

ANÁLISE ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO DE CÉLULAS

Samuel Ribeiro Gosch; Fernando Simon Westphal; Roberto Lamberts

Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Civil
Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE)
Campus Universitário – Trindade – Cx. Postal 476 CEP 88040-900 Fone: (48) 3315184
samuel@labeee.ufsc.br; fernando@labeee.ufsc.br; lamberts@ecv.ufsc.br

Resumo. Este trabalho apresenta uma comparação entre a simulação energética global de uma edificação e a simulação individual de suas zonas térmicas (células). O programa de simulação utilizado foi o EnergyPlus. A hipótese testada é a possibilidade de se utilizar a simulação de células para representar o comportamento térmico global de uma edificação. O caso base representa uma edificação de um pavimento, com 9 zonas térmicas, sendo 8 perimetrais e uma interna, central. Foram adotados componentes construtivos comuns no Brasil, considerando-se no caso base o fluxo de calor através das paredes internas, ou seja, a troca de calor entre zonas adjacentes. Cada zona é atendida por um sistema de resfriamento de expansão direta e uma resistência elétrica para aquecimento, com temperaturas de controle de 24°C e 18°C, respectivamente. As simulações foram feitas com arquivo climático da cidade de São Paulo, permitindo a análise do consumo de energia com resfriamento e aquecimento. As células foram simuladas representando cada zona do caso base individualmente, sem considerar a troca de calor entre as paredes internas. As células que representavam os ambientes com maior quantidade de paredes internas resultaram em maiores diferenças entre consumo das células e do caso base, indicando que, dependendo da edificação, a carga térmica total de cada zona sofre influência significativa do fluxo de calor entre zonas adjacentes. De modo geral, para os modelos simulados neste trabalho as células não representaram com precisão o consumo de energia elétrica em condicionamento de ar, obtendo-se diferença de até 49% no consumo anual de energia com condicionamento de ar de uma zona do caso base. Porém, novas análises estão sendo feitas e outros parâmetros do modelo serão testados para se determinar em quais condições o uso de células poderia reduzir o tempo gasto na modelagem de edificações para análise de desempenho térmico e energético.

Palavras chave: simulação, EnergyPlus, células

1. Introdução

Nos últimos 30 anos, diversas ferramentas computacionais foram desenvolvidas para auxiliar na análise térmica e energética de edificações e seus componentes. O Diretório de Ferramentas de Simulação Energética (Building Energy Tools Directory) do Departamento de Energia dos Estados Unidos apresenta mais de 280 programas de simulação desenvolvidos em diversos países (www.eren.energy.gov/buildings/tools_directory).

Apesar dessa quantidade de programas existentes, o emprego de simulação energética nos escritórios de engenharia e arquitetura durante o projeto de edificações mais eficientes ainda é pouco notável. Em um levantamento, realizado por Wilde e Voorden (2004) em 70 projetos de edificações holandesas, identificou-se que cerca de 80% das medidas de eficiência energética são selecionadas com base na intuição ou experiências anteriores, sem a consideração de outras alternativas. A seleção da maioria dos conceitos ou componentes energeticamente eficientes é feita durante a fase conceitual do projeto e que as ferramentas de simulação, quando utilizadas, são adotadas após essa fase, apenas para verificar as expectativas em relação à economia de energia ou otimizar a alternativa selecionada. Entre as principais barreiras para integração da simulação durante o projeto os autores citam: a falta de confiança e clareza nos resultados fornecidos pelos programas; alto grau de experiência exigido para a correta utilização; e custos com simulação, especialmente em relação ao tempo envolvido no processo de modelagem.

Em outro levantamento, realizado nos Estados Unidos e na Nova Zelândia, junto a escritórios que utilizam a simulação em seus projetos, Donn (1997) procurou identificar as experiências desses usuários com simulações e suas necessidades em termos de aprimoramento das ferramentas existentes. Entre os pontos mais importantes do levantamento, a maioria dos usuários identificou que o maior dispêndio de tempo no uso das ferramentas está no processo de modelagem da edificação. Cerca de 40% dos usuários sugerem melhorias nas interfaces dos programas, sendo que entre as prioridades salienta-se a necessidade de valores pré-definidos para dados de entrada e padrões de uso. Há uma necessidade de se desenvolver diferentes níveis de simulação para os diferentes estágios do projeto. Meios para garantir o controle de qualidade na simulação também são requeridos. Para garantir a disseminação do uso das ferramentas de simulação – da maneira como os editores de texto são comuns hoje – o autor salienta, entre outros fatores, a falta de ferramentas que possam garantir a modelagem rápida e expedita da edificação.

Analisando a compatibilidade de arquivos de Desenho Auxiliado por Computador (CAD – *Computer Aided Design*) com programas de simulação, Bazjanac (2001) identificou que o esforço inicial na simulação é maior na preparação dos dados de entrada para montar o primeiro modelo que funcione. As primeiras simulações consistem em definir os dados de entrada e testar o modelo, simulando e analisando os resultados obtidos. Acredita-se que 80% do esforço dispensado na preparação dos dados de entrada está na representação geométrica da edificação. O ponto de vista de engenheiros e arquitetos em relação ao projeto arquitetônico e construtivo é muito diferente das necessidades de uma ferramenta de simulação. Como exemplo, cita-se o detalhamento de paredes, portas e, até mesmo, salas inteiras, que podem ser desconsideradas na simulação térmica e energética de uma edificação.

Ellis e Mathews (2001) desenvolveram uma ferramenta de simulação simplificada a partir do levantamento dos requisitos básicos para que o programa pudesse ser utilizado em um escritório de projeto. Entre os requisitos para o desenvolvimento do novo programa, os pesquisadores buscaram aumentar a velocidade da simulação e da apresentação dos resultados, encorajando o uso de simulação nas etapas iniciais de projeto. Comparando os resultados do programa com valores de temperatura interna medidos em um prédio de escritórios, com 2.500 m² de área construída, os autores encontraram correlações razoáveis entre os valores de temperatura interna simulados e medidos, com coeficiente de determinação (R²) entre 0,74 e 0,96. Outros pesquisadores também têm procurado diminuir a complexidade das ferramentas de simulação através do desenvolvimento de programas e métodos de análise simplificados (WITTCHEN et al., 1995; KOSONEN e SHEMEIKKA, 1997; DÉQUÉ et al., 2000, WESTPHAL e LAMBERTS, 2004).

Visando-se reduzir a complexidade do processo de simulação de uma edificação, este trabalho apresenta a análise energética de edificações através da simulação de células. Para isso, comparou-se o consumo de energia elétrica estimado para uma edificação com 9 zonas e o consumo estimado pela simulação de cada uma de suas zonas isoladamente (células).

2. Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é comparar o consumo de condicionamento de ar estimado através de simulação de protótipos de edificações completas e de células isoladas, testando-se a possibilidade de simplificar a análise térmica e energética de edificações, diminuindo a complexidade do modelo e aumentando a velocidade da simulação, sem comprometer a precisão dos resultados.

Os modelos térmicos de edificações poderiam ser compostos a partir de células representativas, onde o consumo seria obtido através da multiplicação dos resultados pela quantidade de células similares na edificação.

3. Metodologia

3.1. Ferramenta utilizada

A programa utilizado para as simulações foi o EnergyPlus (versão 1.2.0.029), desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (CRAWLEY et al., 2000). O EnergyPlus foi elaborado a partir da fusão dos códigos do BLAST e DOE-2, porém seu código integra vários outros algoritmos, como WINDOW 5.0, COMIS, TRNSYS e SPARK. A partir da caracterização geométrica da edificação, seus componentes construtivos, cargas elétricas instaladas, sistemas de condicionamento de ar e padrões de uso, o programa estima o consumo de energia considerando as trocas térmicas da edificação com o exterior. Para isso, deve-se utilizar um arquivo climático da região, com dados horários de temperatura, umidade relativa, ventos e radiação solar.

O EnergyPlus permite que o usuário solicite diversos relatórios, com dados estimados durante o processo de simulação, incluindo temperatura interna de cada zona térmica, consumo de energia por uso final e carga térmica retirada ou adicionada pelo sistema de condicionamento de ar.

3.2. Hipótese considerada

A hipótese a ser testada neste trabalho é a possibilidade de representar o comportamento térmico e energético global de uma edificação através da simulação de células isoladas. Um protótipo de edificação foi simulado com arquivo climático da cidade de São Paulo, permitindo a análise do consumo de energia elétrica com resfriamento (verão) e aquecimento (inverno) do ar interno.

O caso base (Figura 1) representa uma edificação de um pavimento, com 9 zonas (células), sendo 8 periféricas e uma interna, central (zona E). Cada zona possui 4 m de largura por 4 m de comprimento, completando uma planta de 12 x 12 metros para a edificação como um todo. A altura do pé-direito foi mantida em 3 m.

Para simulação do caso base considerou-se a troca de calor entre as paredes internas, que são modeladas no EnergyPlus como duas superfícies de mesmas coordenadas, porém em sentidos contrários, garantindo a conectividade dos objetos, de modo que os mesmos representassem apenas um componente na edificação. A Figura 2 apresenta esquematicamente a parede entre as zonas A e B.

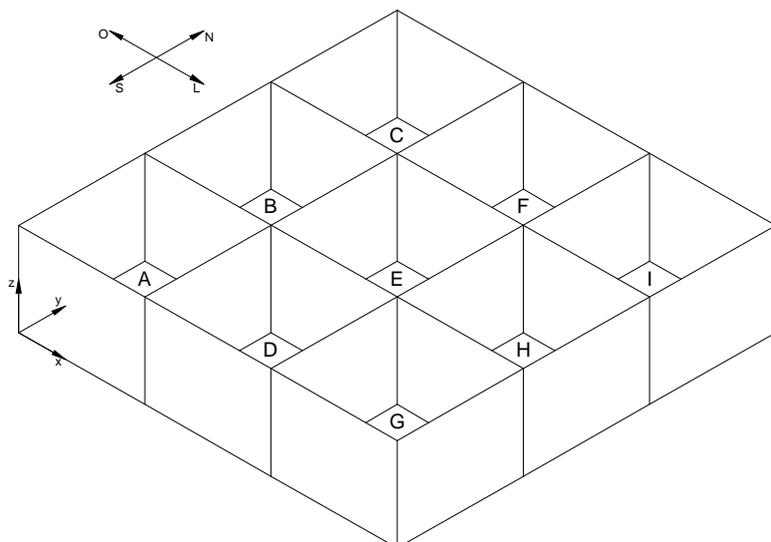


Figura 1 – Zoneamento – Caso base.

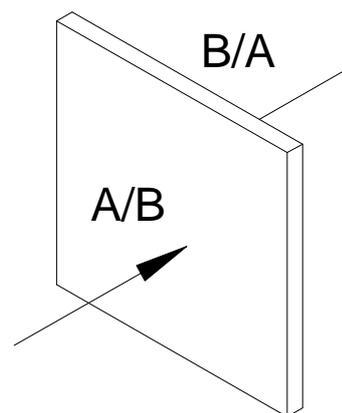


Figura 2 – Superfícies internas conectadas por dois objetos.

Cada zona é atendida individualmente por um sistema de resfriamento de expansão direta e uma resistência elétrica para aquecimento, representando um condicionador de ar de janela ou *split*. A temperatura de controle foi ajustada em 24°C para o resfriamento e 18°C para o aquecimento.

O padrão de uso da edificação, incluindo a operação dos seus sistemas de iluminação e condicionamento de ar, foi definido como o intervalo das 8h às 18h. Considerou-se, apenas para nível de análise, o mesmo padrão de uso em todos os dias do ano, sem diferenciação entre dias úteis, finais de semana e feriados.

Através de simulações prévias, seguindo-se o método BESTEST, adotado pela ASHRAE como norma (ASHRAE Standard 140) para teste e avaliação de programas computacionais para análise energética de edificações (ASHRAE, 2001), pode-se verificar que a temperatura do solo tem grande influência nos cálculos de carga térmica desenvolvidos pelo EnergyPlus. Em virtude dessa influência, no arquivo de entrada do programa há um objeto no qual deve-se inserir a temperatura média mensal do solo. Os dados de temperatura do solo da cidade de São Paulo foram retirados do arquivo climático no formato TMY (Typical Meteorological Year) fornecido na página do EnergyPlus na internet (www.energyplus.gov). A Tabela 1 apresenta os valores de temperatura média mensal do solo a uma profundidade de 0,5 metros, a qual foi considerada em todas as simulações.

Tabela 1 – Temperatura média mensal do solo para a São Paulo – arquivo TMY.

Mês	Temperatura do solo a 0,5m (°C)
Janeiro	21,62
Fevereiro	22,60
Março	22,83
Abril	22,57
Mai	21,18
Junho	19,65
Julho	18,23
Agosto	17,23
Setembro	16,97
Outubro	17,49
Novembro	18,69
Dezembro	20,17

Os modelos (casos) com células isoladas representam um ambiente da edificação de um pavimento, onde a célula possui características semelhantes a uma zona térmica do caso base (dimensões, orientação, materiais, condicionamento de ar), exceto a possibilidade de trocas de calor entre as paredes internas. No EnergyPlus, essa consideração é feita voltando-se a parede para ela mesma. A Figura 3 representa esquematicamente essa condição. Neste caso não há fluxo de calor através da superfície, já que o programa considera o mesmo valor de temperatura superficial em ambas as faces. Porém, o armazenamento de calor no componente continua sendo considerado, através do calor específico, densidade e espessura de cada elemento construtivo.

Como exemplo, a Figura 4 demonstra a célula isolada “A”, contendo duas superfícies em contato com células adjacentes (parede A/D e A/B) e quatro superfícies voltadas ao ambiente externo (paredes oeste e sul, piso e cobertura). Os modelos restantes de células isoladas (B, C, D, E, F, G, H e I) seguem as mesmas configurações do modelo A, alterando-se apenas a posição da célula e as superfícies de contato internas.

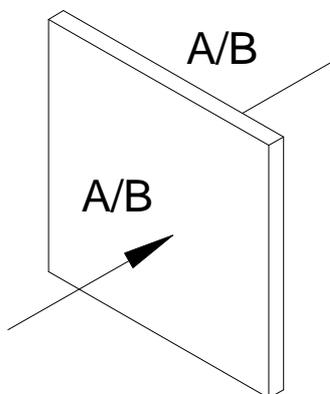


Figura 3 – Superfícies internas conectadas por um objeto.

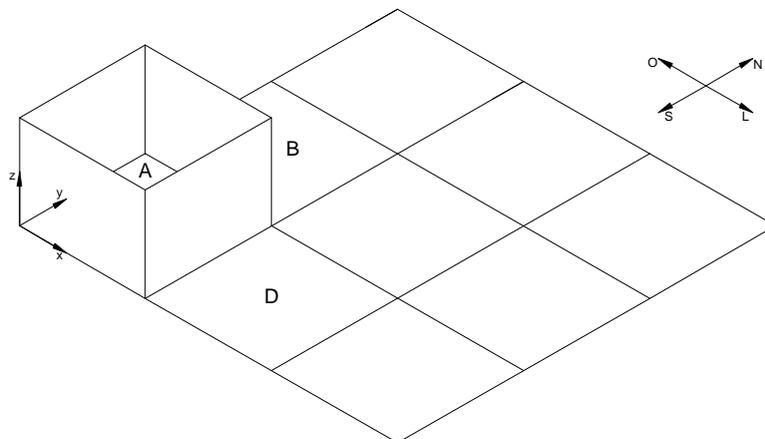


Figura 4 – Célula isolada “A”.

3.3. Casos simulados

Foram simulados 576 modelos, considerando-se casos com carga interna e sem carga interna; e casos com paredes leves e paredes pesadas. Outros casos foram simulados sem considerar o fluxo de calor através do piso e da cobertura, procurando-se representar diferentes tipos de pavimentos de uma edificação com vários andares.

As características das superfícies (paredes, cobertura e piso) foram definidas a partir de edificações comuns brasileiras. Para avaliar a influência da inércia térmica no desempenho térmico da edificação e das células, simulou-se componentes construtivos com diferentes capacidades térmicas, mantendo-se a mesma transmitância térmica entre um modelo e outro (seguindo o modelo de simulação do método BESTEST). As superfícies com baixa capacidade térmica são apresentadas no texto como sendo “leves” e as superfícies com alta capacidade térmica são tratadas como “pesadas”.

Adotou-se paredes leves com transmitância térmica total de $2,28 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e capacidade térmica de $168 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$. Para representar as paredes pesadas foi selecionado um componente construtivo com transmitância térmica total de $2,25 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e capacidade térmica de $445 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$.

As coberturas leves selecionadas apresentam transmitância de $1,93 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e capacidade térmica de $106 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$ e as coberturas pesadas apresentam transmitância térmica total de $1,94 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e capacidade térmica de $451 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$.

O mesmo tipo de piso foi adotado para todos os casos, com transmitância térmica de $4,72 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e capacidade térmica de $355 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$.

As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam as características dos componentes utilizados na construção das superfícies de cada modelo. Os dados de transmitância térmica total apresentados consideram resistência superficial interna de $0,13 \text{ (m}^2.\text{K})/\text{W}$ para paredes e $0,17 \text{ (m}^2.\text{K})/\text{W}$ para a cobertura. Como resistência superficial externa considerou-se $0,04 \text{ (m}^2.\text{K})/\text{W}$ para todas as superfícies, exceto para o piso, que está em contato direto com o solo. Esses valores foram considerados apenas para a apresentação dos dados nas tabelas, a título de comparação. No EnergyPlus, esses dados são calculados durante a simulação a cada passo de tempo, de acordo com as condições de temperatura da superfície e velocidade do ar incidente.

Tabela 2 – Características dos componentes leves.

Parede	Acab. externo	Argamassa de Emboço (2,5 cm)
	Camadas	Ceram Tij 6 fur circ (10 cm)
		Câmara ar fluxo horizontal (2 a 5 cm)
		Ceram Tij 6 fur circ (10 cm)
	Acab. interno	Argamassa de Emboço (2,5 cm)
	U [W/(m ² .K)]	2,28
C _T [kJ/(m ² .K)]	168	
Cobertura	Acab. externo	Telha de fibro-cimento (0,7 cm)
	Camadas	Câmara ar fluxo vert alta emis (> 5 cm)
	Acab. Interno	Laje mista (12 cm)
	U [W/(m ² .K)]	1,93
	C _T [kJ/(m ² .K)]	106

Tabela 3 – Características dos componentes pesados

Parede	Acab. externo	Argamassa de Emboço (2,5 cm)
	Camadas	Tijolo Maciço (10 cm)
	Acab. interno	Argamassa de Emboço (2,5 cm)
	U [W/(m ² .K)]	2,25
	C _T [kJ/(m ² .K)]	445
Cobertura	Acab. externo	Telha de fibro-cimento (0,7 cm)
	Camadas	Câmara ar fluxo vert alta emis (> 5 cm)
	Acab. interno	Laje de concreto (20 cm)
	U [W/(m ² .K)]	1,94
	C _T [kJ/(m ² .K)]	451

Tabela 4 – Características do piso.

Piso	Acab. Externo (contato c/ solo)	Argamassa de reboco (2,5 cm)
	Camadas	Concreto maciço (10 cm)
		Argamassa de reboco (2,5 cm)
	Acab. interno	Piso cerâmico (10 mm)
	U [W/(m ² .K)]	4,72
	C _T [kJ/(m ² .K)]	355

Tabela 5 – Características das cargas internas por zona.

Tipo	Potência [W]	Potência [W/m ²]	Fração radiante
Ocupação	260 (2 pessoas)	16,25	50%
Iluminação	144	9,00	100%
Equipamentos	190	11,87	50%
Total	594	37,12	-

A partir do caso base, foram derivados outros três modelos, representando diferentes tipos de pavimentos em uma edificação:

- sem piso:** desconsiderou-se o fluxo de calor através do piso, procurando-se representar um pavimento de cobertura;
- sem cobertura:** desconsiderou-se o fluxo de calor através da cobertura, procurando-se representar um pavimento térreo;
- sem piso e sem cobertura:** desconsiderou-se o fluxo de calor através do piso e da cobertura, representando um pavimento tipo de uma edificação de 3 ou mais andares.

A hipótese de manter essas superfícies sem fluxo de calor foi adotada tanto para o caso base – com nove zonas térmicas – quanto para as células isoladas.

Todos os modelos foram simulados sem carga interna e com carga interna (37,12 W/m²), permitindo a análise da influência da ocupação, iluminação e equipamentos elétricos no desempenho térmico da edificação. A Tabela 5 apresenta os valores de potência adotados para as cargas internas e a parcela radiante considerada no ganho de calor provocado por cada tipo de carga.

Para verificar se as células representam bem o comportamento térmico e o consumo de energia para cada zona do caso base, comparou-se o consumo com condicionamento de ar para aquecimento e resfriamento de cada célula em relação à zona térmica correspondente. Na análise, considerou-se apenas o consumo de energia elétrica do compressor (resfriamento) ou da resistência elétrica (aquecimento) do sistema de condicionamento de ar, em kWh. O consumo de energia do ventilador não foi considerado na comparação.

4. Resultados

Serão apresentados os resultados detalhados apenas para as simulações dos casos com superfícies de baixa capacidade térmica – paredes e cobertura leves. O comportamento dos modelos com paredes e coberturas de capacidade térmica mais alta seguiu o mesmo padrão dos modelos anteriores. Um resumo dos resultados é apresentado ao final do trabalho.

4.1. Paredes e cobertura leves

A Figura 5 apresenta a variação de consumo anual com condicionamento de ar – resfriamento e aquecimento – das células em relação ao caso base, com paredes e coberturas leves. A Figura 6 demonstra os mesmos casos, porém com carga interna nos ambientes (valores apresentados na Tabela 5).

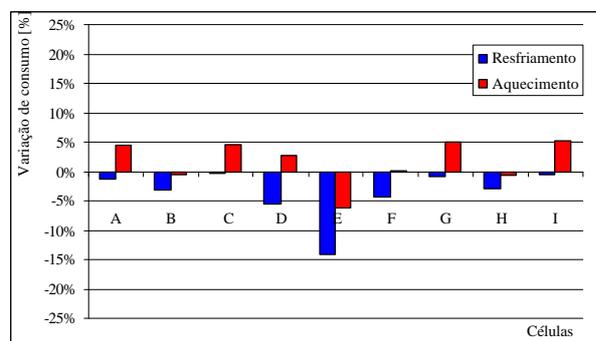


Figura 5 – Variação de consumo entre as células e o caso base, com paredes e coberturas leves.

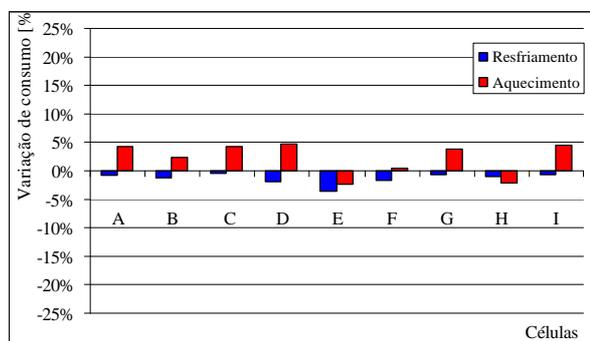


Figura 6 – Variação de consumo entre as células e o caso base, com paredes e coberturas leves e carga interna nas zonas.

Para todas as zonas térmicas, a simulação das células apresentou menor consumo de energia elétrica com resfriamento do que a simulação do caso base, no qual mantém-se o fluxo de calor através das paredes internas. Percebe-se três perfis de variação no consumo (ABC, DEF, GHI), correspondentes à posição das zonas no protótipo – fachada oeste, centro e fachada leste – onde as células B, E e H apresentam as maiores diferenças em cada perfil.

No caso base, os ambientes adjacentes a cada zona também estão sendo condicionados na mesma temperatura da zona analisada e por isso espera-se que o fluxo de calor através das paredes internas seja relativamente baixo. Porém a maior diferença no consumo para a célula central – que não possui paredes externas – indica que as paredes internas estão contribuindo de maneira significativa no ganho de calor proveniente da cobertura e do piso.

No modelo da célula isolada E (central) verificou-se o maior desvio no consumo de energia da célula em relação ao caso base, -14%, pois é a zona delimitada apenas por paredes internas. Para essa zona, enquanto no caso base ocorrem trocas de calor com ambientes adjacentes, na célula isolada ocorre apenas a troca de calor através da cobertura e do piso.

Como era de se esperar, no modelo com alta carga interna as diferenças no consumo com resfriamento diminuíram, confirmando que as células representam melhor os casos com menor influência do envelope na carga térmica total.

As variações de consumo com aquecimento apresentaram valores praticamente constantes para as zonas de canto (ACGI), com duas paredes externas e duas internas, e diferenças mais dispersas para as demais zonas, tanto para o modelo sem carga interna quanto para o modelo com 37,12 W/m² de carga interna em iluminação, equipamentos e ocupação. No modelo sem carga interna, o maior desvio ocorreu na zona E, com uma diferença de -6% no consumo de energia com aquecimento, ou seja, o consumo anual de condicionamento de ar, necessário para garantir a temperatura interna acima de 18°C no período de ocupação foi menor na célula isolada em relação ao caso base. No modelo com alta carga interna a diferença máxima de consumo foi de +5% na célula D.

Percebe-se que as diferenças de consumo com aquecimento permaneceram praticamente iguais nos modelos com e sem carga interna, como demonstram a Figura 5 e 6.

4.2. Paredes e cobertura leves, sem piso

Os modelos onde não é permitido o fluxo de calor pelo piso indicam a influência que a cobertura e as paredes exercem no consumo de energia elétrica para o condicionamento de ar das zonas e células. Neste caso, pretende-se representar um pavimento de cobertura, onde o fluxo de calor pelo piso é baixo, considerando-se que o pavimento inferior fosse condicionado a mesma temperatura.

A Figura 7 apresenta a variação de consumo anual para resfriamento e aquecimento das células em relação às zonas térmicas do caso base, com paredes e coberturas leves, sem fluxo de calor através do piso. A Figura 8 demonstra o mesmo modelo da figura anterior, considerando carga interna (iluminação, equipamentos e pessoas) em cada zona.

Analisando as diferenças no consumo dos modelos sem carga interna, observa-se que as células isoladas apresentam menor consumo com resfriamento do que as zonas correspondentes no caso base. Comparando-se os resultados da Figura 7 com os apresentados na Figura 5 (no qual havia fluxo de calor pelo piso em contato com o solo), observa-se que nos modelos sem fluxo de calor pelo piso as diferenças no consumo com resfriamento são menores entre as células e o caso base, mantendo-se os mesmos perfis. No caso da célula E, a diferença do consumo para o caso base

diminuiu de -14% no modelo com piso para -9% no modelo sem piso. O mesmo comportamento foi observado para os casos com carga interna instalada. Conclui-se que, para o tipo de modelo simulado, ao eliminar o ganho de calor proveniente do solo, o comportamento térmico das células aproxima-se do caso base.

Para os modelos com carga interna instalada, a diferença entre o consumo de energia elétrica no resfriamento das células e das zonas diminuiu, comprovando a menor influência do envelope nestes casos.

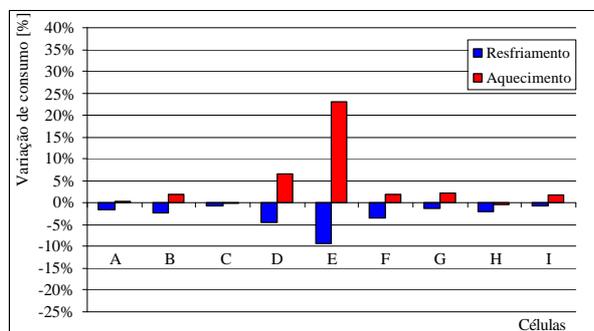


Figura 7 – Variação de consumo entre as células e o caso base, com paredes e coberturas leves, sem piso.

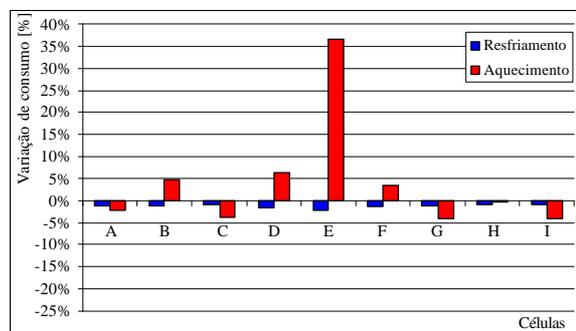


Figura 8 – Variação de consumo entre as células e o caso base, com paredes e coberturas leves, sem piso, e com carga interna.

Nas variações de consumo para aquecimento dos ambientes sem carga interna, obteve-se um desvio máximo de +23% na célula E, indicando que o consumo anual de condicionamento de ar nas células isoladas foi maior que no caso base. Para o modelo com carga interna a célula E apresentou um grande aumento na diferença em relação ao caso base (de 23% para 36%). Comparando os resultados dessas figuras (7 e 8) com os resultados dos modelos com piso, que apresentavam diferenças de -6%, observa-se que o solo exerce forte influência na carga de aquecimento, ou seja, ao evitar o fluxo de calor através do piso, a necessidade de aquecimento aumenta quando não se permite o fluxo de calor entre as zonas. Mesmo com geração de carga interna, a célula E necessitou de maior carga de aquecimento, provavelmente devido à perda de calor pela cobertura nos meses mais frios. Salienta-se que essa zona é a que possui a maior quantidade de paredes internas.

4.3. Paredes leves, sem cobertura

A Figura 9 apresenta a variação de consumo anual para resfriamento e aquecimento das células em relação ao caso base, com paredes leves, sem fluxo de calor através da cobertura. Neste caso, pretende-se representar um pavimento térreo, onde o fluxo de calor pela cobertura é baixo, considerando-se que o pavimento superior fosse condicionado a mesma temperatura. A Figura 10 demonstra o mesmo modelo da figura anterior, mas considerando carga interna (iluminação, equipamentos e pessoas) nas zonas.

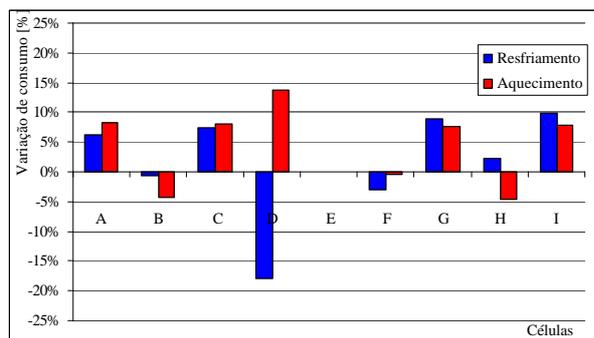


Figura 9 – Variação de consumo entre as células e o caso base, com paredes leves, sem cobertura.

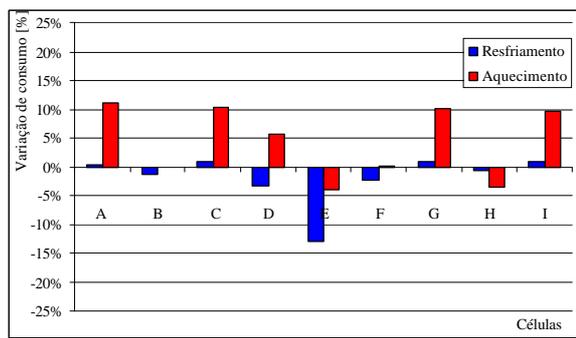


Figura 10 – Variação de consumo entre as células e o caso base, com paredes leves, sem cobertura, com carga interna.

As variações de consumo de energia com resfriamento e aquecimento das zonas no modelo sem carga interna apresentaram mesmo comportamento para as células de canto (ACGI) e dispersos para o restante, onde as diferenças máximas no resfriamento (-18%) e no aquecimento (+14%) ocorreram na célula D. Para o modelo com carga interna o perfil de consumo nas células de canto (ACGI) manteve-se semelhante para aquecimento, porém para resfriamento houve grandes diferenças em relação ao caso sem carga interna, com um valor de máximo de -13% na célula E.

Para o caso sem carga interna, o modelo da célula E não pode ser simulado (tanto para resfriamento quanto para aquecimento), pois o EnergyPlus não realiza o cálculo de carga térmica quando cinco das seis superfícies que compõem o ambiente não permitem o fluxo de calor, impossibilitando a solução do balanço térmico.

Percebe-se que evitando-se o fluxo de calor através da cobertura as diferenças no consumo de energia para se resfriar e aquecer uma célula e uma zona do caso base aumentam, principalmente para as zonas de canto. Esse comportamento indica que no modelo “sem cobertura” o fluxo de calor através das paredes internas é significativo.

4.4. Paredes leves, sem piso e sem cobertura

A Figura 11 apresenta a variação de consumo anual para resfriamento e aquecimento das células em relação ao caso base, com paredes leves, sem fluxo de calor através do piso e da cobertura. Neste caso, pretende-se representar um pavimento tipo, onde o fluxo de calor pelo piso e pela cobertura é baixo, considerando-se que o pavimento inferior e superior fossem condicionados a mesma temperatura. A Figura 12 mostra o mesmo modelo da figura anterior, mas considerando carga interna nas zonas.

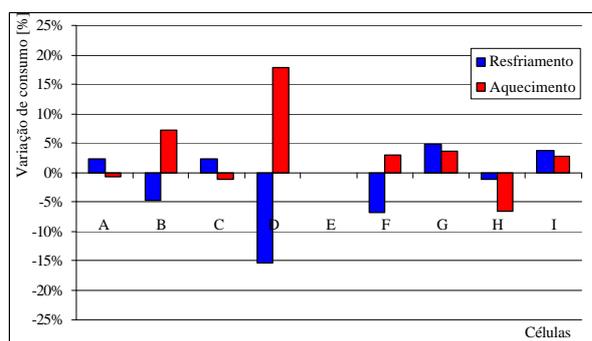


Figura 11 – Variação de consumo entre as células e o caso base com paredes leves, sem piso e sem cobertura.

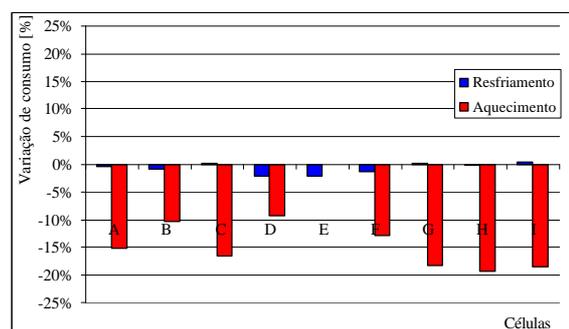


Figura 12 – Variação de consumo entre as células e o caso base com paredes leves, sem piso e sem cobertura, com carga interna.

Para o modelo sem carga interna, percebe-se dois perfis de diferença no consumo (ABC, GHI) para suprir a carga térmica de resfriamento, onde a maior diferença (-16%) ocorre na célula D. Para aquecimento, verificam-se dois perfis de diferença de consumo opostos (ABC, GHI), onde a variação máxima também ocorre na célula D, com valor de +18%.

O modelo da célula E sem carga interna não pode ser simulado (tanto para resfriamento quanto para aquecimento) pois todas as suas superfícies não estavam em contato com o ambiente externo.

No modelo com carga interna percebe-se que as diferenças de consumo de energia elétrica com resfriamento praticamente não existem, porém para aquecimento as variações são significativas. As diferenças entre o consumo com aquecimento das células e do caso base atingiram um máximo de -19% para a zona H, indicando que o fluxo através das paredes internas dos modelos exerce forte influência na carga térmica de cada zona; e que para este caso as células não representam bem o consumo de condicionamento de ar do caso base.

4.5. Análise geral

A Tabela 6 apresenta um resumo das variações máximas de cada modelo simulado, incluindo os casos com paredes pesadas, que não foram apresentados em detalhe neste texto. Salienta-se que todas as análises apresentadas referem-se a simulações com o arquivo climático da cidade de São Paulo (temperatura máxima de 35,0°C, mínima de 8,0°C e média de 19,9°C).

As células com paredes pesadas apresentaram maior diferença no consumo em relação ao caso base do que as células com envelope de menor capacidade térmica (leve), indicando que nesses casos a influência do fluxo de calor entre zonas é geralmente mais significativa na composição da carga térmica total de cada zona.

Em relação ao consumo de energia com resfriamento, os modelos com carga interna (equipamentos, iluminação e pessoas) apresentaram menores variações de consumo, comprovando que o envelope tem maior influência no consumo quando a carga interna é baixa ou nula. Em relação às cargas de aquecimento, os modelos apresentaram diferenças significativas, o que dificulta a estimativa do consumo através das células.

Os resultados mais críticos entre as simulações de um ambiente isolado em relação a uma edificação inteira ocorrem nos modelos com maior inércia térmica, com variações absolutas de 21% para resfriamento e 49% para aquecimento. Para edificações com componentes de menor inércia térmica, tem-se os máximos de 18% para resfriamento e 36% para aquecimento.

De modo geral, para os modelos simulados neste trabalho pode-se afirmar que as células não representam com precisão o consumo de energia elétrica em condicionamento de ar. Porém, novas análises estão sendo feitas e outros parâmetros do modelo estão sendo variados para se determinar em quais condições o uso de células poderia reduzir o tempo gasto na modelagem de edificações para análise de desempenho térmico, mantendo a precisão nos resultados.

Tabela 6 – Diferenças máximas no consumo anual de energia elétrica em condicionamento de ar das células e zonas do caso base.

Comparação de diferença de consumo anual [kW]		Resfriamento						Aquecimento					
		Leve			Pesado			Leve			Pesado		
		Célula	kW	%	Célula	kW	%	Célula	kW	%	Célula	kW	%
Sem Carga interna	caso base	E	-22,8	-14%	E	-34,4	-21%	E	-0,7	-6%	E	-1,1	-10%
	sem piso	E	-36,2	-9%	E	-53,7	-14%	E	6,2	23%	E	7,8	30%
	sem cobertura	D	-3,8	-18%	D	-7,4	-18%	D	1,5	14%	D	1,7	14%
	pvto tipo	D	-18,3	-15%	D	-25,7	-16%	D	4,5	18%	D	5,4	20%
Com Carga interna	caso base	E	-27,5	-4%	E	-40,9	-5%	D	0,2	5%	I	0,3	7%
	sem piso	E	-26,3	-2%	E	-36,9	-3%	E	5,3	36%	E	6,8	49%
	sem cobertura	E	-55,2	-13%	E	-83,6	-18%	A	0,4	11%	C	-0,2	-12%
	pvto tipo	E	-17,0	-2%	E	-44,1	-5%	H	-2,2	-19%	H	-1,9	-18%
		máx	-2%				-3%			36%			49%
		mín	-18%				-21%			-19%			-18%
		méd	-10%				-13%			10%			10%

5. Conclusões

Este trabalho apresentou uma comparação entre o consumo de energia elétrica no condicionamento de ar de células isoladas e zonas térmicas específicas de um modelo de edificação. As simulações foram desenvolvidas no programa EnergyPlus, com arquivo climático da cidade de São Paulo, permitindo análise do consumo de energia com aquecimento e resfriamento. Através deste estudo pretendia-se testar a possibilidade de se desenvolver a análise energética de uma edificação através da simulação de células isoladas, que representassem suas zonas térmicas. Desse modo, o tempo gasto com a modelagem da edificação poderia ser reduzido à medida que apenas algumas células seriam modeladas e o consumo poderia ser obtido pela multiplicação dos resultados pela quantidade de células similares na edificação.

Testou-se a influência da capacidade térmica de paredes e coberturas no comportamento das células, além da representação das condições de um pavimento de cobertura, térreo e tipo, procurando-se avaliar a utilização de células na simulação de uma edificação com vários andares.

A comparação entre o consumo de energia com condicionamento de ar das células e das zonas do caso base, que permitia o fluxo de calor através das paredes internas, mostrou diferenças significativas tanto para os modelos com baixa capacidade térmica quanto para os modelos com paredes e cobertura de capacidade térmica mais alta, onde obteve-se diferenças de até 49%. Para os casos com carga interna instalada as diferenças foram menores comprovando que a influência do envelope nestes casos é mais baixa.

As células que representavam as zonas com maior quantidade de paredes internas foram as que apresentaram maior dispersão nas diferenças entre consumo das células e do caso base, indicando que há uma influência significativa do fluxo de calor entre zonas na composição de carga térmica total de cada zona. Verificou-se que as células centrais, embora não tenham paredes externas, sofrem influência significativa das células adjacentes, piso e cobertura, dependendo muito do modelo simulado.

De modo geral, para os modelos simulados neste trabalho as células não representaram com precisão o consumo de energia elétrica em condicionamento de ar. Porém, novas análises estão sendo feitas e outros parâmetros do modelo serão testados para se determinar em quais condições o uso de células poderia reduzir o tempo gasto na modelagem de edificações para análise de desempenho térmico e energético.

A hipótese da simulação de células foi testada no programa EnergyPlus, podendo também ser aplicada a outras ferramentas de simulação. Realizando-se os testes com esse programa específico identificou-se grande influência das zonas adjacentes no desempenho térmico de um ambiente. O mesmo comportamento é esperado através da simulação em outros programas.

Referências Bibliográficas

BAZJANAC, V. Acquisition of building geometry in the simulation of energy performance. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 7, 2001, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: IBPSA, 2001, p. 305-311. Disponível em: <<http://www.ibpsa.org>>

CRAWLEY, D. B. et al. EnergyPlus: Energy Simulation Program. **ASHRAE Journal**. Atlanta: ASHRAE, 2000, v. 42, p. 49-56.

DÉQUÉ, F.; OLLIVIER, F.; POBLADOR, A. Grey boxes used to represent buildings with a minimum number of geometric and thermal parameters. **Energy and Buildings**. [S.l.]: Elsevier, 2000. v. 31, p. 29-35.

DONN, M. R. A survey of users of thermal simulation programas. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 5, 1997, Prague. **Proceedings...** Prague – Czech Republic: IBPSA, 1997. CD-ROM. Disponível em: <<http://www.ibpsa.org>>

ELLIS, M. W.; MATHEWS, E. H. A new simplified thermal design tool for architects. **Building and Environment**. 2001, v. 36, p. 1009-1021.

KOSONEN, R.; SHEMEIKKA, J. The use of a simple simulation tool for energy analysis. In: BUILDING SIMULATION, 5th, 1997, Prague. **Proceedings...** Prague – Czech Republic: IBPSA, 1997. CD-ROM. Disponível em: <<http://www.ibpsa.org>>

WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. The use of simplified weather data to estimate thermal loads of non-residential buildings. **Energy and Buildings**. [S.l.]: Elsevier, 2004, v. 36, p. 847-854.

WILDE, P.; VOORDEN, M. Providing computational support for the selection of energy saving building components. **Energy and Buildings**. [S.l.]: Elsevier, 2004, article in press.

WITTCHEM, K. B.; JENSEN, S. O.; THOMSEN, K. E. Automatic generation of complex simulation models of buildings with solar heating systems. In: BUILDING SIMULATION, 4, 1995, Madison. **Proceedings...** Madison – United States: IBPSA, 1995. p. 403-409. Disponível em: <<http://www.ibpsa.org>>

BUILDING ENERGY ANALYSIS THROUGH SIMULATION OF CELLS

Samuel Ribeiro Gosch; Fernando Simon Westphal; Roberto Lamberts

Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Civil
Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE)
Campus Universitário – Trindade – Cx. Postal 476 CEP 88040-900 Fone: (48) 3315184
samuel@labeee.ufsc.br; fernando@labeee.ufsc.br; lamberts@ecv.ufsc.br

Abstract. This work evaluates the estimative of the energy consumption of a building through individual simulation of its thermal zones. The EnergyPlus program was used as the computational tool in the analysis. The hypothesis being tested is the possibility to estimate the global electricity consumption of a building by simulation of cells. The base case is a one-storey building, with 9 zones: 8 perimeters and 1 central zone. Constructive components commonly used in Brazil were adopted to represent the building envelope, allowing the thermal flux through internal walls (partitions), that is, the heat exchange between adjacent zones. A direct expansion air conditioner for cooling and an electric resistance for heating, with set points of 24°C and 18°C, respectively, were inserted in each zone. The simulations were performed with weather file of Sao Paolo, allowing the electricity consumption analysis for cooling and heating. The cells were simulated in order to represent each thermal zone of the base case, assuming no thermal flux through internal partitions. The higher differences between energy consumption estimated for cells and the base case were obtained for those thermal zones with higher number of partitions, indicating a significant influence of the thermal flux between adjacent zones in the thermal load of each zone. In general, the cells did not provide accurate estimative of the electric energy consumption for air-conditioning system of the prototypes analysed in this work. Differences up to 49% were achieved between the annual electricity consumption of the air conditioner of cells and the base case. However, other parameters are being tested in order to specify the conditions where the use of cells could improve the building simulation process and minimize the time spent during modelling phase.