



ENTAC2006

A CONSTRUÇÃO DO FUTURO | XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído | 23 a 25 de agosto | Florianópolis/SC

ELABORAÇÃO DE PROTÓTIPOS PARA SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TERMO-ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES

Joyce C. Carlo (1); Roberto Lamberts(2)

Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – Centro Tecnológico – Universidade Federal de Santa Catarina – e-mail: (1) joyce@labeee.ufsc.br ; (2) lamberts@labeee.ufsc.br

RESUMO

O desenvolvimento de uma regulamentação em eficiência energética de edificações requer o uso de simulações computacionais cujos modelos de edificações sejam baseados na realidade construtiva nacional, através de protótipos que permitem representar as características mais comuns de uma amostra ou grupo de edificações. Foi realizado um levantamento de dados através de fotografias e visitas *in loco* para subsidiar a elaboração de um protótipo representativo de edificações de escritórios de grande porte. Uma série de alterações foram necessárias para adequar o protótipo ao modelo para simulação em função do programa computacional a ser usado, EnergyPlus, e em função dos objetivos da pesquisa: cargas internas adotadas, eficiência do sistema de condicionamento de ar, tipo de ar-condicionado e orientação solar são discutidos. A eficiência do ar-condicionado foi o fator que mais alterou o impacto da alteração das características da envoltória no consumo anual de energia elétrica. A orientação solar também apresentou diferenças, porém menores, e as cargas internas de iluminação alteraram o impacto da envoltória sobre o consumo.

Palavras-chave: eficiência energética, simulação, protótipos.

ABSTRACT

The development of a regulation in energy efficiency of buildings requires the use of computer simulation which models are based on local construction techniques, producing prototypes that represent the most common characteristics of a sample or building group. Photography and site surveys were performed to provide information for the establishment of a building prototype for large office buildings. Several changes were needed to adjust the prototype to the computer model due to the capabilities of the software EnergyPlus and due to the purpose of the research: internal loads, HVAC efficiency, type of HVAC and building orientation are discussed. The HVAC efficiency was the factor that most changed the impact of the envelope on consumption. Building orientation had also presented some differences, although they are smaller and Lighting Power Density had few influence on envelope impact on electric energy consumption.

Key-words: energy efficiency, building simulation, prototypes.

1 INTRODUÇÃO

A avaliação do desempenho térmico de uma edificação abrange uma série de condicionantes que permite que o processo seja flexível e que seja indicado para diversos objetivos. É possível restringir uma avaliação a uma edificação real, investigando o desempenho frente aos componentes, sistemas ou ao uso da edificação, assim como é possível utilizar modelos teóricos a fim de investigar situações que possam ser consideradas comuns para um grupo de edificações. Em todos os casos, a simulação computacional é uma ferramenta que auxilia a avaliação termo-energética da edificação, podendo ser utilizada para verificação dos impactos no consumo de energia, nas temperaturas dos ambientes internos, nas cargas térmicas ou nas trocas térmicas com o ambiente externo, dentre outros usos.

É comum que as simulações requeiram modelos computacionais de edificações baseados na realidade construtiva local, a fim de que a tomada de decisões reflita condições reais, passíveis de aplicação. Modelos computacionais utilizados na simulação são modelos reduzidos às características de interesse, baseados em dados reais ou em critérios teóricos definidos de acordo com os objetivos da simulação. Deve-se atentar para a diferença entre um modelo real e um protótipo de edificação. O modelo real baseia-se em uma edificação existente única e visa reproduzir o desempenho térmico e energético de uma edificação real. Já o protótipo, por ser baseado em mais de uma edificação, visa representar as características mais comuns de uma amostra ou grupo, mesmo que não exista uma edificação que possa ser diretamente relacionada a este protótipo.

Diversas são as formas de se obter dados para a definição de protótipos de edificações, indo de consultas bibliográficas de levantamentos já realizados a levantamentos detalhados promovidos por órgãos governamentais. Uma mesma fonte de dados, entretanto, pode gerar protótipos distintos de acordo com os objetivos da simulação e de sua avaliação posterior.

Este artigo apresenta alguns critérios adotados para a definição de um protótipo de edificações baseado em dados coletados em levantamentos de campo. Estes critérios são discutidos face aos objetivos de uma pesquisa para desenvolvimento de uma regulamentação em eficiência energética de edificações, que visa avaliar parâmetros da envoltória para classificação de sua eficiência sem perder, no entanto, o controle dos demais fatores intervenientes na eficiência energética. O item 2 apresenta os objetivos do trabalho. Em seguida, é realizada uma breve revisão de processos utilizados para definir protótipos, mostrada no item 3. O item 4 apresenta uma descrição do tipo de resultados obtidos com os levantamentos e, posteriormente, no item 5, são discutidos os critérios adotados para a definição do protótipo representativo de grandes escritórios. Os resultados encontrados são apresentados no item 8 e discutidos no item 7. O trabalho é concluído no item 8, seguido das referências citadas no texto no item 9 e os agradecimentos no item 10.

2 OBJETIVO

O objetivo geral deste artigo é apresentar o procedimento utilizado e os critérios adotados para a elaboração de um protótipo de edificações para simulação do seu desempenho térmico. O objetivo específico é avaliar alguns parâmetros que influenciam o impacto da envoltória sobre o consumo de energia e verificar sua relevância na definição do protótipo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Huang et al (1991) classificaram edificações em residenciais e comerciais, para depois subdividi-las de acordo com a atividade, uso, tamanho e horas de operação, gerando 23 tipos de edificações. Destas, 13 foram modeladas, onde as cargas internas e os padrões de uso poderiam variar de acordo com a envoltória e o sistema utilizado, razão pela qual foram geradas duas ou três combinações de envoltória/sistema. As envoltórias e os sistemas ainda foram modelados para duas épocas diferentes: antes e depois de 1980, sendo os sistemas de condicionamento ainda classificados como menos e mais eficientes de acordo com sua data. 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, foram 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) dentre outros [HUANG et al, 1991].

Na Espanha, protótipos foram modelados para representar edificações de escritórios, que correspondem a 10,2 milhões de m² de área construída no país. As amostras apresentavam cargas predominantemente internas, suas fachadas tinham um PJF (Percentual de Área de Janela na Fachada)

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 140kWh/m² a 208kWh/m². O impacto das janelas foi avaliado com o uso de um protótipo de 10 pavimentos com PJJF de 50% e área total de 14167m². Tendo realizado estes testes iniciais, foi utilizado como caso base um protótipo retangular de 7800m² 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 em estudo 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; dimensões; orientação de fachadas; materiais componentes da envoltória; áreas internas condicionadas, não condicionadas e utilizadas para estacionamento; uso da energia; capacidade e componentes do ar-condicionado; 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 1. 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 formas semelhantes, apesar do uso da energia ser distinto. Todos possuem 3 zonas térmicas e paredes externas formadas por blocos de cimento. As janelas são compostas por 1 folha de vidro, sendo claros somente nas lojas, e nenhum com alta refletividade. Lâmpadas fluorescentes são totalmente utilizadas no protótipo de escritórios, e lâmpadas incandescentes são muito 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].

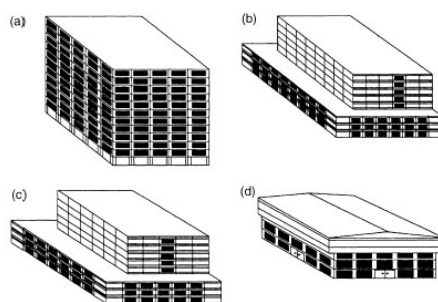


Figura 1 - Protótipos de edificações utilizados em Hong Kong, sendo (a) escritórios, (b) hotel, (c) hospital e (d) lojas. Fonte: Chirarattananon e Taweekun [2003]

No Brasil, Signor et al (2001) criaram modelos de edificações de escritórios que chamou de protótipos, mas não utilizou dados de algum levantamento para definir as características dos protótipos reais, não sendo, portanto, representativos de alguma realidade construtiva brasileira. Os protótipos eram retangulares, com dimensões variadas e foram utilizados para a simulação dos extremos de alguns parâmetros como proporção de área de projeção da edificação pela área total, que representa o número de pavimentos da edificação, Percentual de Área de Janela na Fachada ou Transmitância Térmica da cobertura. Realizaram simulações paramétricas para desenvolver equações de estimativa do consumo de energia para climas de 14 capitais brasileiras.

Em 2002, foi realizado um levantamento fotográfico em Salvador para coletar informações sobre a tipologia de fachadas de edificações comerciais e residenciais (CARLO et al, 2003b). Foram obtidas

informações que subsidiaram a geração de protótipos para simulação do desempenho térmico utilizados na elaboração de uma proposta de inclusão de parâmetros de eficiência energética no Código de Obras do Município de Salvador (CARLO et al, 2003a). Esta pesquisa foi o primeiro esforço para criar bases para a criação de protótipos com representatividade de uma realidade construtiva local, tendo continuidade no ano de 2004 com o procedimento detalhado nos itens seguintes.

4 LEVANTAMENTO DE CAMPO

Dada a carência de dados que descrevam edificações comerciais típicas no Brasil, foram analisados dados existentes de Salvador (CARLO et al, 2003b) e Recife e foi realizado um levantamento em Florianópolis e São Paulo para a definição dos protótipos (CARLO et al, 2005). Posteriormente, o levantamento foi complementado com uma quinta cidade, Belo Horizonte. Foram coletadas imagens do exterior de 1103 edificações, classificadas em 10 categorias: 7 atividades comerciais, sendo 3 divididas em edificações de grande e pequeno porte, conforme Tabela 1. O maior número de amostras coletadas para uma atividade foi de grandes escritórios, 289 edificações, sendo que o menor foi de pequenos hotéis ou pousadas, 11 edificações, restringidas à cidade de Florianópolis. O maior número de amostras coletadas para uma cidade foi em Belo Horizonte, com 490 edificações fotografadas, e o menor número em Salvador, onde foram obtidas imagens de 45 edificações comerciais ou institucionais.

Tabela 1 - Número de amostras fotografadas em cada cidade, segundo sua atividade.

	Gde Escritório	Pqno Escritório	Hotel	Pousada	Gde Loja	Pqna Loja	Restaurante	Supermercado	Hospital Clínica	Escola	Total
Fpolis	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

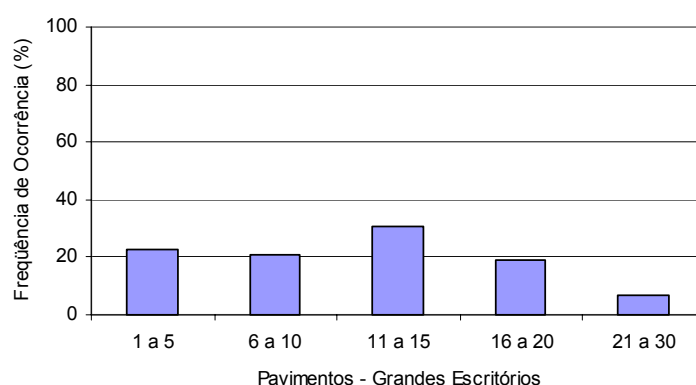


Gráfico 1 - Frequência de ocorrência do número de pavimentos dos grandes escritórios das cinco cidades estudadas.

Os dados classificados foram: número de pavimentos, Percentual de Área de Janela na Fachada, ângulo de sombreamento das proteções solares e cor dos vidros. O Gráfico 1 apresenta um exemplo dos resultados, em que é mostrada a frequência de ocorrência do número de pavimentos nas cinco cidades. Enquanto a predominância é de 32% de edificações de 11 a 15 pavimentos, somente a ocorrência de edificações de 21 a 30 pavimentos é baixa, de 7%. As demais oscilam entre 19% e 32%.

Avaliações como estas foram realizadas com os dados coletados a fim de definir as características externas do protótipo representativo para cada atividade. Após definidas, uma edificação contendo estas características externas foi selecionada para o levantamento do seu interior. Os critérios adotados para a definição do protótipo de grandes escritórios são detalhados a seguir, cujos dados foram baseados nos dois levantamentos, porém com ajustes para adaptação às condições da simulação e da avaliação dos resultados.

5 ELABORAÇÃO DO PROTÓTIPO

A definição do protótipo de grandes escritórios iniciou-se antes do levantamento *in loco*. Foi verificado que o número de pavimentos predominante para a atividade foi entre 11 e 15 pavimentos, porém com uma distribuição razoavelmente uniforme de edificações de 1 a 5, 6 a 10 e 16 a 20 pavimentos. Sabe-se que edificações de grandes escritórios podem conter diversas unidades de escritório consumidoras de energia, o que é comum de ocorrer em edificações verticalizadas, como as de 11 a 15 pavimentos.

Uma especificidade da metodologia adotada para o desenvolvimento de regulamentação em edificações eficientes era a calibração do modelo real, anterior às alterações para gerar um protótipo representativo, a fim de ajustar os seus padrões de uso à realidade. Como seria inviável obter as contas de energia de dezenas de unidades consumidoras de uma edificação empresarial com diversos pequenos escritórios, optou-se por coletar dados do interior de uma edificação de escritório que possuisse somente uma conta de energia elétrica, e que esta fosse atendida por alta tensão, como as demais grandes edificações estudadas. Desta forma, e porque o número de pavimentos era bastante variável em todos os intervalos analisados, optou-se por uma edificação de 5 pavimentos (mais um subsolo), cuja geometria pôde ser considerada verticalizada, cujas demais características externas atendiam ao verificado no levantamento fotográfico e cujo grupo tarifário correspondia ao desejado para grandes edificações.

As características foram levantadas e, em seguida, o modelo computacional gerado com duas zonas condicionadas separadas por uma circulação central foi calibrado a fim de ajustar os horários de funcionamento, especificações do sistema de condicionamento de ar e outros detalhes. Em seguida, procedeu-se às alterações necessárias para que a edificação pudesse ser considerada representativa de um grupo e, portanto, um protótipo conforme definido nesta pesquisa. Os dados de densidade de carga interna foram uniformizados para todos os pavimentos da edificação, diferenciados no modelo de acordo com a zona: se escritório ou circulação. O Percentual de Área de Janela na Fachada foi mantido por estar contido em um intervalo de alta frequência de ocorrência verificado no levantamento fotográfico. O tipo de vidro foi simplificado: foram modelados com um fator solar de 0,61 em todas as janelas, que pode ser representado por um vidro cinza de 3mm, eliminando portanto a interferência da película refletora nas janelas laterais e posterior. O resultado é apresentado na Tabela 2, cujas características podem ser consideradas típicas de um protótipo de grandes escritórios.

5.1 Ajustes para simulação e análise

Os ajustes foram realizados de acordo com as potencialidades e limitações do programa computacional utilizado para a simulação, o EnergyPlus, e de acordo com os objetivos da pesquisa. Cada parâmetro de interesse foi avaliado separadamente para conferir se forneceria resultados adequados à análise.

Um destes parâmetros a ser analisados é a influência do Percentual de Área de Janela na Fachada, PJF, no desempenho térmico. Este costuma ser diferenciado para cada fachada da edificação, o que induz ao uso de dois ou três PJF diferentes na 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. A análise exige uma simplificação do PJF, de forma que um parâmetro somente possa descrever os efeitos sobre o desempenho térmico da edificação. Assim, todas as fachadas devem apresentar o mesmo PJF, mesmo que estas sejam de dimensões distintas e, por conseguinte, as janelas também apresentem dimensões distintas. O levantamento fotográfico foi utilizado para verificar a relação dos PJF de cada fachada com as dimensões destas

fachadas. Cada edificação em que tenha sido contabilizado o PJF das fachadas laterais, além dos PJF das fachadas principais, foi incluída em uma análise que encontrou um PJF ponderado (Percentual de Área de Janela na Fachada ponderado, ou PJF_p) típico para cada atividade. Foram contabilizados 76 grandes escritórios, que resultaram em uma frequência máxima de ocorrência de 32% dos casos para um PJF_p de 20% a 30%.

Tabela 2 - Características do protótipo de grandes escritórios.

Parâmetros		Variáveis
Dimensões retangulares (m)		27 x 8
Número de pavimentos		5 + 1 (subsolo)
Percentual de Área de Janela na Fachada principal, PJF (%)		42
Vidro	cor	cinza
	Espessura (mm)	3
	película refletora	Substituída por vidros cinza
Transmitância Térmica (W/m ² K)	Paredes	2,39
	Cobertura	1,17
Absortância	Paredes	0,35
	Cobertura	0,60
Ocupação média (m ² /pessoa)		19,57
Densidade de carga interna (W/m ²)	Iluminação (escritórios)	10
	Equipamentos (escritórios)	9,6
Padrão de uso (horas)	Ocupação	8-12; 14-18
	Iluminação	8-22
	Equipamentos	8-18;
Características do sistema de condicionamento de ar	Tipo	self
	Capacidade (TR)	7,5
	Observação	Condensador a água, 1 self em cada pavimento

Assim, o protótipo de grandes escritórios, que possui um PJF de 42% nas fachadas principal e posterior (7,8m de extensão) e um PJF de 14% nas fachadas laterais (27m de extensão), foi modelado com um PJF ponderado de 25% para todas as fachadas (PJF_p médio do intervalo). 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 2).

As diferenças encontradas nas dimensões das janelas em função do PJF, seja ele ponderado ou não, já implicam em variações da carga térmica de uma fachada para outra devido ao tamanho de cada fachada. Soma-se a estas variações as ocorridas pela orientação solar, ou seja, mesmo que as dimensões das janelas estejam igualmente proporcionais às suas fachadas (ou até se elas tivessem exatamente a mesma área), estas ainda transmitem cargas térmicas diferenciadas devido às diferentes intensidades da radiação solar em cada orientação.

Estes fatores embasaram a decisão de alterar as orientações originais das edificações nas quais os protótipos foram calibrados e adotar um mesmo procedimento de orientar todos os casos base da simulação. Optou-se por dois modelos, considerados mais e menos eficiente: o caso base foi orientado de forma que suas maiores fachadas estivessem voltadas a Norte-Sul em uma situação e a Leste-Oeste em outra. Desta forma, seria de conhecimento do simulador estar trabalhando com modelos em que a carga térmica estaria minimizada ou maximizada, mostrando assim os casos extremos. Deve-se salientar que esta primeira etapa, de elaboração e avaliação do protótipo, não inclui a investigação da intensidade da radiação solar por orientação em cada fachada individualmente.

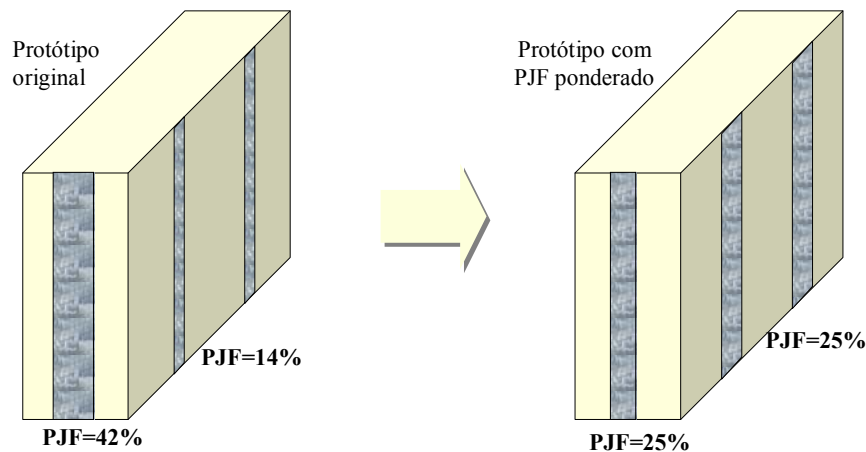


Figura 2 - Exemplo da diferença dos efeitos do PjF para o PjFponderado.

Outra característica modificada foi o sistema de condicionamento de ar, que foi alterado do tipo *self* para o ar-condicionado de janela, bastante utilizado nas edificações comerciais. Foi modelado com duas eficiências, a de Etiqueta de Eficiência A do INMETRO e uma de Etiqueta G. O ar-condicionado de eficiência A possui um COP (*Coefficient of Performance*)¹ para resfriamento de 3,19W/W e o ar-condicionado de eficiência G possui um COP de 1,82W/W. O objetivo foi padronizar o mesmo tipo de ar condicionado para todos os casos, que incluía a análise de mais 10 outros protótipos de edificações comerciais, a fim de focar a análise nos efeitos da alteração da envoltória sobre o consumo de energia. A capacidade do ar-condicionado foi alterada de 7,5TR para uma capacidade variável a ser calculada pelo programa de acordo com os dias de projeto.

O sistema de iluminação artificial também recebeu especial atenção devido ao seu grande impacto no consumo de energia. O sistema utilizado na edificação real é um sistema eficiente, com luminárias refletoras e lâmpadas de baixa potência, cuja densidade de potência de iluminação (*Lighting Power Density*, LPD) nos ambientes de escritório não ultrapassa 10W/m². Como protótipos representando outras atividades também seriam modelados, deveria haver uma padronização do procedimento: poderiam ser simulados casos com um sistema de iluminação eficiente, com o sistema real ou poderia ser mais adequado alterar a densidade de potência para um sistema ineficiente a fim de analisar os piores casos. Sabe-se que a variação do consumo de energia é linear e diretamente proporcional à variação da densidade de potência instalada no sistema de iluminação (SIGNOR et al, 2001), assim, optou-se por adotar um sistema real, porém avaliando previamente a grandeza das diferenças no consumo provocadas por um sistema menos eficiente. No caso dos outros protótipos, se o sistema real for ineficiente, testes deveriam incluir um sistema eficiente.

Após a elaboração do protótipo representativo e após as alterações para ajustar o protótipo para a simulação, foram ainda elaborados dois outros protótipos baseados neste último: um protótipo com baixo consumo de energia elétrica e outro com alto consumo de energia elétrica. As variações no consumo de energia destes casos foram provocadas somente pelas alterações na envoltória da edificação. Por fim, foi obtido um protótipo representativo para simulação computacional contendo dois níveis de eficiência do ar-condicionado, duas densidades de potência de iluminação interna e voltado para duas orientações: maiores fachadas para N-S e para L-O, e outros dois protótipos semelhantes a estes, porém com alterações na sua envoltória que provocam um maior e um menor consumo de energia, resultando em 24 casos analisados.

¹ COP é a grandeza utilizada no programa EnergyPlus para indicar a eficiência do sistema, sendo portanto, um dado de entrada direto do arquivo. Para melhor entendimento, duas formas de indicar a eficiência energética de sistemas de condicionamento de ar foram utilizadas: a do programa de simulação e a etiqueta do INMETRO.

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados são apresentados no Gráfico 2, onde o consumo anual de energia elétrica é função do COP. Neste, há dois gráficos: o gráfico (a) mostra os protótipos com densidade de potência de iluminação (LPD) de 10W/m^2 e o gráfico (b) mostra os protótipos com LPD de 20W/m^2 . Três pontos iguais alinhados, ou seja, com o mesmo COP, são protótipos com orientação e eficiência idênticos, porém com envoltórias distintas: são os protótipos de maior consumo (quadrado), o representativo (triângulo), e o de menor consumo de energia (círculo). A variação do eixo das ordenadas é de 40kWh/m^2 nos dois gráficos, permitindo portanto uma comparação visual. No entanto, eles representam intervalos distintos: o Gráfico 2(a), inicia-se em 80kWh/m^2 , indo até 120kWh/m^2 , e o Gráfico 2(b) inicia-se em 125kWh/m^2 , chegando a 165kWh/m^2 .

O Gráfico 2(a) mostra como foi alto o impacto da eficiência do ar-condicionado no consumo de energia. Considerando os casos com orientação N-S, entre os protótipos de menor consumo, ou seja, mais eficientes, o consumo de energia elétrica foi reduzido de 96kWh/m^2 para 83kWh/m^2 , com uma diferença de **13kWh/m^2** , por alterar a eficiência do ar-condicionado de G para A. Entre os protótipos representativos, a redução foi de 99kWh/m^2 para 85kWh/m^2 , ou seja, de **14kWh/m^2** . E entre os protótipos de maior consumo, ou menos eficientes, a redução no consumo de energia foi de 110kWh/m^2 para 92kWh/m^2 , ou seja, diferença de **18kWh/m^2** .

Já a alteração da orientação solar da edificação, de N-S para L-O, elevou o consumo do protótipo menos eficiente em **6kWh/m^2** (de 110kWh/m^2 para 116kWh/m^2) para o ar-condicionado de eficiência G e em **3kWh/m^2** (de 92kWh/m^2 para 95kWh/m^2) para o ar-condicionado de eficiência A. Deve-se lembrar que este aumento do consumo de energia está relacionado a um PJF_p de 25%.

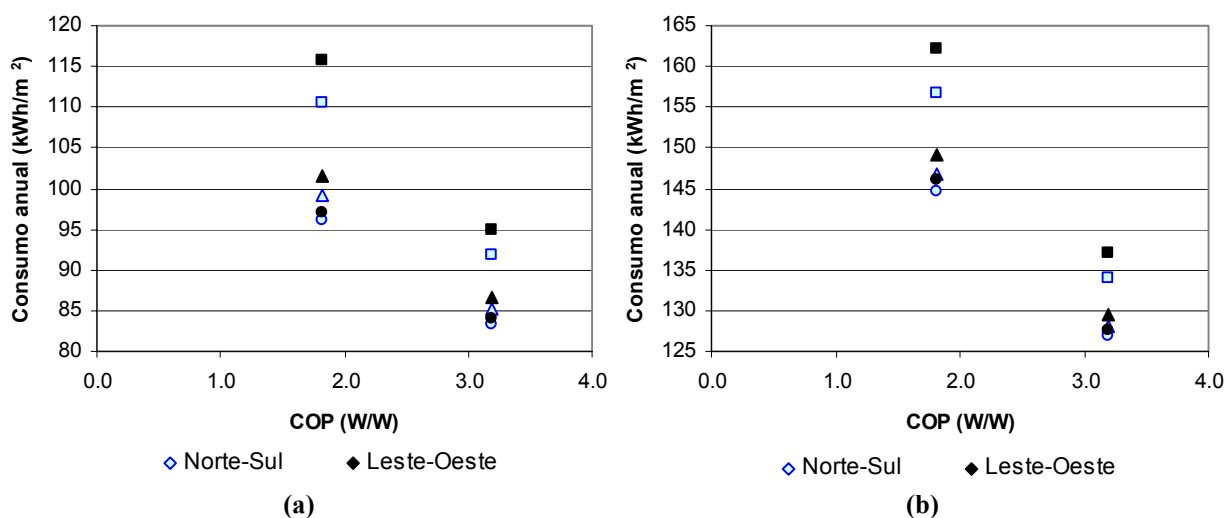


Gráfico 2 - Consumo anual de energia elétrica dos protótipos com LPD de 10W/m^2 (a) e dos protótipos com LPD de 20W/m^2 (b).

Observando as diferenças provocadas pela envoltória, a alteração da eficiência do ar condicionado de G para A, ou de $1,82\text{W/W}$ para $3,19\text{W/W}$ reduziu as diferenças entre o consumo de energia dos protótipos: para a orientação N-S, a diferença entre o protótipo de maior consumo de energia e o de menor consumo é de **14kWh/m^2** (de 110kWh/m^2 96kWh/m^2) com o ar-condicionado de eficiência G. Esta diferença cai para **9kWh/m^2** entre os protótipos de maior e menor consumo (de 92kWh/m^2 para 83kWh/m^2) com o ar-condicionado de eficiência A. Ou seja, há uma redução de 5kWh/m^2 . Realizando a mesma comparação, porém da influência da orientação solar no impacto da envoltória no consumo de energia, as diferenças são menores. A diferença do consumo de energia dos protótipos extremos, de maior e menor consumo, com eficiência A é de **9kWh/m^2** (de 83kWh/m^2 para 92kWh/m^2) na orientação N-S e passa para **11kWh/m^2** na orientação L-O (de 84kWh/m^2 para 95kWh/m^2). Ou seja, há um aumento de 3kWh/m^2 .

Passando para o Gráfico 2(b), é possível perceber que as diferenças citadas acima foram reduzidas, embora os consumos sejam maiores. O aumento do LPD reduziu o impacto da envoltória sobre o consumo de energia. Se no Gráficos 2(a) as diferenças entre os protótipos de maior e menor consumo para orientação N-S e ar-condicionado A era de 9kWh/m², no Gráfico 2(b) esta diferença passou para **7kWh/m²**. Considerando a orientação N-S e ar-condicionado G, as diferenças eram de 14kWh/m² e passaram para **12kWh/m²**. Já a orientação sola não teve alterações significativas entre as diferenças de consumo dos casos N-S e L-O.

É também interessante notar o grande impacto da densidade de potência de iluminação (LPD) no consumo de energia. Nos casos com LPD de 10W/m², o consumo máximo encontrado foi de 116kWh/m². O aumento no LPD de 10W/m² para 20W/m² elevou o consumo de energia do mesmo protótipo (orientação L-O, ar-condicionado com eficiência G) para 162kWh/m², aumento de 42kWh/m².

Em resumo, pode-se afirmar que, para os modelos baseados no protótipo representativo dos grandes escritórios, o ar-condicionado apresenta maior impacto no consumo de energia, chegando a um aumento de 18kWh/m², em seguida, a envoltória tem um impacto que pode chegar a 14kWh/m² e a orientação solar da edificação pode gerar aumentos de apenas 6kWh/m². Já o LPD tem variação do consumo dependente da densidade utilizada. Neste trabalho, o aumento chegou a 42kWh/m² de um sistema de iluminação eficiente de 10W/m² para um sistema ineficiente de 20W/m².

7 DISCUSSÃO

Os resultados da simulação mostraram o quanto os fatores orientação solar, LPD e eficiência do ar-condicionado influenciam o consumo de energia quando é alterado algum elemento da envoltória. Estes resultados orientaram o foco da pesquisa para a análise dos parâmetros de interesse, e confirmaram a relevância de alguns fatores a serem considerados nas etapas posteriores. Foi definido todos os protótipos representando cada atividade comercial passaria por esta análise inicial e, caso os resultados fossem semelhantes aos resultados dos grandes escritórios, as simulações seguintes alterando parâmetros da envoltória seriam baseadas no protótipo com orientação N-S, LPD de 10W/m² e ar-condicionado com eficiência A para um grupo de simulações e com eficiência G para outro grupo.

Acredita-se que as características alteradas do protótipo original para o protótipo para simulação não comprometeram os resultados, mas permitiram a análise e comparação das diversas alternativas que foram criadas a partir do protótipo. Com certeza, o protótipo representativo utilizado na simulação não pode ser considerado um modelo da edificação visitada, mas sim representativo de um conjunto de edificações que possuem, na sua maioria, as características definidas na envoltória. Já as características internas modificadas, como o tipo do ar-condicionado, são consideradas ajustes necessários para adequar o modelo às necessidades de análise.

Outras situações envolvendo a modelagem de edificações em computador para avaliação do desempenho térmico exigem procedimentos distintos. No caso da reprodução do desempenho térmico da edificação real, modificações como o PJP_p não seriam corretas, tampouco necessárias. A reprodução das características da edificação deveria ser a mais fiel possível à realidade. Já no caso de protótipos representativos cuja pesquisa envolve o estudo da orientação solar das aberturas, seria recomendável a modelagem de um protótipo de planta quadrada mesmo que o levantamento indicasse que a edificação representativa tem planta retangular. Outra solução para este mesmo caso é a eliminação das janelas de 3 fachadas, mesmo que em uma edificação retangular, e adoção de um modelo com uma única janela em uma edificação que pode ser girada para a orientação geográfica desejada. Todas estas soluções implicam em impactos que devem ser mensurados para verificação da grandeza dos erros que se pode encontrar.

8 CONCLUSÃO

Através de um levantamento em campo, dados da tipologia externa de edificações comerciais foram recolhidos e utilizados para a elaboração de um protótipo considerado representativo de uma

edificação de escritórios de grande porte. Foram coletadas informações de 5 capitais brasileiras que forneceram 289 amostras para identificação de características como Percentual de Área de Janela na Fachada e número de pavimentos. Estas características foram utilizadas para identificação de uma edificação real que possuísse os parâmetros que mais ocorreram nas amostras e esta edificação foi visitada para coleta de informações sobre suas características internas. Em seguida, alterações deste modelo foram realizadas para adequá-lo às limitações do levantamento (como no caso do número de pavimentos), às necessidades da simulação e análise (como no caso do PJJ), e aos objetivos da pesquisa (como no caso da orientação solar, cargas internas de iluminação e tipo e eficiência do ar-condicionado).

Por fim, foram obtidos um protótipo considerado representativo de edificações de grandes escritórios e outros três protótipos para simulação: um protótipo representativo porém com as alterações para a simulação e outros dois com alterações na envoltória de forma a fornecerem um maior e um menor consumo de energia. Após as simulações, percebeu-se que o mau desempenho do ar-condicionado influenciou o impacto da envoltória no consumo de energia de forma mais significativa que a orientação solar e que o aumento da densidade de potência de iluminação mascara este impacto. Os resultados também mostraram a relevância destes quatro fatores no consumo, orientando o processo de simulação dos casos seguintes a fim de quantificar a relevância dos demais parâmetros da envoltória para definição de critérios para avaliação da eficiência energética de uma edificação.

9 REFERÊNCIAS

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. 2003a. pp 131-138.

_____. Energy Efficiency Building Code of Salvador, Brazil. In: THE 20TH CONFERENCE ON PASSIVE LOW ENERGY ARCHITECTURE, Santiago, 2003b. **Proceedings...** Santiago: PLEA, 2003b. *Documento Eletrônico*.

CARLO, J. C., TOCCOLINI, G., LAMBERTS, R. Verificação das características externas de edificações em quatro capitais brasileiras. In: VIII Encontro Nacional e IV Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005. pp 316-325

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

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

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

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, **Proceedings...** Rio de Janeiro: IBPSA, 2001. pp.1373-1379

10 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Procel/Eletrobrás, pelo financiamento da pesquisa e à professora Roberta Vieira e ao acadêmico em Arquitetura e Urbanismo Otávio Miranda da EA-UFGM pelo levantamento fotográfico de Belo Horizonte.