 mostra a linearidade entre o Custo da Energia Conservada (CEC) e o Pay-back, enquanto as Figuras 55 e 56 mostram, respectivamente, correlações entre o CEC e a TIR e entre a TIR e o Pay-back.

Na Figura 54, é possível visualizar as diferenças entre cada atividade na relação entre o CEC e o Pay-back. Cada atividade apresenta uma inclinação distinta, porém linear e diretamente proporcional.

A mesma diferenciação entre as alternativas de mesma atividade ocorre na Figura 55, entre o CEC e a TIR. As curvas são semelhantes, porém diferenciadas para cada atividade, ou seja, para cada tipo de edificação. Estes dois casos comprovam que a análise da eficiência energética é geralmente comparativa entre edifícios semelhantes, pois a volumetria pode alterar a classificação.

Já a relação entre TIR e o Pay-back na Figura 56 é idêntica para qualquer atividade, com todas as alternativas presentes em uma mesma curva. Isto significa que um investimento realizado visando a eficiência energética em uma alternativa pode ser comparado:

- com edificações de mesma volumetria, o que já se sabe;
- mas também pode ser comparado com alternativas de volumetrias distintas, desde que a Taxa Interna de Retorno seja utilizada. Neste caso, é possível realizar uma análise em um grupo de edificações não-residenciais sem diferenciação por atividades comerciais ou de serviços.

Esta correlação tem coeficiente de determinação 0,897, ou seja, sua correlação é descrita como uma equação de potência negativa, identificada como Equação 18. Vale lembrar que a equação é válida para o clima de Florianópolis, envolvendo investimentos realizados no envoltório, não tendo sido avaliada para qualquer outro caso (Figura 57).

$$TIR = 401,29.PB^{-1,5308} \quad \text{(equação 18)}$$

Onde,

TIR, Taxa Interna de Retorno em base anual (%);

PB, Pay-back (anos).

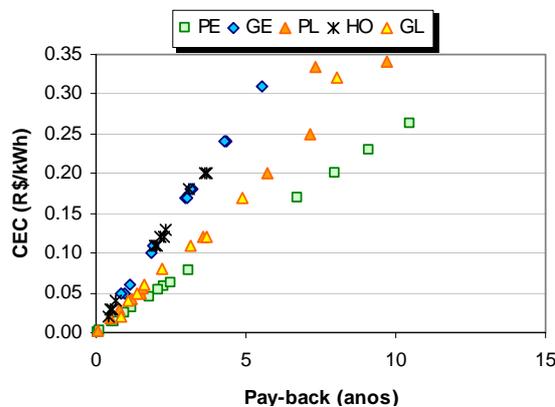


Figura 54 – Custo da Energia Conservada (CEC, R\$/kWh) em função do Pay-back (anos).

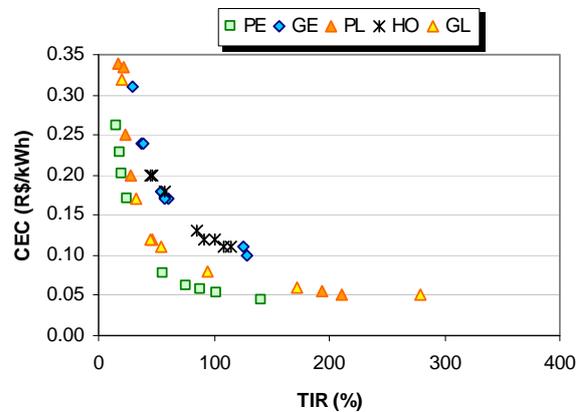


Figura 55 – Custo da Energia Conservada (CEC, R\$/kWh) em função da Taxa Interna de Retorno (TIR, %).

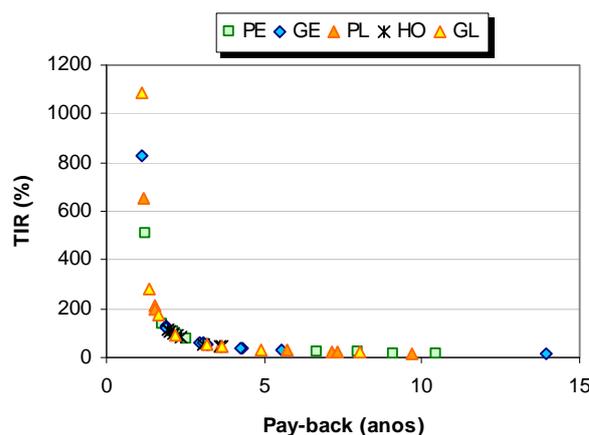


Figura 56 – Taxa Interna de Retorno (TIR, %) em função do Pay-back (anos).

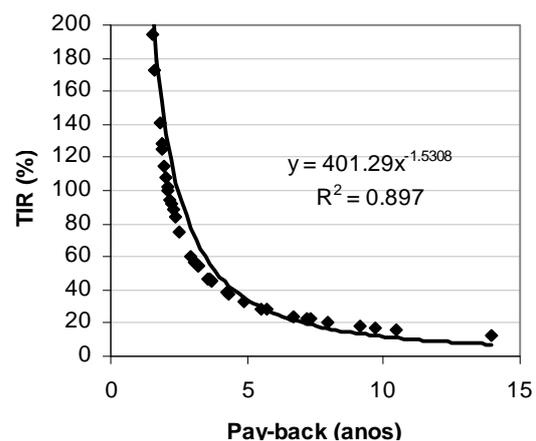


Figura 57 – Correlação entre a Taxa Interna de Retorno (TIR, %) e o Pay-back (anos) da Figura 56.

Além das figuras apresentadas, o Anexo 5 apresenta outras correlações onde nada de relevante foi concluído: CEC x CCV e Pay-back x CCV e, portanto, não foram incluídos neste documento.

4.3.5. Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento

Alternativas simuladas no Energy Plus e alternativas calculadas através da equação de predição do Indicador de Consumo foram usadas para avaliar a eficiência do envoltório. Para tanto, as alternativas de edificações já estudadas no item anterior, item 4.3.4, foram utilizadas para avaliar o Indicador de Consumo e o Pay-back x TIR. Já as simulações mostraram ser mais apropriadas para exemplificar a análise usando o Custo da Energia Conservada e o Custo do Ciclo de Vida.

4.3.5.1. Indicador de Consumo

Os indicadores de consumo dos modelos referenciais 1 e 2, menos e mais eficiente, são mostrados na Tabela 24, assim como dois casos extremos de alternativas presentes na Tabela 23: alternativas de menor e de maior Indicador de Consumo para cada atividade. As alternativas de maior IC são, na verdade, os casos-base ineficientes de cada atividade, e todos ultrapassam o IC do modelo referencial 1 (menos eficiente). Já considerando as alternativas cujo envoltório é de elevada eficiência, somente as grandes lojas não apresentaram alternativas com IC menores que as do modelo referencial 2.

Tabela 24 – Indicadores de consumo para *benchmarking* dos modelos referenciais de maior e menor eficiência e de alternativas selecionadas.

	Grandes Escritórios	Pequenos Escritórios	Grandes Lojas	Pequenas Lojas	Hotéis	Observação
Modelo 1	126	147	136	113	125	Menor eficiência
Modelo 2	116	137	109	103	99	Maior eficiência
IC máximo	132	152	152	121	127	Caso base ineficiente
IC mínimo	113	129	112	102	92	-

A Figura 58 apresenta escalas que podem ser utilizadas como o início de um *benchmarking* para estas atividades apresentadas, lembrando que:

- elas estão submetidas as condições de contorno específicas (Densidade de Carga Interna, clima, etc...) e,
- as edificações a ser avaliadas devem ter calculado o seu Indicador de Consumo usando a mesma equação.

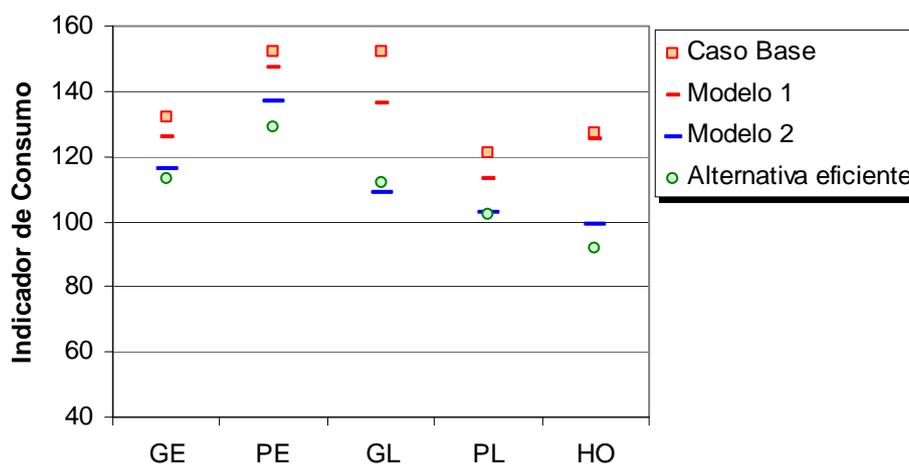


Figura 58 – Cinco escalas de *benchmarking*, cada atividade comercial separadamente, usando o Indicador de Consumo.

4.3.5.2. Custo da Energia Conservada

Embora haja uma aparente ausência de correlação entre o Custo da Energia Conservada (CEC) e o consumo de energia (mostrado no item 4.3.4 de Análise de Custos), eles permitem uma interpretação da eficiência das alternativas. O formato clássico de representação do Custo da Energia Conservada (CEC) é em função da economia de energia. A Figura 59 mostra esta relação para as alternativas obtidas com as simulações das grandes lojas.

Na Figura 59, os ciclos usados na simulação estão identificados pelas cores: azul para Ciclo 1 (C1), amarelo/vermelho para Ciclo 2 (C2) e verde para Ciclo 3 (C3). As variações de tonalidade destas cores identificam os blocos (B0, B1, B2, etc...). A linha tracejada indica o valor da tarifa de energia de R\$0,33/kWh e as setas indicam as alternativas de maior eficiência que estão abaixo do valor da tarifa. A seta azul indica a alternativa mais eficiente, a vermelha menos eficiente que a azul e a alternativa apontada pela seta verde menos eficiente que as anteriores, porém mais eficiente que as demais alternativas em verde.

uma economia pequena, ou quando é interessante investir mais, pois a economia alcançada será benéfica.

4.3.5.3. Pay-back

A relação do Pay-back com a Taxa Interna de Retorno mostrou ser a única que dispensa avaliação da eficiência comparativa com edificações de mesma volumetria. Para avaliá-las com igualdade, foram usadas as alternativas com resultados equacionados, cuja DCI é de 25 W/m² e cujo padrão de uso é de 11 horas. Pode-se calcular também usando a Equação 18, que descreve a relação entre a TIR e o Pay-back para edificações com alterações no envoltório sob o clima de Florianópolis. Inicialmente, pela Equação 18 acredita-se que é possível estabelecer uma escala de eficiência que reúne todos os tipos de edificações. Contudo, ao se identificar os Modelos 1 e 2 (modelo menos eficiente porém mais comum na paisagem urbana e o modelo mais eficiente, respectivamente), a separação por atividades comerciais torna-se explícita.

A Figura 60 mostra esta relação, onde estão identificados os Modelos 1 para cada atividade comercial com setas com suas respectivas cores. Nesta figura também está indicado, através de uma seta tracejada, o Modelo 2 dos hotéis, única atividade cuja TIR não tende ao infinito.

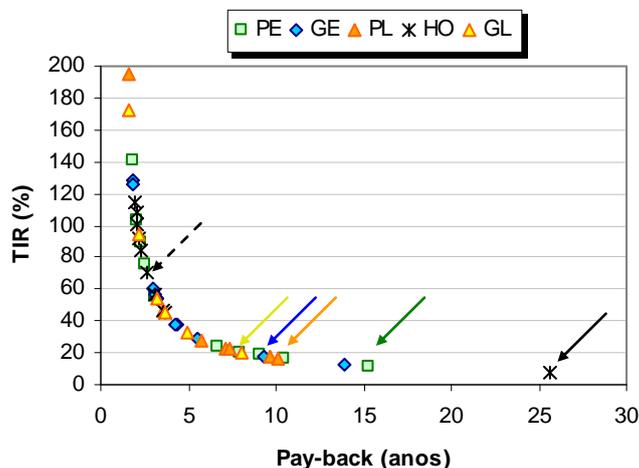


Figura 60 – Avaliação da eficiência energética de edificações usando a TIR (%) e o Pay-back (anos).

Percebe-se que, embora a relação Pay-back x TIR reúna todas as atividades em uma única curva, os modelos referenciais para tais atividades estão localizados em posições distintas. Pode-se entender assim que as escalas de eficiência dos envoltórios destas 5

atividades são também distintas, e a avaliação global independente da atividade comercial não é possível.

No entanto, os envoltórios destas edificações proporcionam desempenhos distintos de acordo com a sua volumetria¹⁰, e estes desempenhos atuam diretamente na eficiência do envoltório. Como consequência, o mesmo envoltório pode ser mais eficiente em uma edificação e menos eficiente em outra. Além disso, como os custos das MCE estão envolvidos e as volumetrias são diferentes, eles também são responsáveis pelo deslocamento destes Modelos referenciais de envoltório vistos na Figura 60¹¹.

Esta possibilidade, envoltórios idênticos aplicados em volumetrias distintas representarem eficiências proporcionais à relação envoltório x volumetria, deve ainda ser comprovada para *benchmarks* envolvendo o Pay-back e a TIR. Considerando que o consumo da edificação pela área, mesmo que simulado, depende da volumetria, ele não deve ser usado com um indicador para tal avaliação. Pay-back e TIR estão envolvidos na relação que se deseja avaliar, o que também os exclui como indicadores para esta comprovação. Como se pode observar, retornou-se ao tema inicial discutido nesta tese: o uso de indicadores adequados para avaliar a eficiência.

Restringindo esta discussão aos objetivos de comparação com os demais indicadores, pode-se afirmar que a relação Pay-back x TIR, embora interessante e com aparente potencial a ser explorado, é complexa para o momento atual e necessita aprofundamentos futuros.

4.3.5.4. Custo do Ciclo de Vida

Uma avaliação da eficiência energética do envoltório envolvendo o Custo do Ciclo de Vida (CCV) é semelhante à classificação usando o Indicador de Consumo, mas

¹⁰ O exemplo mais simples é a relação da cobertura com uma edificação de 1 pavimento e com uma edificação de 10 pavimentos.

¹¹ Resta saber, qual o interesse em avaliar envoltórios de edificações distintas quando os custos de construção estão envolvidos? Custos de instalação distintos, provenientes de quantitativos distintos, já invalidariam uma comparação. No entanto, a construção de um *benchmarking* global para edificações comerciais envolvendo a TIR poderia ser realizada com diversas edificações de forma a avaliar a tendência geral de investimentos em MCE. Esta possibilidade é avançada para o estágio atual da construção civil brasileira, onde os poucos levantamentos de características de edificações comerciais são ainda incipientes.

envolvendo custos com a energia em um período de 30 anos. A Figura 61 apresenta os CCV das grandes lojas para os Modelos 1 e 2, para o caso base ineficiente (GL1) e para as alternativas GL2 a GL10, exceto GL9¹², presentes no Anexo 4. Todos os CCV apresentados foram calculados com resultados das simulações, visto que as correlações mostraram que os CCV devem ser comparados dentre as alternativas de mesma atividade comercial.

Nela, percebe-se que há um CCV maior que o Modelo 1, que é o CCV do caso base ineficiente. Há também uma alternativa cujo CCV é menor que o do Modelo 2, considerada então economicamente mais benéfica ao longo da vida útil da edificação (PJF 35%, FS 0,22, AVS 35° e U_{cob} de 0,7 W/m²K).

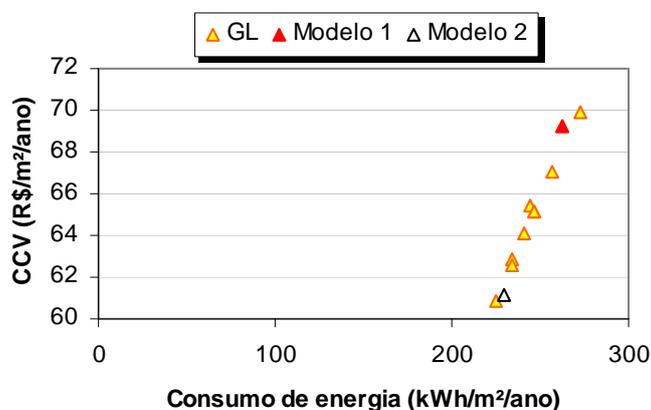


Figura 61 – Escala de benchmarking para as grandes lojas usando o CCV.

O CCV pode ser correlacionado ao consumo de energia elétrica da edificação, fornecendo uma informação adicional para a tomada de decisões. Um *benchmarking* baseado no CCV é mais completo que um *benchmarking* usando o Indicador de Consumo, mas é também mais complexo visto que exige o cálculo de todos os custos ao longo da vida útil, iniciando-se pela construção da edificação.

4.3.5.5 Avaliação Final dos Indicadores

O critério de avaliação a ser escolhido depende das prioridades referentes à eficiência do envoltório. Embora tenham bases semelhantes, consumo de eletricidade no caso do Indicador de Consumo ou custos de construção e de consumo nos demais, o cálculo de todos os indicadores exige a coleta de outros parâmetros (correção da tarifa de energia

¹² A alternativa GL9 não foi simulada, devido ao método de simulação que otimizou a combinação de Medidas de Conservação de Energia, MCE, em função do Custo da Energia Conservada, CEC.

elétrica, taxa de desconto para materiais da construção civil, inflação). Como cada indicador produz resultados distintos, estes devem ser utilizados em conformidade com o tipo de avaliação que se deseja.

O Indicador de Consumo é o mais simples, mas avalia somente a quantidade de energia. É um critério de maior interesse do poder público por impactar a geração e distribuição da energia elétrica. O uso através das equações é limitado, mas mesmo o uso do consumo de energia não reflete a eficiência em si, pois a avaliação deve ser comparativa para edificações com características globais semelhantes.

O Custo da Energia Conservada avalia a intervenção no envoltório e indica um benefício médio anual baseado em um período de tempo mais longo, e pode ser avaliado junto ao potencial de economia de energia da medida. Tendo-se o consumo de energia, é um indicador de cálculo rápido, exigindo apenas a definição de uma taxa de desconto para cálculo ao longo do período.

O Pay-back x TIR prioriza os interesses de um investidor ao indicar o retorno a ser alcançado. Pode vir a ser usado em edificações distintas, como discutido, desde que o tema seja aprofundado e a validade da comparação entre envoltórios de edificações com volumetrias distintas seja comprovada. Neste caso, o Pay-back pode ser um indicador de simples cálculo e de adequado uso para *benchmarking*, mesmo que priorize interesses de investidores.

E, finalmente, o Custo do Ciclo de Vida fornece uma classificação da eficiência que beneficia o consumidor ao longo prazo. É bastante completo, podendo envolver diversos custos da edificação de acordo com o interesse do avaliador. É, no entanto, de estimativa complexa, e passível de incertezas por necessitar de índices futuros como reajuste de tarifa de energia elétrica.

Enfim, para uma avaliação geral da eficiência energética do envoltório recomenda-se o uso do Custo da Energia Conservada, CEC, como indicador do nível eficiência. Tal recomendação baseia-se na sua facilidade de cálculo e obtenção de dados. Além disso, envolve períodos de tempo, mas indica um resultado anual de forma a se ter noção dos resultados imediatos aproximados, sendo ainda avaliado em conjunto com o potencial de economia das medidas de eficiência aplicadas no envoltório. E, concluindo, como nenhum indicador mostrou plena independência em relação à volumetria, cargas

internas e demais características das edificações, a restrição ao uso do CEC para avaliar a eficiência é a mesma realizada para os demais indicadores.

4.4. Considerações finais

Das características primárias analisadas, percebeu-se que as cargas internas não alteram diretamente o impacto do envoltório no consumo de energia. Posteriormente, percebeu-se uma influência das cargas internas na Transmitância Térmica das paredes externas, juntamente com o clima, a Capacidade Térmica e a volumetria da edificação. O sistema de condicionamento de ar também não altera o impacto do envoltório no consumo de energia elétrica, enquanto a orientação solar da edificação apresenta influência menor no consumo, porém constante, alterando-se somente quando variáveis referentes às aberturas são modificadas.

A volumetria da edificação alterou significativamente o consumo de energia pela área, com menores consumos pela área para grandes edificações e maiores consumos para pequenas edificações. Edificações médias, bastante comuns na paisagem urbana, apresentam maior variação. Esta variação depende do clima, cargas internas e, principalmente, com a eficiência do condicionador de ar, que tende a mascarar os impactos da volumetria no consumo. Percebeu-se também uma tendência irregular no consumo pela área quando alterado o número de pavimentos. As simulações indicaram que as variáveis Densidade de Carga Interna e clima geraram consumos crescentes para até 2 pavimentos, tornando-se decrescentes até cinco pavimentos e, posteriormente, estabilizando-se.

Conhecendo estas tendências, a simulação das Medidas de Conservação de Energia mostrou que o Percentual de Área de Janela na Fachada é a MCE de maior relevância para o consumo de energia elétrica, seguido das proteções solares. A ordem de implementação das MCE, quando avaliada pelo Custo da Energia Conservada, pode ser alterar, assim como pode ser interrompida sem que todas as medidas tenham sido implementadas. Vale lembrar que o valor da tarifa de R\$ 0,33/kWh é uma média para Florianópolis, baseada no mercado local. Outros limites podem ser estabelecidos de acordo com os objetivos da análise de custos. O CEC também pode ser usado para avaliar outras medidas, até de outra natureza além do envoltório.

A regressão multivariada para estimar o consumo de energia resultou em duas equações de acordo com as dimensões da edificação: área de projeção maior e menor que 500 m².

Foram encontradas diversas limitações nas equações, recomendando-se então que sejam utilizadas para avaliar somente o envoltório através de um resultado entendido como Indicador de Consumo, IC, e não como o consumo de eletricidade pela área. Ainda, as equações são válidas para Fatores de Forma (A_{env}/V) menores que 0,73 para edifícios cuja área de projeção é menor que 500 m² e maiores que 0,15 para edifícios com área de projeção maior que 500 m². Tais limites dos Fatores de Forma poderiam ter sido evitados com uma amostra mais ampla dos protótipos simulados. Na verdade, ao focar as simulações nos casos mais representativos, focou-se nas médias amostradas e as características extremas da volumetria foram excluídas da avaliação. Como consequência, a abrangência de aplicação das equações foi reduzida. De fato, edifícios teóricos pouco comuns na paisagem urbana poderiam ter sido utilizados como modelos para geração de protótipos e, mesmo com a possibilidade de se obter mais de duas equações, os resultados poderiam ser mais apropriados para descrever a volumetria.

As variações do Indicador de Consumo em função das MCE ao usar as equações podem chegar a 20 e a 45 unidades para o PJF – $A_{proj} < 500 \text{ m}^2$ e $A_{proj} > 500 \text{ m}^2$, respectivamente. Os ângulos de sombreamento alteram o Indicador de Consumo em até 15 unidades, aproximadamente, e a Transmitância Térmica da cobertura pode elevar o IC em cerca de 7, 5 unidades. O Fator Solar foi a variável presente na equação que apresentou menores variações provenientes da simulação no programa Energy Plus. O formato dos dados de entrada para vidros no programa Energy Plus e as propriedades térmicas apresentadas pelos catálogos de fabricantes de vidro não foram compatíveis com os resultados do consumo de energia. Em consequência, as equações de regressão linear multivariada não foram capazes de reproduzir as variações encontradas nas simulações. Maiores estudos devem ser realizados para integrar a variável aos demais resultados de forma a realizar melhorias futuras nas equações.

A avaliação da eficiência energética do envoltório pode ser realizada usando o Indicador de Consumo para uma edificação com três diferentes envoltórios. Duas propostas como modelos referenciais para uma outra a ser analisada. Através delas, pode-se estabelecer *benchmarks* a fim de comparar a eficiência do envoltório proposto à eficiência dos modelos referenciais.

Além do Indicador de Consumo, é possível avaliar a eficiência do envoltório combinando-a com os custos envolvidos em promover a eficiência energética. Dentre os indicadores de custos avaliados, Custo da Energia Conservada, Pay-back e Custo do

Ciclo de Vida, concluiu-se que o primeiro é mais recomendável. O Pay-back, relacionado à Taxa Interna de Retorno de um investimento em uma ou mais MCE, apresentou inicialmente um potencial interessante para avaliar qualquer tipo de edificação comercial, independente de sua volumetria. Posteriormente, percebeu-se que necessita de maiores estudos para confirmar este potencial. O Custo do Ciclo de Vida é um indicador interessante que dispensa um caso base para realizar uma avaliação de eficiência energética, mas é também de estimativa mais complexa e apresenta maiores incertezas que o Custo da Energia Conservada, CEC. Este, por sua vez, possibilita uma estimativa rápida e fornece informações mais completas por ser analisado junto com a economia de eletricidade que a Medida de Conservação de Energia proporciona. Vale também lembrar que cada indicador foca um aspecto diferente na análise: enquanto o Indicador de Consumo, ou o próprio consumo quando simulado, gera benefícios diretos para a sociedade ao indicar a economia de energia que pode ser alcançada, o CEC combina este benefício aos benefícios financeiros que o investidor poderá ter após o melhoramento do envoltório. Já o Pay-back foca os benefícios diretos do investidor a curto prazo, enquanto o CCV expande a análise para a vida útil da edificação envolvendo outros custos, como os de manutenção.

Embora o desenvolvimento das equações seja voltado para edificações condicionadas, a metodologia pode também ser válida para edificações não condicionadas visto que o consumo de energia é o reflexo da carga térmica interna do ambiente, que pode descrever as relações de conforto existentes no ambiente. Entretanto, os benefícios de conforto não se refletem nos benefícios descritos pelos Indicadores de Custos. A avaliação, neste caso, é restrita ao Indicador de Consumo, ou deve ser complementada com benefícios descritos sob um outro enfoque, como uma relação entre indicadores de conforto e indicadores de custos.

Por fim, pode-se concluir que a análise da eficiência do envoltório deve ainda ser realizada para um grupo específico de edificações, como os de mesma atividade e de mesma volumetria. Através do Indicador de Consumo, foi possível padronizar algumas características primárias para uso em qualquer tipo de edificação, como Densidade de Carga Interna, padrão de uso e eficiência do condicionador de ar. Entretanto, a volumetria é ainda parâmetro limitador da análise da eficiência do envoltório, que deve ser realizada comparativamente com envoltórios de edificações com volumetrias equivalentes.

CAPÍTULO 5. CONCLUSÃO

CAPÍTULO 5. CONCLUSÃO

A Vertente 4 do Programa Procel – Edifica, de Regulamentação e Legislação, foi a principal motivação para o desenvolvimento da análise da eficiência energética do envoltório das edificações. O envoltório é uma das parcelas avaliadas para determinação da eficiência energética da edificação, e merece destaque mesmo quando a edificação não é condicionada.

Há duas questões chave na análise da eficiência de uma edificação. Qual indicador utilizar e como realizar a avaliação. O conjunto de características que a edificação possui define a eficiência, e em geral utiliza-se o consumo de eletricidade pela área como indicador da eficiência relativa ao consumo de eletricidade de outra edificação. Esta segunda edificação deve apresentar diversas características em comum com a primeira a fim de possibilitar a comparação. Como as atividades comerciais tendem a uniformizar alguns parâmetros relacionados ao consumo, como cargas internas ou horas de uso, a avaliação comparativa através de edificações comerciais ou institucionais de mesma atividade é comum em diversos países. Dados consolidados destas edificações formam sistemas de avaliação com marcos referenciais de consumo, chamados *benchmarkings*.

Por não existir dados consolidados acerca de edificações comerciais e institucionais no Brasil, foi necessário realizar um estudo de campo para sanar esta lacuna. As características externas de edificações de sete atividades comerciais e institucionais foram investigadas em cinco capitais brasileiras através de um levantamento fotográfico. O número ideal de amostras, um para cada atividade comercial ou institucional, seria inviável. Assim, foi estabelecida uma amostra mínima de 100 edificações por cidade, que não foi alcançada somente em Salvador. As atividades de escritórios, hospitais/clínicas, lojas, supermercados, restaurantes, escolas e hotéis/pousadas foram fotografadas sob o critério de que cada edificação abrigasse exclusivamente uma destas atividades em suas instalações, excluindo edificações de usos mistos. As 1103 amostras obtidas forneceram dados de área de janelas, tipo de vidro, existência de dimensões de proteções solares, proporção das menores fachadas em relação às maiores, número de pavimentos e forma. As proporções das edificações permitiram identificar 5 volumetrias mais comuns que foram relacionadas às atividades

de grandes e pequenos escritórios, grandes e pequenas lojas e a hotéis¹³. Estas volumetrias foram utilizadas para a classificação geral das demais características. Os dados mais frequentes encontrados foram utilizados para a criação de modelos representando as atividades contempladas. Posteriormente uma sexta volumetria foi desenvolvida, escritórios verticais, para sanar uma lacuna na representatividade da volumetria como variável para o desenvolvimento de equações de predição do consumo.

Em seguida, os modelos foram ajustados para a formação de protótipos representativos para a simulação computacional. Como os modelos continham dados que não possibilitariam uma interpretação geral de certas medidas, como área de janelas distintas em cada fachada ou o uso de sistemas de condicionamento de ar distintos em cada edificação, estes e outros dados foram uniformizados. As 4 fachadas de cada modelo passaram a conter percentuais de área equivalentes; os protótipos passaram a conter um mesmo tipo de sistema de condicionamento de ar, de janela e as orientações originais foram abandonadas e os protótipos foram simulados com as maiores fachadas voltadas a Norte-Sul ou a Leste-Oeste. Além dos protótipos representativos, foram criados protótipos com seus envoltórios ineficientes baseando-se nos dados encontrados no estudo de campo.

Dois tipos de simulações foram executados. Os primeiros focaram características primárias, que impactam consideravelmente o consumo de energia elétrica. Estas foram avaliadas devido à possibilidade de alteração dos impactos do envoltório no consumo de energia. Elas são a Densidade de Carga Interna, DCI, a orientação solar da edificação, a eficiência do sistema de condicionamento de ar e a volumetria das edificações, entendida como Fator de Forma (A_{env}/V) e Fator Altura (A_{cob}/A_{tot}). Percebeu-se principalmente, como a volumetria influi na alteração do consumo de eletricidade pela área. Foi também notada uma relação da volumetria com o envoltório, como no caso do número de pavimentos relacionado ao clima, às cargas internas e à área exposta da cobertura, que pode ser variável para edificações de até 5 pavimentos. A Densidade de Carga Interna e a eficiência do sistema de condicionamento de ar, entretanto, apresentam uma variação no consumo de energia que não impacta diretamente o envoltório, enquanto a orientação solar da edificação altera apenas os parâmetros relacionados às aberturas.

¹³ Apesar das edificações selecionadas serem de uso comercial, elas foram selecionadas em amostras envolvendo também edificações institucionais, sendo assim válidas para os dois casos.

O segundo tipo de simulações realizadas focou o envoltório, composto pelas características secundárias. Medidas de Conservação de Energia, MCE, foram estabelecidas a partir dos protótipos ineficientes e foram gradativamente aplicadas e estes protótipos formando alternativas de simulações com diferentes soluções para o envoltório. O critério de aplicação e simulação gradativa das MCE foi através da seleção da alternativa de menor Custo da Energia Conservada, CEC, para grupos de simulação. As Medidas de Conservação de Energia simuladas foram Percentual de Área de Janela na Fachada, Fator Solar, FS; Ângulo Vertical de Sombreamento, AVS; Ângulo Horizontal de Sombreamento, AHS; Transmitância Térmica da cobertura, U_{cob} e Transmitância Térmica das paredes externas, U_{par} . O PJF apresentou maiores benefícios para aplicação como primeira medida, devido ao baixo custo aliado ao potencial de eletricidade que economiza. Geralmente, era seguido das proteções solares, enquanto o Fator Solar e a Transmitância Térmica das paredes externas costumavam ser as últimas medidas a ser implementadas, nem sempre com benefícios econômicos. Vale observar que as simulações do Fator Solar não apresentaram resultados conclusivos, necessitando de mais investigações sobre o tema e sobre o método de simulação usando parâmetros equivalentes como dados de entrada.

Obtidos os consumos de eletricidade através de simulações, as alternativas com orientação das maiores fachadas a N-S e eficiência A do condicionador de ar foram selecionadas para o desenvolvimento de uma equação de regressão multivariada que descrevesse o consumo de energia elétrica em função de modificações no envoltório. Em adição às MCE avaliadas nas simulações, foram incluídas como variáveis a Densidade de Carga Interna, DCI, o padrão de uso em horas, o Fator de Forma (A_{env}/V) e o Fator Altura (A_{cob}/A_{tot}).

Duas equações foram desenvolvidas, para edificações com área de projeção menor e maior que 500 m², cujos coeficientes de determinação foram 0,9978 e 0,9989, respectivamente. Apesar da influência clara da volumetria, que exigiu mais de uma equação para representar o desempenho térmico de diferentes edificações, elas apresentaram outras limitações dependentes da mesma variável. Limites de Fator de Forma foram estabelecidos: 0,15 para edificações cuja área de projeção é maior que 500 m² e 0,73 para edificações cuja área de projeção é menor que 500 m². Ora, as limitações nas equações são decorrência do critério utilizado para criação dos protótipos. Ao invés de focar volumetrias médias mais comuns na paisagem urbana, o uso de alternativas

com volumetrias mais abrangentes teria ampliado a área de aplicação do Fator de Forma das edificações.

As equações são compostas das características citadas, exceto a Transmitância Térmica das paredes externas. Simulações envolvendo outros climas foram executadas e foi notado que esta variável não apresenta uma tendência que possa ser linearizada para inclusão na equação, como já notado por Signor et al. (2001). Assim, a ausência da Transmitância Térmica das paredes externas na equação de regressão é uma limitação. No entanto, foi possível identificar as variáveis que participam de alterações no impacto da Transmitância Térmica das paredes externas no consumo de energia: capacidade térmica das paredes, clima, volumetria da edificação e cargas internas.

Por fim, o Indicador de Consumo e os indicadores de custos Pay-back, Taxa Interna de Retorno, TIR, Custo da Energia Conservada, CEC e Custo do Ciclo de Vida, CCV, foram testados para a avaliação da eficiência energética do envoltório. Eles foram comparados entre si usando o Indicador de Consumo de forma que as características excluindo o envoltório e volumetria fossem idênticas. Em seguida, estes indicadores foram calculados com dados de consumo anual de energia elétrica simulados no Energy Plus ou com o Indicador de Consumo a fim de realizar a avaliação da eficiência.

As propostas de uso destes indicadores para *benchmarking* do envoltório de edificações comerciais foram realizadas com sucesso, desde que comparados com edificações cujas demais características são equivalentes. Um *benchmarking* de edificações comerciais ou institucionais por atividade ou por volumetria pode ser gradualmente desenvolvido com qualquer dos indicadores analisados iniciando-se com um pequeno número de amostras. Estas primeiras amostras são comparadas com dois envoltórios referenciais estabelecidos neste estudo (envoltório mais eficiente e envoltório mais comum na paisagem urbana) até que o sistema contenha número de amostras suficientes para representar uma população de edifícios.

As conclusões acerca da análise de custos mostrou que o Custo da Energia Conservada foi considerado o mais apropriado para uma avaliação devido à sua simplicidade aliada à interpretação que possibilita: é mais benéfico consumir a energia sem implementar Medidas de Conservação de Energia ou investir nestas medidas. O Custo do Ciclo de Vida é um indicador também interessante, sendo mais apropriado para um usuário que irá consumir a energia e arcar com os custos da edificação a longo prazo. Mas como

depende de previsões futuras, seu grau de incertezas é maior que do CEC, e ainda apresenta uma maior complexidade para sua estimativa. Ao contrário, o Pay-back é de estimativa simples, mas prioriza os interesses do investidor.

Verificou-se, no entanto, que o Pay-back apresenta um potencial para uma análise comparativa do envoltório quando aliado à Taxa Interna de Retorno. Esta análise poderá envolver diversos tipos de edificações comerciais independente das suas dimensões. No entanto, tal potencial deve ser confirmado com maiores estudos e com simulações específicas focando o tema.

Desta forma, recomenda-se um estudo mais aprofundado acerca do tema (Pay-back x TIR) como trabalhos futuros a desenvolver. Além deste, são também sugestões para trabalhos futuros:

- Realização de um levantamento consolidado de características de edificações comerciais e institucionais, incluindo características internas de uso;
- Inclusão da iluminação natural na avaliação da eficiência do envoltório;
- Investigação da relação de propriedades térmicas de vidros com parâmetros equivalentes como dados de entrada na simulação computacional;
- Desenvolvimento de equações usando protótipos cujas volumetrias sejam mais abrangentes que as utilizadas, assim como com cargas internas e padrões de uso com extremos;
- Estudo dos impactos do entorno urbano na eficiência da edificação.

Finalizando, as equações que fornecem o Indicador de Consumo são utilizadas na Regulamentação para Etiquetagem Voluntária de Nível de Eficiência Energética em Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas. Elas foram desenvolvidas para outros climas de acordo com o Zoneamento Bioclimático Brasileiro e, utilizando método de avaliação mencionado para o IC, elas fazem parte do item referente ao envoltório. A regulamentação ainda é composta pelos itens de Sistema de Iluminação e de Sistema de Condicionamento de Ar. O item do envoltório indica o seu nível de eficiência segundo os parâmetros de classificação do INMETRO, sendo o nível mais elevado eficiência A e o mais baixo, eficiência E.

Os objetivos específicos foram atendidos, com resultados parciais que fomentavam o desenvolvimento dos métodos para alcançar os objetivos seguintes. A base de dados de

características tipológicas permitiu a criação de protótipos que, simulados, geraram os dados necessários para desenvolvimento da equação de regressão. Indicadores para eficiência energética envolvendo custos foram avaliados usando a simulação e a equação, e critérios foram propostos com base nestes indicadores.

O objetivo geral de desenvolvimento da metodologia para avaliação da eficiência energética do envoltório foi também alcançado, com aplicação prática na Regulamentação para Etiquetagem Voluntária de Nível de Eficiência Energética em Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas, que entra em vigor no presente ano, 2008, em caráter voluntário e, em cinco anos, em caráter obrigatório. Espera-se que, até o ano de 2013, melhorias possam ser realizadas na metodologia de avaliação a fim de superar as limitações observadas e atualizá-la com inovações.

**REFERÊNCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**

Referências Bibliográficas

AKBARI, H., SERGEN, O., HUANG, J., HAKIM, S., RITSCHARD, R. Energy-Use Characteristics of Pakistani Prototypical Office Buildings and Single-Family Houses. Bekeley: LBNL.1990 **Technical Report**.

ASHRAE, AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. ASHRAE Standard 90.1 –1989. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 1989.

_____. **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. ASHRAE Standard 90.1 –1999. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 1999.

_____. **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. ASHRAE Standard 90.1 – 2004. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 2004.

_____. **Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs**. ASHRAE Standard 140 - 2001.140. Atlanta, 2001. 91 p.

AUSTRALIAN BUILDING CODES BOARD. **What's New**. 2004. Disponível em: <http://www.abcb.gov.au/content/whatsnew/> Acesso em 15/02/2004

BOLETIM DE CUSTOS, **Informativo Sistema Brasileiro de Custos**. Rio de Janeiro, julho de 2005. Disponível em <<http://www.informativosbc.com.br>>. Acesso de 07/07/2005 a 20/12/2006.

BRASIL. Lei n. 10295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. **Lex**: Diário Oficial da União, Brasília, 2001a. Disponível em: <www.inmetro.gov.br/qualidade/lei10295.pdf>. Acesso em: 17/03/03

_____. Decreto n. 4.059, de 19 de dezembro de 2001. Regulamenta a Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. **Lex**: Diário Oficial da União, Brasília, 2001b. Disponível em: <www.mme.gov.br/ministerio/legislacao/decretos/Decreto%20n%204.059-2001.html>. Acesso em: 17/03/03

BUILDING AUTHORITY OF HONG KONG. **Code of Practice of Overall Thermal Transfer Value in Buildings**. 1995. Disponível em: http://www.info.gov.hk/bd/english/documents/code/e_ottv.htm. Acesso em: 26/02/2004

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION STAFF. High temperatures and electricity demand: an assessment of supply adequacy in California. **Report**. Sacramento: California Energy Commission, 1999. p. 76

CALIFORNIA ENERGY COMISSION. **Energy efficiency standards for residential and nonresidential buildings**. Sacramento: California Energy Commission, 2001. p. 166

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 IBPSA Conference, **Proceedings...** Eindhoven: IBPSA. 2003. pp 131-138.

CASALS, X. G. Analysis of building energy regulations and certification in Europe: Their role, limitations and differences. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2006. v. 38, pp. 381-392

CBECS, **Commercial Buildings Energy Consumption Survey. Information on the Commercial Building Sector**. 2003 Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/emeu/cbecs/contents.html>>. Acesso em: 8 de julho de 2003.

CDM. **Executive Summary for Principal Groups A & B**, CE14/2000. Hong Kong: 2002.

CHAU, C. K., BURNETT, J., LEE, W. L. Assessing the cost effectiveness of an environmental assessment scheme. In: **Building and Environment**. Oxford: Pergamon, 2000. v. 35, pp. 307-320

CHIRARATTANANON, S., TAWEEKUN, J. A technical review of energy conservation programs for commercial and government buildings in Thailand. In: **Energy Conversion and Management**. Oxford: Pergamon, 2003. v. 44 pp. 743-762

CHUNG, W., HUI, Y. V., LAM, Y. M.. Benchmarking the energy efficiency of commercial buildings. In: **Applied Energy**. Oxford; Elsevier, 2006. V. 83, pp 1-14

COMISIÓN NACIONAL PARA EL AHORRO DE ENERGÍA. **Eficiencia energetica integral em edificios no residenciales - NOM-008-ENER**. Cidade do México: Secretaria de Energia, 1995.

_____. **Eficiencia energetica integral em edificios no residenciales - NOM-008-ENER**. Cidade do México: Secretaria de Energia, 2001.

COMISSÃO EUROPEIA. **Energia para o Futuro: Fontes de energia renováveis – Livro Branco para uma Estratégia e um Plano de Ação Comunitários**. 1998, 599 p.

CONSTRUÇÃO MERCADO. São Paulo: Editora PINI, n. 48, jul. 2005.

COPEL. Projeto 5.1.3: Curva de carga de consumidores e sua influência os alimentadores de distribuição. **Relatório** do Desenvolvimento do Projeto na Área da Rede Subterrânea de Curitiba. 1990

CÓRDOBA, J., MACÍAS, M., ESPINOSA, J. M. Study of the potential savings on energy demand and HVAC energy consumption by using coated glazing for office buildings in Madrid. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 1998. v. 27 pp 13-19

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.

_____. Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil: Pesquisa na Classe de Prédios Públicos. **Procel**: 2007b. Disponível em: www.eletrobras.com/pci. Acesso em: 17/01/2008.

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

DEPECKER, P., MENEZO, C., VIRGONE, J., LEPERS, S. Design of buildings shape and energetic consumption. In: **Building and Environment**. Oxford: Pergamon, 2001. pp 627-635

DERU, M. Energy Savings Modeling and Inspection Guidelines for Commercial Building Federal Tax Deductions. **Repor**. Golden: 2nd Edition, NREL, 2007. 49 p.

DIRECÇÃO GERAL DE ENERGIA. **Eficiência Energética nos Edifícios, E4**. Lisboa: Ogilvry & Mather, 2002a. 48 p.

_____. **Eficiência Energética nos Edifícios, P3E**. Lisboa: Ogilvry & Mather, 2002b. 54 p.

DUFFIE, J. Energy Labeling, Standards and Building Codes: a Global Survey and Assessment for Selected Developing Countries. Washington: GEEI, 1996. **Relatório técnico**.

ELETROBRÁS, **Potencial de Conservação de Energia Elétrica**. 2004. Disponível em: <http://www.eletrobras.gov.br/procel/site/novidades/noticias_1041.asp>. Acesso em: 21/03/2006.

FEDERSPIEL, C., ZANG, Q., ARENS, E. Model based benchmarking with application to laboratory buildings. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2002. v. 34 pp 203-214

FLORIDES, G. A. TASSOU, S. A. KALOGIROU, S. A. Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness. In: **Applied Energy**. Oxford: Elsevier, 2002. v. 73 pp. 299-328

GELLER, H.S. **Efficient electricity use: a development strategy for Brazil**. American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington, DC, 1991.

GLUCH, P., BAUMANN, H. The life-cycle costing (LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making. In: **Building and Environment**. Oxford: Elsevier, 2004. v. 39 pp 571-580

GONÇALVES, H. E ALMEIDA, F. O uso de programas de simulação dinâmica de edifícios em estudos de sensibilidades. In: Encontro Nacional de Modelos de Simulação de Ambientes, São Paulo, 1995. **Anais...** São Paulo: ENMSA, 1995. pp. 231-245.

GONÇALVES H., PANÃO, M. O., CAMELO, S., RAMALHO, A., GRAÇA, J. M., AGUIAR, R. **Ambiente construído, clima urbano, utilização racional de energia**. Lisboa: INETI, 2004. 58 p.

GONÇALVES, H. **Regulamentação Energética dos Edifícios**. Lisboa: INETI< 2006. Disponível em:
http://www.buildingsplatform.eu/epbd_publication/doc/Apresentacao_Regulamentacao_Energetica_HelderGoncalves_p2759.pdf. Acesso em 15/01/2008.

GOULART, S., LAMBERTS, R., FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética em edificações para 14 cidades brasileiras**, Florianópolis, 1997, 345 pp.

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.

HONG KONG GOVERNMENT. **Building (Energy Efficiency) Regulation, Chap 123**. 1997. Disponível em: <<http://www.arch.hku.hk/research/BEER/besc.htm>>. Acesso em: 09/02/2004

_____ **Revision of Energy Efficiency of Buildings - Building (Energy Efficiency) Regulation, Chap 123**. 2000. Disponível em: <http://www.arch.hku.hk/research/BEER>. Acesso em: 09/02/2004

HUANG, J., AKBARI, H., RAINER, L., RITSCHARD, R. 481 Prototypical commercial buildings for 20 urban market areas. Berkeley: LBNL. 1991 **Technical Report**.

HUANG, J., FRANCONI, E. Commercial Heating and Cooling Loads Component Analysis. Berkeley: LBNL. 1999 **Technical Report**

JACOB, MADLENER Exploring experience curves for the building envelope: na investigation for Switzerland for 1970-2020. Zürich: CEPE, 2003. **Technical report**.

JANDA, K. B and BUSCH, J. F. World-wide Status of Energy Standards for Buildings. In: **Energy**. Vol. 19, n° 1. Pergamon. London, Great Britain. 1994 pp. 27-44

JOHNSON, J. A. Energy Benchmark for high performance building. White Salmon: New Buildings Institute, 2005. **Technical Report**. Disponível em: <<http://www.energymaine.com/PDF/MaineBenchmark.pdf>>. Acesso em: 15/01/2008.

JONES, P. J., LANNON, S., WILLIAMS, J. Modelling Building Energy use at Urban Scale. Building Simulation'01 **Proceedings**... Rio de Janeiro: 2001 v. 1. pp. 175-180

LEE, W. L., YIK, F. W. H., JONES, J. A strategy for prioritizing interactive measures for enhancing energy efficiency of air-conditioned buildings. In: **Energy**. Oxford: Pergamon, 2003. v. 28, pp. 877-893

LUCAS, R. G., MEYERS, D. B. Differences between CABO Model Energy Code and 1988 ICC International Energy Conservation Code. Washington: Office of Building Technology, State and Community Programs, 2000. 22 p. **Technical Report**. Disponível em: <http://www.energycodes.gov/implement/pdfs/mec95_iecc98.pdf> Acesso em: 24/02/0322.

MAHDAVI, A. Reflections on computational building models. In: **Building and Environment**. Oxford: Elsevier, 2004 V. 39. pp. 913-925

MALDONADO, E, NASCIMENTO, C. Implementação da EPBD em Portugal: ponto da situação e planeamento futuro. **EPBD Building Platform**, setembro de 2006. Disponível em <http://www.buildingsplatform.eu/epbd_publication/doc/P08PT_p2460.pdf>. Acesso em 15/01/2008.

MARTINAITIS, V., ROGOZZA, A. BIKMANIENE, I. Criterion to evaluate the "twofold benefit" of the renovation of buildings and their elements. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2004. V. 36. pp 3-8.

MASCARENHAS, A.; NERY, J.F.; D'ALCANTARA, A. Conservação de Energia e Conforto Ambiental em Edificações Comerciais de Salvador; **Relatório COELBA/UFBA/PROCEL**, 1988.

MASCARÓ, J. L., MASCARÓ, L. E. R. **Incidência das variáveis projetivas e de construção no consumo energético dos edifícios**. Porto Alegre: Sagra DC Luzzatto, 2ª edição, 1992. 86 p.

MCBRIDE, M. F. Development of Economic Scalar Ratios for ASHRAE Standard 90.1R. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VI, **Proceedings**... Clearwater Beach: ASHRAE/DOE/ORNL, 1995.

MCBRIDE, M. F. ASHRAE Standard 90.1R Criteria Development. In: ASHRAE IAQ & Energy, **Proceedings**.... New Orleans: ASHRAE, 1998. 18 p

MEIER, A., OLOFSSON, T., LAMBERTS, R. What is an energy-efficient building? In: IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, **Anais**... Foz do Iguaçu: ANTAC, ENTAC, 2002.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional, 2007**. Disponível em <<http://www.mme.gov.br>> Acesso em: 18 de janeiro de 2008.

NATIONAL ENVIRONMENTAL EDUCATION & TRAINING FOUNDATION. **California Energy Commission OK's New Building Standards to Cut State Energy Use**. Green BIZ.com, Disponível em: <<http://www.greenbiz.com/index.cfm>> Acesso em: 20/11/2003

OLOFSSON, T., MEIER, A., LAMBERTS, R. Rating the energy performance of buildings. In: **International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings**. 2004, v. 3. Disponível em at <http://www.byv.kth.se/avd/byte/leas>, Acesso em: 17/07/2007.

OFFICE OF THE AUSTRALIAN BUILDING CODES. **International survey of building energy codes**. Canberra: 2000. 88 p.

PARLAMENTO EUROPEU. Diretriz para melhoria do rendimento econômico dos edifícios na Comunidade Européia. In: **Jornal Oficial das Comunidades Européias**, s/d, 2002. 8 p.

PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO. Decisão n.º 1230/2003/CE que aprova o programa plurianual de acções no domínio da energia: Programa "Energia Inteligente - Europa" de 26 de Junho de 2003. **Jornal Oficial das Comunidades Européias** nº L 176 de 15/07/2003 p. 0029 – 0036. Disponível em: <http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=pt&type_doc=Decision&an_doc=2003&nu_doc=1230> Acesso em: 22/10/2004.

PEDRINI, A. **Desenvolvimento de metodologia de calibração de modelos para simulações térmica e energética de edificações**. 1997. 186 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

_____. **Integration of Low Energy Strategies to the Early Stages of Design Process of Office Buildings in Warm Climate**. 2003. 259 p. Thesis. (Doctor of Philosophy) Architecture Department, University of Queensland.

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

PEUPORTIER, B. L. P. Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2001. v. 33, pp. 443-450

PIRRÓ, L. F. S. O Impacto das Envolventes Verticais no Desempenho Energético de Edifícios de Escritórios. 2005. **Tese** (Doutorado em Faculdade de Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo.

PORTUGAL. **Decreto-lei n. 79/2006 de 4 de abril de 2006**. Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios. Disponível em: http://www.snengenheiros.org/legislacao/DecretoLei79_2006de4deAbril.pdf. Acesso em 15/01/2008.

RECS, **Residential Buildings Energy Consumption Survey, Information on the Residential Building Sector**. 2001 Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/emeu/recs/contents.html>>. Acesso em: 8 de julho de 2003.

REGENER PROJECT. **Environmental impact of buildings: Application of the life cycle analysis to buildings**. 1997 Disponível em: <<http://www.cenerg.ensmp.fr/english/themes/cycle/index.html>> Acesso em: 18/03/2004

ROSENFELD, A. Energy efficiency US commercial successful and emerging strategies. In: Energy Efficiency Workshop, **Proceedings...** Rio de Janeiro: CEPTEL, 1996. 11 p

SEZGEN, O., KOOMEY, J. G. Interactions between lighting and space conditioning energy use in US commercial buildings. In: **Energy**. Oxford: Pergamon, 2000. V. 25 pp. 793-805

SIGNOR, R.; WESTPHAL, F.; LAMBERTS, R (2001). Regression analysis of electric energy consumption and architectural variables of conditioned commercial buildings in 14 Brazilian cities. In: Seventh International IBPSA Conference, Building Simulation 2001, **Proceedings...** Rio de Janeiro: IBPSA, 2001. pp.1373-1379

SINPHA. **Sistema de Informações de Posses de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo**. Núcleo de Estatística Computacional, PUC/Rio. Rio de Janeiro, 1999. CD-ROM.

SOUZA, R. C. Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil: Pesquisa na Classe Comércio e Indústria Baixa Tensão. **Procel**: 2007. Disponível em: www.eletronbras.com/pci. Acesso em: 17/01/2008.

STRAND, R. K., PEDERSEN, C. O., CRAWLEY, D. B. Modularization and simulation techniques for heat balance based energy and load calculation programs: the experience of the ASHRAE loads toolkit and EnergyPlus. In: Building Simulation 2001, **Proceedings...** Rio de Janeiro: IBPSA Brazil, 2001. pp. 43-50

TOLEDO, A. **Número de amostras para edifícios** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por Roberto Lamberts <lamberts@labeec.ufsc.br> em 20 de agosto de 2004.

WESTPHAL, F. S. LAMBERTS, R. Building simulation calibration using sensitivity analysis. In: Ninth International IBPSA Conference, Building Simulation 2005, **Proceedings...** Montreal: IBPSA, 2005. pp 1331-1338

WILLÉME, P. A statistical approach to conservation supply curves. In: **Energy Economics**. Oxford: Elsevier, 2003. v. 25, pp. 553-564

WONG, N. H., TAY, S. F., WONG, R., ONG, C. L., SIA, A. Life-cycle cost of rooftop gardens in Singapore. In: **Building and Environment**. Oxford: Pergamon, 2003. v. 38, pp. 499-509.

ANEXOS

1

2

3

4

5

ANEXO 1

Levantamento Fotográfico

As Figuras 1 a 8 apresentam exemplos de edificações amostradas no levantamento fotográfico, por atividade.



Figura 1 – Exemplo de grande escritório.



Figura 2 – Exemplo de hotel.



Figura 3 – Exemplo de pequena loja.



Figura 4 – Exemplo de pequeno escritório.



Figura 5 – Exemplo de hospital/clinica.



Figura 6 – Exemplo de escolas.



Figura 7 – Exemplo de grande loja.



Figura 8 – Exemplo de restaurante.

ANEXO 2

Zonas térmicas

As zonas térmicas dos modelos são apresentadas nas Figuras 1 a 5.

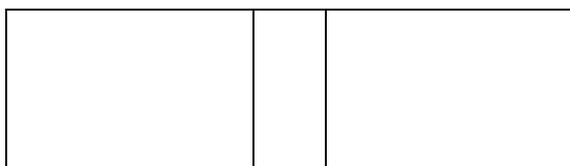


Figura 1 – Zonas térmicas dos grandes escritórios.

A zona central não é condicionada.



Figura 2 – Zona térmica única das

pequenas lojas.

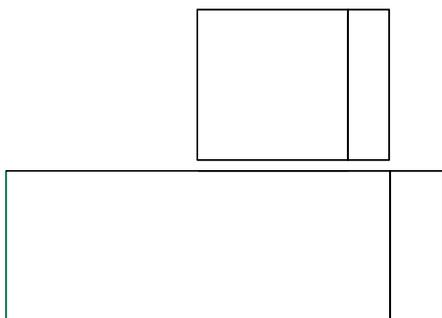


Figura 3 – Zonas térmicas dos pequenos escritórios: o pavimento térreo é o maior. A zona térmica da direita, no piso superior, tem padrão de uso diferenciado.



Figura 4 – Zona térmica única das grandes

lojas.

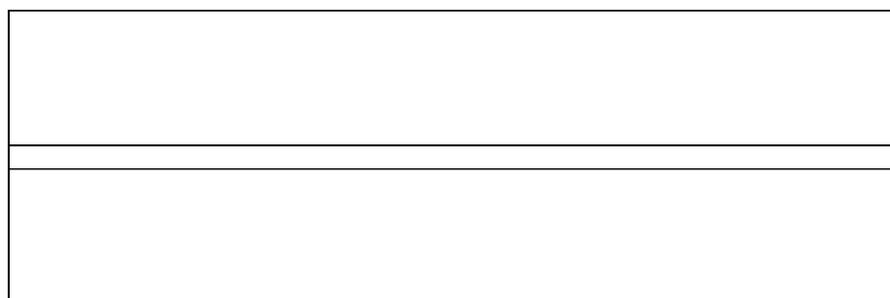


Figura 5 – Zonas térmicas dos hotéis. A zona central não é condicionada.

ANEXO 3

Simulações

As simulações de todas as alternativas são mostradas na Figura 1 para grandes escritórios, na Figura 2 para grandes lojas, na Figura 3 para pequenos escritórios, na Figura 4 para pequenas lojas e na Figura 5 para hotéis. Notar que a escala no eixo das ordenadas é idêntica para todas as figuras.

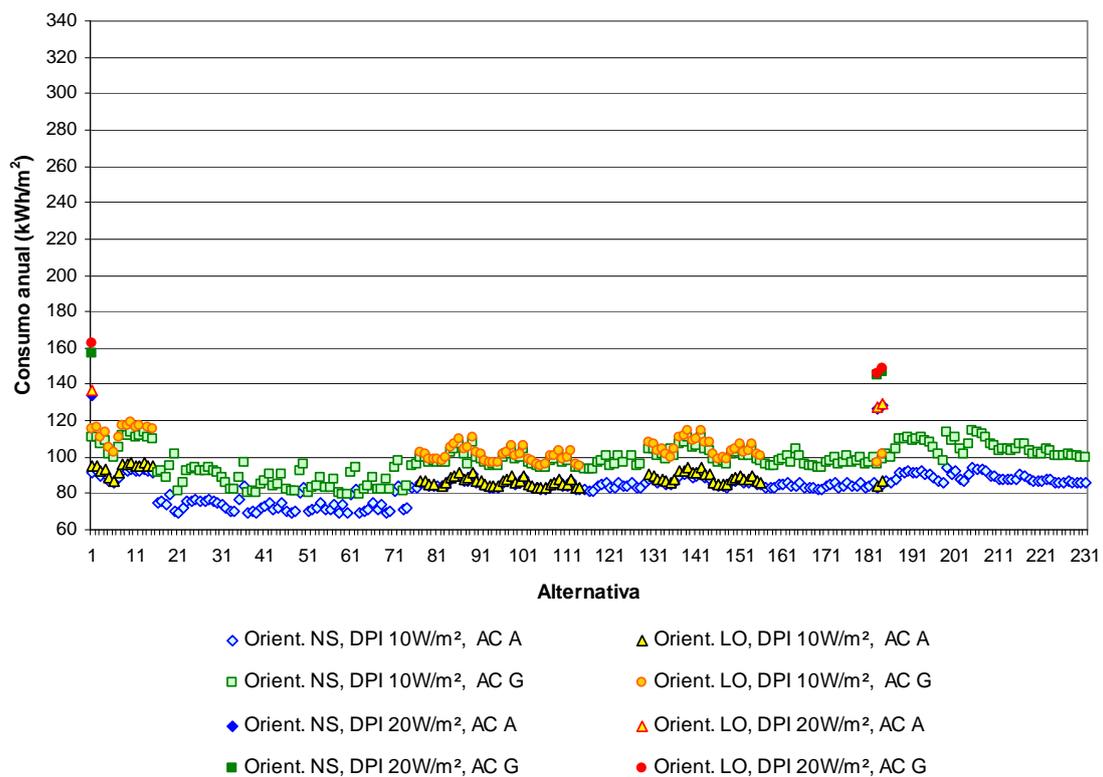


Figura 1 – Consumos de anuais de eletricidade para as alternativas dos grandes escritórios.

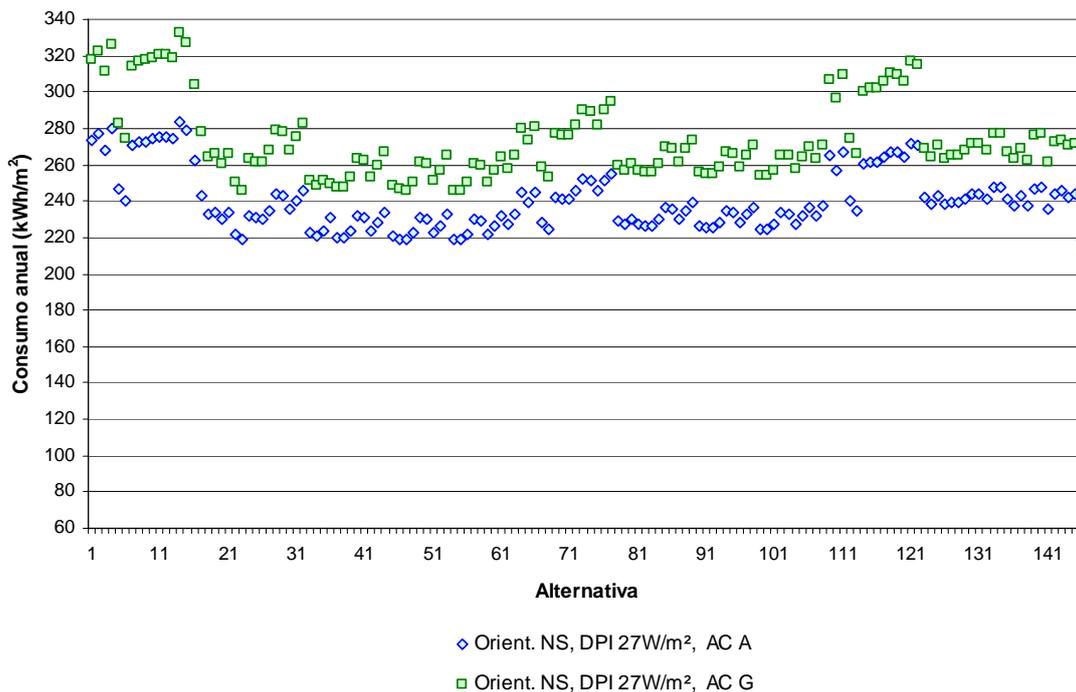


Figura 2 – Consumos de anuais de eletricidade para as alternativas das grandes lojas.

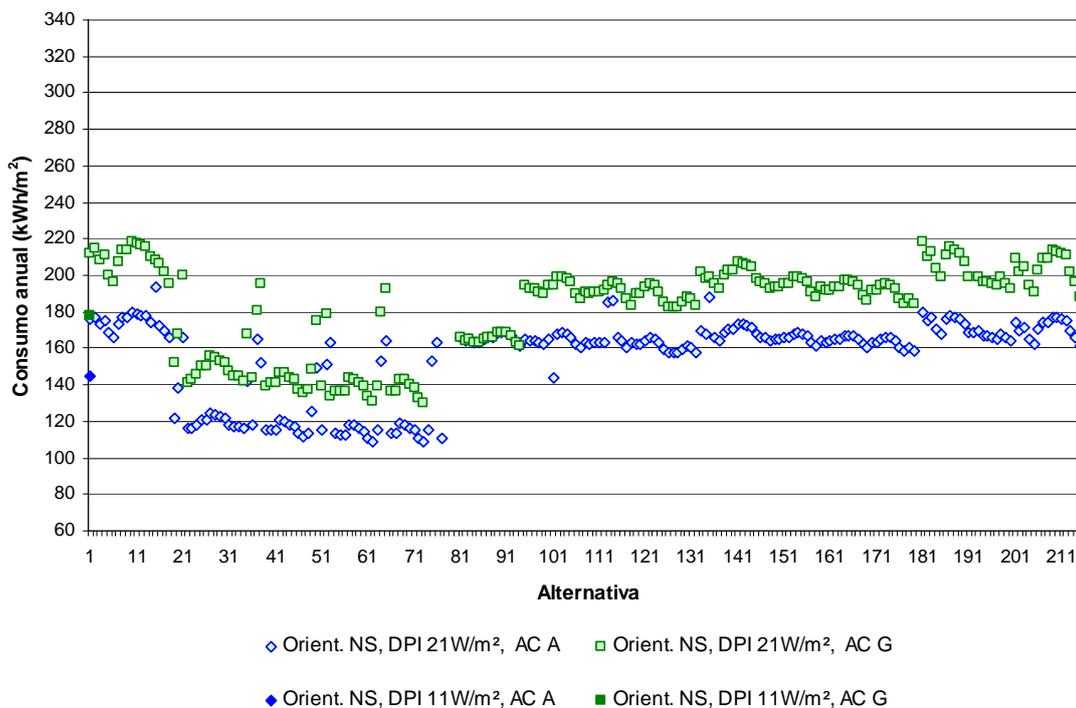


Figura 3 – Consumos de anuais de eletricidade para as alternativas dos pequenos escritórios.

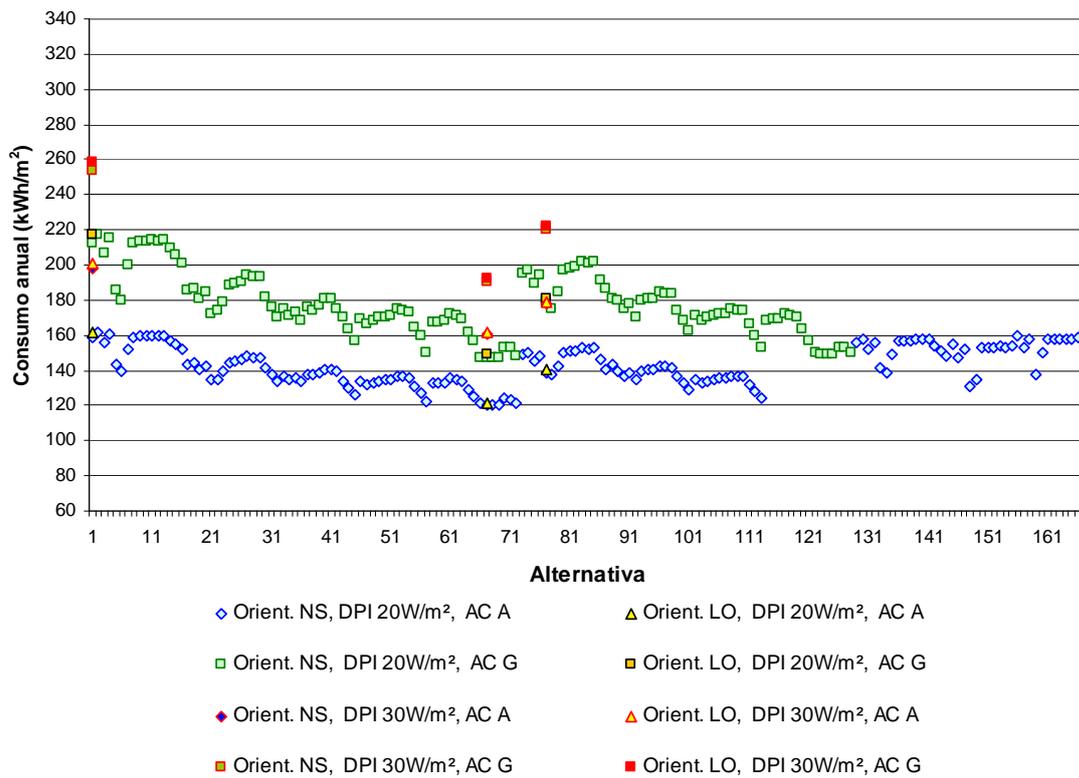


Figura 4 – Consumos de anuais de eletricidade para as alternativas das pequenas lojas.

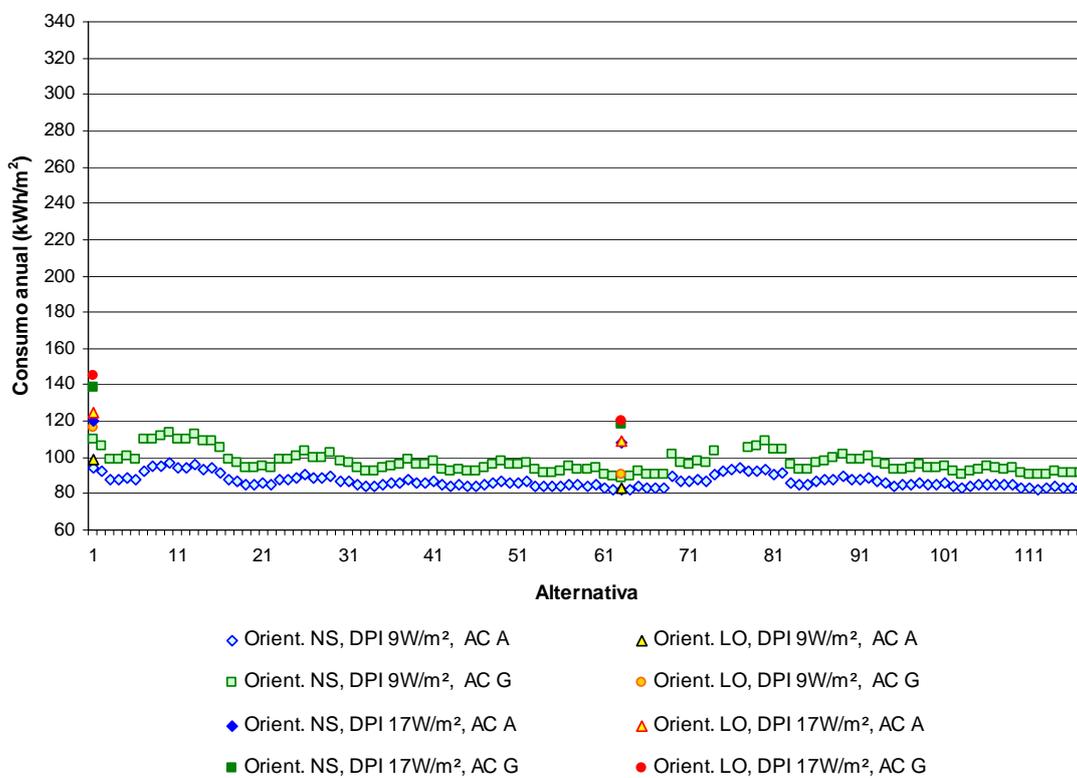


Figura 5 – Consumos de anuais de eletricidade para as alternativas dos hotéis.

ANEXO 4

Análise de Custos

As características do envoltório das alternativas testadas no item 4.3.4, de Análise de custos, são apresentadas na Tabela 1. O consumo anual médio de energia elétrica é estimado através das equações para uma Densidade de Carga Interna de 25 W/m^2 e 11 horas de uso. A primeira coluna apresenta um identificador de cada alternativa, sendo:

- GE, grandes escritórios,
- GL, grandes lojas,
- PL, pequenas lojas,
- PE, pequenos escritórios,
- HO, hotéis.

As demais apresentam as características do envoltório e a última coluna, o consumo anual de energia elétrica pela área da edificação.

Já a Tabela 2 apresenta os custos envolvidos com a aplicação destas medidas. Estes podem ser custos de instalação das medidas ou os custos totais de construção da edificação utilizando tais MCE.

Tabela 1 – Características das alternativas usadas na análise de custos.

Identificador	PJF (fração)	FS	AVS (graus)	AHS (graus)	U_{cob} ($\text{W/m}^2\text{K}$)
GE1	0,80	0,83	0	0	2,00
GE2	0,40	0,61	0	0	2,00
GE3	0,20	0,61	0	0	2,00
GE4	0,40	0,39	0	0	2,00
GE5	0,20	0,39	0	0	2,00
GE6	0,20	0,61	0	0	0,70
GE7	0,20	0,22	0	0	2,00
GE8	0,20	0,61	35	0	2,00
GE9	0,40	0,83	35	0	0,70

GE10	0,20	0,39	35	0	2,00
GE11	0,20	0,39	0	0	0,70
GE12	0,20	0,61	0	0	1,20
GE13	0,40	0,60	35	0	2,00
GE14	0,20	0,83	35	0	2,00
PE1	0,75	0,83	0	0	2,00
PE2	0,50	0,61	0	0	2,00
PE3	0,35	0,61	0	0	2,00
PE4	0,15	0,61	0	0	2,00
PE5	0,50	0,39	0	0	2,00
PE6	0,35	0,39	0	0	2,00
PE7	0,35	0,22	0	0	2,00
PE8	0,15	0,22	0	0	2,00
PE9	0,50	0,61	35	0	0,70
PE10	0,15	0,61	35	0	2,00
PE11	0,75	0,83	0	0	1,20
PE12	0,15	0,39	35	0	2,00
PE13	0,35	0,22	0	0	1,20
PE14	0,15	0,61	0	0	1,20
PE15	0,35	0,22	0	45	0,70
PE16	0,15	0,83	35	0	2,00
GL1	0,90	0,83	0	0	2,00
GL2	0,50	0,61	0	0	2,00
GL3	0,90	0,83	45	0	2,00
GL4	0,90	0,83	35	0	2,00

GL5	0,50	0,22	0	0	0,70
GL6	0,35	0,61	0	0	0,70
GL7	0,35	0,61	0	0	2,00
GL8	0,35	0,22	0	0	2,00
GL9	0,35	0,22	35	0	0,70
GL10	0,75	0,61	45	0	2,00
PL1	0,90	0,83	0	0	2,00
PL2	0,50	0,61	0	0	2,00
PL3	0,35	0,61	0	0	2,00
PL4	0,75	0,39	0	0	2,00
PL5	0,50	0,39	0	0	2,00
PL6	0,35	0,61	0	0	0,70
PL7	0,35	0,22	0	0	2,00
PL8	0,50	0,83	35	0	0,70
PL9	0,35	0,39	35	0	2,00
PL10	0,35	0,61	0	0	1,20
PL11	0,35	0,83	35	0	2,00
HO1	0,60	0,87	0	0	2,00
HO2	0,40	0,61	0	0	2,00
HO3	0,20	0,61	0	0	2,00
HO4	0,40	0,39	0	0	2,00
HO5	0,20	0,22	0	0	2,00
HO6	0,20	0,22	35	0	2,00
HO7	0,60	0,87	35	0	2,00
HO8	0,40	0,87	35	0	2,00

HO9	0,20	0,22	35	0	0,70
HO10	0,40	0,39	35	0	0,70
HO11	0,20	0,39	0	0	0,70
HO12	0,40	0,61	35	0	2,00
HO13	0,20	0,39	35	0	2,00

Tabela 2 – Custos envolvidos com a aplicação das Medidas de Conservação de Energia.

Identificador	Custo MCE (R\$)	Custo de Construção (R\$)
GE1	-	474.331,00
GE2	63.588,00	491.253,00
GE3	53.962,00	481.627,00
GE4	79.899,00	507.564,00
GE5	62.229,00	489.894,00
GE6	57.186,00	484.851,00
GE7	74.803,00	502.468,00
GE8	58.986,00	486.651,00
GE9	58.463,00	486.128,00
GE10	67.253,00	494.918,00
GE11	65.453,00	493.118,00
GE12	73.217,00	500.882,00
PE1	-	325.956,00
PE2	73.048,00	334.887,00
PE3	69.262,00	331.101,00
PE4	64.212,00	326.051,00
PE5	67.113,00	328.952,00
PE6	65.107,00	326.946,00
PE7	85.231,00	347.070,00
PE8	71.055,00	332.894,00

PE9	70.000,00	331.839,00
PE10	70.406,00	332.245,00
PE11	64.295,00	326.134,00
PE12	68.625,00	330.464,00
PE13	85.409,00	347.248,00
PE14	64.390,00	326.229,00
PE15	81.569,00	343.408,00
PE16	67.357,00	329.196,00
GL1	-	1.441.092,00
GL2	521.624,00	1.542.387,00
GL3	470.830,00	1.491.593,00
GL4	454.714,00	1.475.477,00
GL5	454.103,00	1.474.866,00
GL6	457.191,00	1.477.954,00
GL7	483.011,00	1.503.774,00
GL8	453.821,00	1.474.584,00
GL9	453.821,00	1.474.584,00
GL10	602.267,00	1.623.030,00
PL1	-	107.939,00
PL2	24.341,00	110.962,00
PL3	22.381,00	109.002,00
PL4	23.511,00	110.132,00
PL5	21.758,00	108.379,00
PL6	21.363,00	107.984,00
PL7	29.253,00	115.874,00
PL8	22.484,00	109.105,00
PL9	23.073,00	109.694,00
PL10	24.168,00	110.789,00
PL11	27.924,00	114.545,00

HO1	-	108.420,00
HO2	148.674,00	2.603.205,00
HO3	127.829,00	2.582.360,00
HO4	122.293,00	2.576.824,00
HO5	192.606,00	2.647.137,00
HO6	215.983,00	2.670.514,00
HO7	167.377,00	2.621.908,00
HO8	134.281,00	2.588.812,00
HO9	290.965,00	2.745.496,00
HO10	233.865,00	2.688.396,00
HO11	185.957,00	2.640.488,00
HO12	185.246,00	2.639.777,00
HO13	134.352,00	2.588.883,00

ANEXO 5

As correlações onde nada de relevante foi observado ocorreram entre o Custo da Energia Conservada e o Custo do Ciclo de Vida (Figura 1) e entre Custo do Ciclo de Vida e o Pay-back (Figura 2).

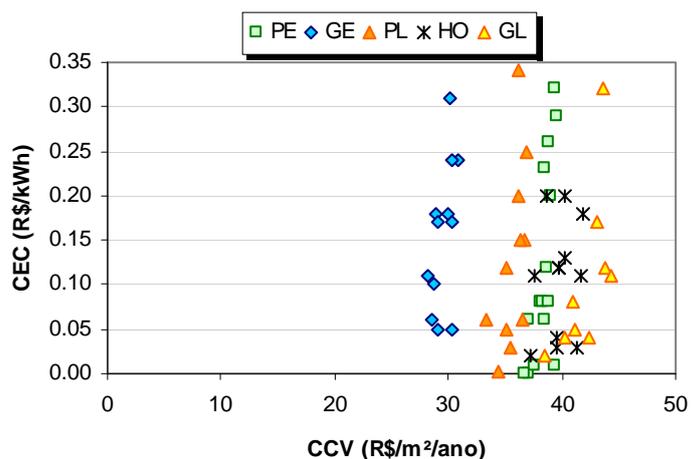


Figura 1 – Custo da Energia Conservada em função do Custo do Ciclo de Vida.

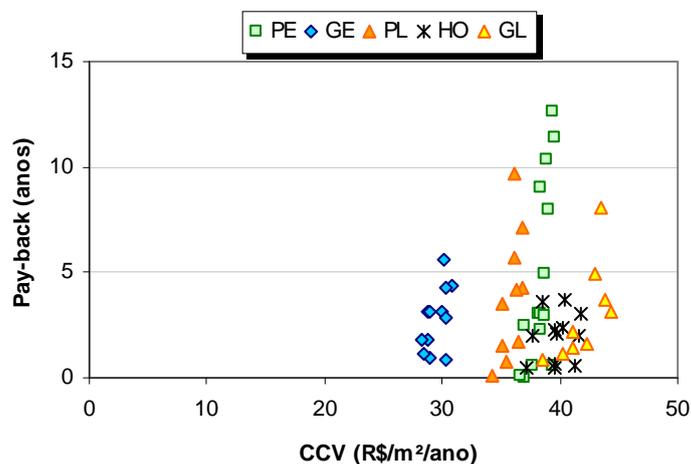


Figura 2 – Pay-back em função do Custo do Ciclo de Vida.