

# Recomendações para o desenvolvimento de uma ferramenta de suporte às primeiras decisões projetuais visando ao desempenho energético de edificações de escritório em clima quente

*Recommendations for the development of a tool for supporting early design decisions for the energy performance of office buildings in hot climates*

Aldomar Pedrini  
Steven Szokolay

## Resumo

**E**sse artigo apresenta uma proposta para estimar o impacto das decisões arquitetônicas sobre o consumo de energia elétrica durante as primeiras fases do projeto arquitetônico: programa e esboço. A proposta considera as primeiras decisões como as mais importantes e por isso oferece uma ferramenta que pode representar inúmeras soluções de fachada e layout do esboço. Essa ferramenta se baseia numa interface gráfica associada a um banco de dados, resultado da simulação de modelos originalmente criados para representar os projetos de edificações de escritórios de Brisbane, Austrália (clima quente e úmido no verão e temperado no inverno). O banco de dados é formado por resultados de consumo total e uso final de energia elétrica de aproximadamente 38.000 simulações formadas pela combinação de 11 variáveis estrategicamente selecionadas: orientação geográfica, profundidade de sala, pé-direito, fração de janela na parede, ângulo vertical do sombreamento externo, ângulo horizontal do sombreamento externo, tipo de vidro das aberturas, características das paredes, uso de iluminação natural com controle de cortinas, tipos de ventilação e eficiência da instalação predial. A interface gráfica permite o estudo do efeito combinado de variáveis, de forma qualitativa e quantitativa. A estimativa obtida pelo sistema é instantânea, e o tempo de consulta pode ser reduzido a poucos segundos.

**Palavras-chave:** Desempenho Térmico. Projeto. Energia. Arquiteto.

## Abstract

*This paper introduces a method to estimate the influence of architectural design decisions on the building energy performance, during the early stages of the design. The study assumes that early design decisions are the most important and therefore suggests a method of assessment that is non-specific to the whole building geometry although may represent multiple forms and layouts. The tool is based on a graphic interface that is linked to a database, which as initially created to represent the office buildings of Brisbane Australia (warm humid summer and mild winter). The database consists of results of total and end-use electrical energy consumption of approximately 38 000 combinations of 11 variables: geographic orientation, room depth, ceiling height, window-wall ratio, vertical shading angle, horizontal shading angle, glass type, wall construction, day lighting and blinds control, ventilation type and efficiency of building services. The graphic interface allows the qualitative and quantitative study of combined effect of variables and the estimate of the design's performance to be carried out. Due to the instantaneous access to the data-base by the interface, the consultation takes only a few seconds.*

**Keywords:** Thermal Performance. Project. Energy. Architect.

Aldomar Pedrini  
Departamento de Arquitetura e  
Urbanismo  
Universidade Federal do Rio Grande do  
Norte  
Campus Universitário  
Lagoa Nova  
CEP: 59072-970  
Natal - RN - Brasil  
Tel.: (84) 215-3722  
E-mail: apedrini@ufrnet.br

Steven Szokolay  
Department of Architecture, The  
University of Queensland, Brisbane,  
4072, Australia  
E-mail: s.szokolay@mailbox.uq.edu.au

Recebido em 24/05/04  
Aceito em 07/11/04

## Introdução

As ferramentas computacionais com ênfase na análise do desempenho térmico e energético de edificações apareceram no mercado mundial de software há mais de uma década. Embora muitas delas sejam orientadas a arquitetos, continuam longe dos escritórios de arquitetura e, quando usadas no projeto de edificações, geralmente são operadas por consultores, como engenheiros e físicos. Quando isso acontece, os consultores freqüentemente deixam de participar das primeiras fases do projeto e passam a atuar nas fases em que o projeto está detalhado. Entretanto, as primeiras decisões arquitetônicas são as mais importantes e por isso deveriam ser tomadas da forma mais consciente possível. Do contrário, o melhoramento do projeto se torna limitado porque as fases de detalhamento apresentam inúmeras limitações quanto a alterações. Várias causas contribuem para essa situação, como o custo de aquisição e operação dessas ferramentas, o nível de compromisso do arquiteto com a questão energética, a inexistência de códigos e normas de eficiência energética, a falta de conhecimento do cliente e muitas outras. Porém, um dos motivos mais evidentes é o hiato existente entre o processo de projeto e a operação das ferramentas, que é o assunto principal deste artigo.

## O processo projetual

Inicialmente, não há uma seqüência de ações que possa ser adotada como representativa do desenvolvimento do projeto arquitetônico (PEDRINI, 2003). A alternativa encontrada para referenciar as fases de projeto para efeito de apreciação do desempenho energético consiste na adoção do plano de trabalho proposto pelo Royal Institute of British Architects (RIBA), que pode ser entendido como a descrição de produtos do processo (LAWSON, 1990). Esse plano tem uma estrutura linear que mais se assemelha a um mapa de tomada de decisões (Quadro 1), e sua estrutura é similar à adotada pelo The American Institute Of Architects (AMERICAN, 1999). Dessa forma, é possível prever ações estrategicamente importantes que podem ocorrer e assim prover o suporte adequado.

A partir do reconhecimento das fases, torna-se possível sugerir abordagens compatíveis com as tomadas de decisões. Como desdobramento da proposta original em “Energetics in Design” (SZOKOLAY, 1984), é possível categorizar quatro momentos e associar as tarefas,

informações necessárias, tipos de ferramentas e o produto gerado (Figura 1).

A primeira fase consiste no entendimento do programa e de sua compatibilidade com as informações que precedem o projeto arquitetônico, como clima, limitações físicas do terreno, código de obras, plano diretor e projetos anteriores de natureza similar. O emprego de recomendações genéricas, avaliações qualitativas como a “regra do polegar”<sup>1</sup>, de máscaras solares (MARSH, 2001), da Tabela de Mahoney, e de métodos que empregam a carta psicrométrica para identificar as estratégias bioclimáticas é o mais adequado. Entre estas, destacam-se o Climate Analysis (LI, 1991), o Analysis (LAMBERTS *et al.*, 2003), ambos baseados no método da carta psicrométrica de Givoni (1992), o Weatool (MARSH, 1991) e o Archipak (SZOKOLAY, 1995), ambos baseados no Método de CPZ (Zonas Potenciais de Controle). Esses métodos permitem identificar as estratégias mais apropriadas e estimar o possível campo de soluções. Geralmente essa fase é repleta de hipóteses e diálogos do tipo “se... então...”. Essa fase deve produzir recomendações que alimentarão o processo criativo dos projetistas. Como mencionado em Szokolay (1984), “se questões de energia são ignoradas nessa fase, o projeto final poderá ser comprometido – se as questões aparecem apenas nas próximas fases, arrisca-se deformar o projeto”.

A segunda fase é a do esboço e consiste em testar, refinar e selecionar as hipóteses levantadas anteriormente, que podem ser usadas no projeto arquitetônico. Embora seja polêmico o uso de métodos científicos como o de análise e síntese (PEDRINI, 2003), essa fase é a mais apropriada para conhecer os efeitos térmicos sobre a forma e o sistema construtivo, que podem ser obtidos, em teoria, por programas simplificados de simulação, que fazem uso de simplificações condizentes com as informações contidas no esboço. O produto visado é a proposta do projeto arquitetônico praticamente finalizada, pois esta alimentará os demais projetistas. Desde as primeiras hipóteses, os critérios de energia devem considerar os demais, como circulação, estrutura, viabilidade de construção e estética.

---

<sup>1</sup> ou “rule of thumb” - é uma classificação baseada em positivo ou negativo.

Estágio	Objetivo e decisões	Tarefas	Terminologia usual
A. origem	preparar um perfil geral dos requerimentos programar as futuras decisões	organizar as necessidades do cliente para definir o programa	PROGRAMA
B. possibilidades	suprir o cliente com uma apreciação e recomendações para determinar como o projeto deve evoluir	estudar as necessidades dos usuários, condições do sítio, planos, projeto, custos, etc., para atender às decisões	
C. propostas gerais ou programa	determinar as abordagens gerais que levem à definição do layout, do projeto e da construção para obter a aprovação do cliente e seguir com o relatório	definir o programa continuar os estudos anteriores para chegar às decisões de custo, problemas técnicos, planos e projeto	ESBOÇOS
D. esboço	completar o programa e decidir por propostas, incluindo a definição do projeto, o método de construção, especificações e custos para a obtenção de todas as aprovações	concluir o projeto geral pelo arquiteto fazer o projeto preliminar pelos engenheiros preparar plano de custos e relatório explicativo completo	
E. detalhamento	tomar as últimas decisões relacionadas com o projeto, especificações e custos	fazer o desenho completo de cada parte e componente do edifício	DESENHOS

Quadro 1 - Plano geral de trabalho para desenvolvimento de projetos (ROYAL INSTITUTE OF BRITISH ARCHITECTS, 1973)

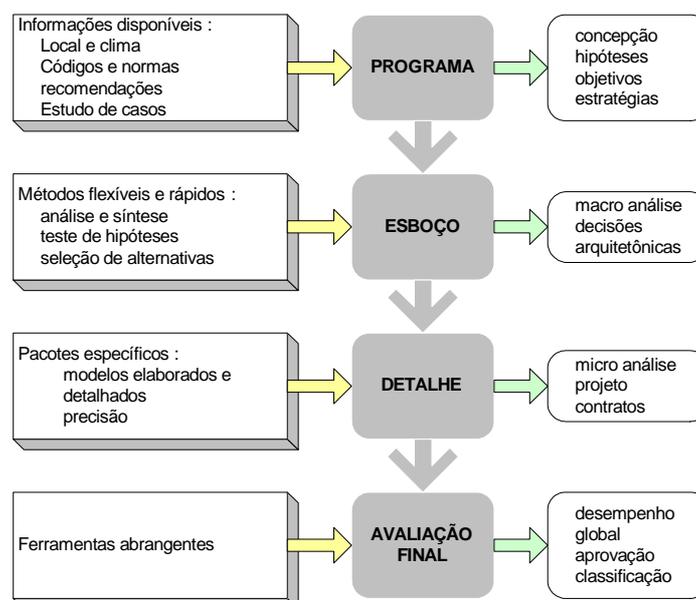


Figura 1 - Fases do projeto arquitetônico e abordagens recomendadas

A terceira fase compreende o detalhamento do projeto e, conseqüentemente, a tomada de todas as decisões de projeto, como dimensionamento de aberturas, protetores solares e propriedades termofísicas dos sistemas construtivos. Por isso, as decisões devem ser amparadas pela quantificação de seus impactos sobre o desempenho energético. As ferramentas empregadas para esse fim podem ser mais abrangentes, como o DOE2.1E, o EnergyPlus, o Esp-r e muitos outros (TOOLS DIRECTORY, 2001), ou podem ser mais específicas, as quais permitem a análise detalhada de questões como o fluxo de calor por uma esquadria (Therm), a distribuição de luz por uma abertura (Radiance) e o fluxo de ar ascendente num poço de ventilação (Phoenics), entre outras. O objetivo final é produzir o projeto detalhado, o qual deve servir de base para a formulação de vários tipos de contratos.

A última fase é a de avaliação final, a qual consiste da predição do desempenho energético final para efeito de aprovação não apenas do cliente, mas também das autoridades que regulam a aprovação do uso da edificação segundo os códigos de eficiência energética (LAMBERTS *et al.*, 1997). Nesse caso, podem ser usadas ferramentas reconhecidas pelas mesmas autoridades. Em situações que os resultados são insatisfatórios, recomendam-se a análise detalhada para identificar quais são as deficiências do projeto e a volta à “prancheta”.

## As ferramentas

A oferta de programas de simulação para quantificação do desempenho energético tem aumentado e tem sido diversificada em termos de alcances. Entretanto, essas ferramentas apresentam várias limitações, conforme discussão a seguir.

(a) Operação. Evoluções nas interfaces têm produzido ferramentas mais amigáveis, mais resistentes aos erros dos usuários e mais rápidas para modelar. Os usuários do DOE-2.1E devem recordar o processo lento e cansativo de modelagem: uma simples parede é caracterizada por um texto que indica as coordenadas x, y e z de um dos cantos, a altura, a largura, o azimute e a inclinação em relação ao plano horizontal. A modelagem não apresenta recursos de visualização e é amparada por mais de 3.000 páginas de manual. Obviamente, o aprendizado desse tipo de programa é lento e desgastante. Em comparação, programas mais recentes, como o VisualDOE<sup>3</sup>,

<sup>3</sup> Interface gráfica que emprega o mesmo algoritmo do DOE-2.1E.

permitem que um iniciante simule seu primeiro caso na primeira hora, porém são muito mais limitados na reprodução geométrica;

(b) Modelagem. A modelagem de um projeto arquitetônico, por menor que seja o edifício, demanda a caracterização de centenas de variáveis associadas à forma e ao layout, ocupação, sistemas construtivos, sistema artificial de iluminação e ar condicionado, entre outros. O número aparentemente excessivo de declarações se torna um empecilho, pois a reação de alguns usuários é a de se concentrar nas variáveis de sua área. Isto é, um arquiteto tende a detalhar a geometria de uma forma exagerada, enquanto a caracterização do sistema predial é subestimada. De forma análoga, um projetista de ar condicionado detalha o sistema predial e simplifica a geometria. Como é inviável caracterizar todas as variáveis com o mesmo destaque, o procedimento mais apropriado é se concentrar preferencialmente nas variáveis que mais influenciam o desempenho da edificação. Entretanto, as ferramentas não trazem nenhum recurso para contornar essa dificuldade, e o usuário passa a depender de sua experiência e entendimento;

(c) Análise de resultados. Observa-se que iniciantes fazem uso de programas sem necessariamente entender as considerações embutidas no algoritmo e que a presença de erros está associada ao fato de se conseguir um resultado ou não. Isto é, se se conseguiu obter um resultado, assume-se que não há erros. Por isso é importante que as ferramentas passem a adotar parâmetros de referência de desempenho, como consumo anual de energia por área<sup>4</sup> ou a classificação por faixas de consumo (BANNISTER, 1999); e

(d) Compatibilidade. Observa-se que a operação dessas ferramentas é mais compatível com a fase de detalhamento do que com a de esboço, haja vista que a modelagem demanda informações apenas disponíveis em projetos detalhados. Além disso, há mais de vinte anos prega-se o uso de recomendações de caráter qualitativo nas primeiras fases do projeto, e de recomendações quantitativas nas fases de detalhamento (BURBERRY, 1983). Entretanto, autores acreditam que as melhores oportunidades de melhorar a eficiência energética de uma edificação ocorrem nas primeiras fases de projeto (GOULDING; LEWIS, 1992). Certamente seria muito mais interessante usar métodos quantitativos desde o início, pois a decisão arquitetônica deveria ser precedida pela simulação.

<sup>4</sup> O consumo anual por área construída (kWh/m<sup>2</sup>) é o índice mais usado para classificar uma edificação.

Porém, fica a questão: como simular um projeto que ainda não foi criado?

## Simulações na prática arquitetônica

As experiências pessoais e conversas informais com consultores da área como o Dr. Willrath<sup>5</sup>, entre outros, também apontam para um uso tardio das ferramentas de quantificação. Usualmente, arquitetos procuram por suporte na avaliação do desempenho da edificação durante a fase de detalhamento do projeto, quando há poucas possibilidades de mudanças. Nesse estágio, o projeto está praticamente desenvolvido, e as poucas alternativas, geralmente, estão relacionadas com os sistemas construtivos e os componentes do sistema predial.

O desenvolvimento do projeto do edifício Rijnland destaca as diferenças de abordagens entre arquitetos e consultores de eficiência energética (WILDE *et al.*, 2001). Os autores identificam cinco fases de projeto: programa, concepção, esboço, detalhamento e construção. O artigo destaca a importância de integrar o consultor da área de energia nas primeiras fases do projeto para que este traga as estratégias de redução de consumo de energia o mais cedo possível, ao invés de relegá-las às fases finais. Os autores reconhecem que há pouquíssimas evidências de consultores que oferecem alternativas de projeto baseadas na análise quantitativa, porque as simulações são empregadas para confirmar hipóteses em vez de influir nas decisões. Na análise de projeto, arquitetos e consultores afirmam que a maioria das medidas de redução do consumo de energia é selecionada durante a concepção, enquanto consultores afirmam que a maioria das medidas é selecionada no programa (Figura 2). Quando questionados a respeito das fases em que as ferramentas computacionais são usadas, constatou-se que elas são usadas em tarefas desde as primeiras, porém tomam certo tempo para serem finalizadas. Enquanto os arquitetos demonstram preferência em *poder* usá-las na fase de esboço, os consultores demonstraram usá-las já nas primeiras fases (Figura 3). Entretanto, de sete análises divulgadas, apenas uma foi concluída.

Balcomb et al. (2000) têm um entendimento bastante representativo para a prática. Os autores identificam que a primeira junção crítica está na transição da fase de programa para a fase do esboço: “o uso mais eficiente do talento do projetista será feito se ele proceder com o projeto uma vez que as decisões que afetam a eficiência energética já tenham sido feitas”. A afirmação considera que as estratégias devem ter sido decididas na fase de programa e esboço, estando o próximo passo em seus respectivos desenvolvimentos. Por exemplo, as primeiras fases decidem pelo uso de sombreamento externo, e a fase de detalhamento trabalha na sua descrição pormenorizada. Porém, a habilidade do arquiteto define a eficácia e a estética do recurso.

A experiência protagonizada com o arquiteto Dr. Ken Yeang é mais elucidativa. Durante o concurso para o projeto do Beijing World Science & Trade Centre (Beijim, China), em 2002, houve a colaboração técnica do autor (PEDRINI, 2003) nas duas semanas que precederam a data de entrega do projeto. O programa consistia em projetar 220.000 m<sup>2</sup> de área construída em 61.000 m<sup>2</sup> de terreno, composto de sete torres, sendo quatro de 28 andares e três de 14 andares, as quais acolheriam atividades de escritório, residências, hotel e lojas. Os dois encontros com a equipe de projetistas da T. R. Hamzah & Yeang aconteceram na fase de programa e ficou clara a preocupação dos profissionais em obter recomendações projetuais apropriadas para o clima. Embora houvesse questões gerais sobre as estratégias bioclimáticas, também havia muitas questões específicas sobre geometrias apropriadas para o clima, como as melhores relações de abertura nas fachadas e de protetores solares, os tipos de vidros e os sistemas construtivos mais adequados. Era notório o desconforto do projetista que iniciava o esboço sem essas informações. Nos demais contatos realizados por e-mail, durante a fase de esboço, as questões se refinaram: buscavam por recomendações específicas ou visavam a testar hipóteses já assumidas (Quadro 2), segundo esboço da Figura 4.

<sup>5</sup> Consultor de energia em Brisbane (Austrália) e autor do programa BERS (WILLRATH, 1998).

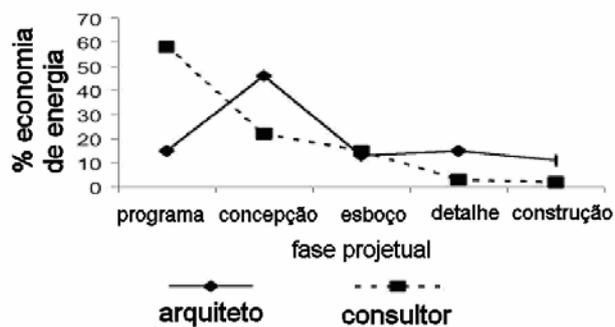


Figura 2 - Adoção de medidas de economia segundo as fases de projeto

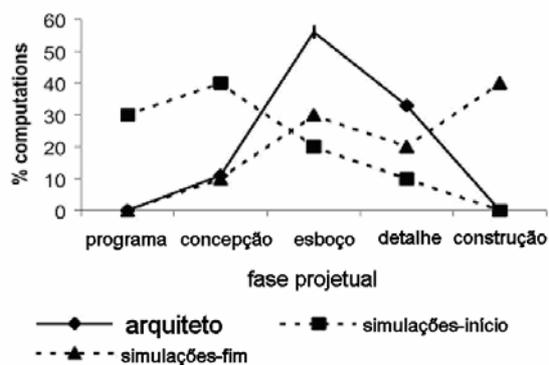


Figura 3 - Fases em que ferramentas são usadas para avaliar o consumo de energia

Recomendações	Testes das hipóteses
transmitância térmica da envoltória e fator solar das aberturas para permitir aquecimento solar nas fachadas sul durante os períodos frios	fachada sul com 50% de fração de aberturas nas fachadas
quantidade máxima de iluminação natural nos ambientes	fachada norte com 20% de fração de aberturas nas fachadas com quebra-vento para proteção do vento frio
possibilidade de uso de ventilação natural nos espaços de uso comum (praças, entradas e jardins) durante o verão	fachada sul com proteções horizontais para sombrear o sol de verão
uso de ventilação natural parcial nos períodos de outono e primavera	fachadas leste e oeste com proteções solares verticais
aquecimento durante o inverno	vidro claro na fachada norte e vidro duplo nas demais

Quadro 2 - Questões projetuais da fase de esboço

A ferramenta adotada para analisar as estratégias foi o programa VisualDOE 3.0 (ELEY ASSOCIATES, 2000), que corresponde à terceira geração de uma interface gráfica para o algoritmo do DOE-2.1E (SIMULATION RESEARCH GROUP, 2000). Apesar da flexibilidade da ferramenta, ficou evidente que a determinação de recomendações para a fase de programa não poderia ser concluída em duas semanas. Quanto à fase de confirmação das hipóteses, o programa apresentou uma série de erros na interface, a qual gerava modelos com erros ou com alterações indesejáveis. Apesar da colaboração dos programadores, surgiam novos erros de programação na medida em que outros eram corrigidos. Somente as versões lançadas um mês após a expiração do prazo-limite de submissão do projeto corrigiram os erros, ou seja, a prometida colaboração não foi consumada e o projeto foi concebido segundo a experiência e intuição dos projetistas.

Além das falhas do programa, essa experiência evidenciou a necessidade de um método de determinação de recomendações em tempo exíguo, que viabilizasse a simulação de muitos casos: as primeiras estimativas apontavam a necessidade de simular pelo menos 20.000 casos. Entretanto, experiências anteriores no LabEEE<sup>6</sup>, com a versão do VisualDOE 2.5, mostraram que poucas centenas de simulações poderiam consumir mais de um mês de trabalho. Mesmo com a otimização da modelagem, a exemplo do desenvolvimento do LTV (PEDRINI; HYDE, 2001), a execução de 23.000 casos havia consumido aproximadamente quatro meses.

Acredita-se que os testes das hipóteses (provenientes dos esboços, Figura 4) poderiam ser realizados em tempo desde que houvesse informações suficientes para adotar generalizações apropriadas para modelar as rotinas de uso e as instalações prediais.

Quanto à projeção, o processo foi conduzido de forma consciente e com destacado grau de conhecimento, ainda que limitado pelo suporte. Embora Yeang (1999) tenha se popularizado por suas recomendações e aplicação de “princípios”, sua equipe buscou a quantificação do impacto das estratégias e das decisões arquitetônicas, as quais poderiam ser respondidas apenas com a investigação científica, que corresponde ao método de análise e síntese, freqüentemente refutada por arquitetos (PEDRINI, 2003). Na realidade,

suspeita-se que procedimentos similares tenham sido adotados em outros projetos. Por exemplo, o projeto do Menara Messiniaga se baseou no emprego de equações paramétricas do Método OTTV<sup>7</sup>, no final da década de 80 (YEANG, 1996).

## Método de suporte às primeiras fases de projeto

A experiência com o escritório T. R. Hamzah & Yeang foi oportuna e motivou a procura por um método para assistir futuros projetos similares. Sua influência está presente nas abordagens que seguem.

### Determinação dos modelos

Foi decidido que o método empregaria a simulação sistemática de células, tal qual os métodos LT (BAKER, 1994) e LTV (PEDRINI; HYDE, 2001). Células têm sido usadas no cálculo de desempenho de edificações desde que a simulação computacional se tornou disponível (LOUDON, 1968; BALCOMB; MCFARLAND, 1978). Seu emprego implica em simplificações como a inobservância da transferência de calor pelas paredes internas e do ganho acumulado de calor em zonas localizadas nos cantos (as que apresentam mais de uma parede externa). Porém, o emprego de células apresenta as seguintes vantagens:

(a) Ênfase no aproveitamento de recursos passivos: de acordo com o método LT (BAKER, 1994), o potencial de redução de energia está relacionado com a existência de zonas passivas ou híbridas<sup>8</sup>. O LTV evidenciou que a profundidade de sala é uma das principais decisões de projeto com influência no desempenho energético em clima quente, haja vista que está relacionado com o aproveitamento de recursos passivos. De fato, as recomendações de volumetria para um determinado tipo de edificação estão diretamente associadas ao desempenho dessas zonas híbridas: zonas com baixo desempenho sugerem edificações compactas, e zonas com alto desempenho energético sugerem edificações alongadas, que maximizam o contato com o exterior (PEDRINI; LAMBERTS, 2003). Dessa forma, há células ativas e híbridas;

<sup>6</sup> Laboratório de Eficiência Energética de Edificações/Departamento de Engenharia Civil/UFSC: [www.labeee.ufsc.br](http://www.labeee.ufsc.br).

<sup>7</sup> Método do valor de transferência térmica global, obtido de equações.

<sup>8</sup> Emprego combinado de recursos passivos e ativos, a exemplo de iluminação artificial complementando a natural.

(b) Compatibilidade com a fase de programa: a maior dificuldade para proceder às simulações é a definição dos modelos. A intenção é gerar resultados que influenciarão o projeto, entretanto as simulações são realizadas quando o projeto não foi esboçado ainda, ou seja, esses modelos devem ser “abertos”, pois do contrário poderão viciar as recomendações. Geralmente adotam-se formas representativas, a exemplo da proposta de código de eficiência energética australiana (AUSTRALIAN BUILDING CODES BOARD, 2001b), que sugere quatro modelos básicos e poucas variações de envoltória (Figura 4). Em comparação, a adoção de células enfatiza a recomendação diferenciada, pois distingue zonas com diferentes orientações geográficas. Isto é, ela respeita o preceito básico que é a observância da orientação das zonas, sem que seja necessário incorrer na caracterização da forma da edificação. Nesse caso, a forma pode ser uma consequência da envoltória, e não apenas o contrário;

(c) Potencial de representatividade: o uso combinado de células permite representar inúmeras geometrias externas a partir de uma única célula (Figura 5), assim como representar geometrias internas a partir da combinação de outros tipos de células (Figura 6), tal como um brinquedo Lego®;

(d) Compatibilidade com a fase de esboço: as simplificações decorrentes do uso de células são compatíveis com outras ferramentas usadas na fase de esboço, como o Energy-10 (BALCOMB, 1997), além do LT e do LTV; e

(e) Redução do número de variáveis: como as células são simuladas isoladamente, não é necessário combiná-las entre si durante as simulações (serão combinadas após as simulações, durante a análise de casos).

A escolha das variáveis analisadas prima pela seleção das mais importantes, haja vista que é inviável simular todas as que são sugeridas na bibliografia. Determinou-se que seria aceitável simular aproximadamente 40.000 modelos com a versão 3 do VisualDOE, no período de até três meses (baseado na experiência pessoal). A partir dessa determinação, procedeu-se à escolha das variáveis mais influentes por meio do conhecimento adquirido no LTV (HYDE; PEDRINI, 1999) e nas experiências prévias com arquitetos. Além disso, entrevistas com arquitetos com diferentes níveis de especialização também indicaram a importância de determinadas decisões arquitetônicas nas fases de programa e esboço. A Figura 7 apresenta o resultado para arquitetos reconhecidos por projetos eficientes (PEDRINI, 2003).

Conforme a Figura 8, foram selecionadas 11 variáveis: células com as quatro orientações geográficas principais (norte, leste, sul e oeste); profundidade de sala (3 m, 6 m e 9 m); pé-direito (2,4 m e 3,3 m); fração de janela na parede (10%, 40%, 70% e 90%); ângulo vertical do sombreamento externo (10°, 60° e 90°); ângulo horizontal do sombreamento externo (10°, 40° e 90°); tipo de vidro das aberturas (claro ou verde/Evergreen<sup>9</sup>); características das paredes (leve ou pesada); uso de iluminação natural com controle de cortinas (ativado ou desativado); tipos de ventilação (ativa ou passiva); e tipos de instalação predial (iluminação e condicionamento artificiais eficientes ou com baixa eficiência). Características como densidade de equipamentos por área, formas de uso da edificação, controles das instalações prediais e outras influências sobre o consumo de energia foram adotadas das recomendações prescritas pela Australian Building Codes Board (2001a; 2001b).

<sup>9</sup> A escolha do vidro “Evergreen” ocorreu devido aos seus recentes usos em Brisbane e devido às propriedades como transmissibilidade visual, 0,160, SHGC=0,280 e U=5,3 W/(m<sup>2</sup>K), conforme G. James Pty. Ltd. (2002).

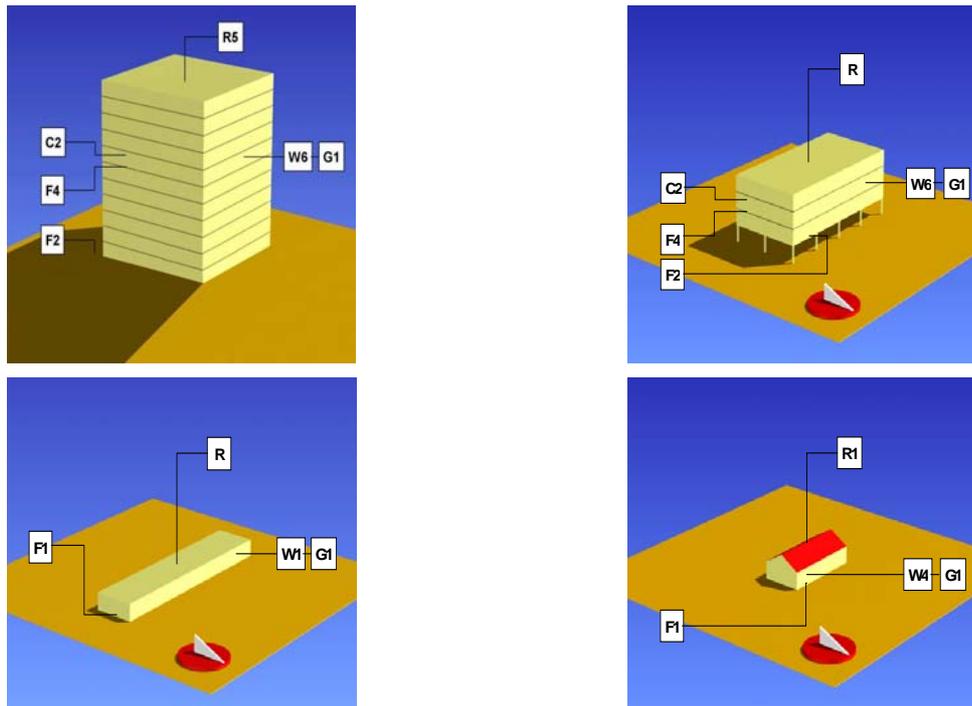


Figura 4 - Proposta para edificações representativas (AUSTRALIAN BUILDING CODES BOARD, 2001b)

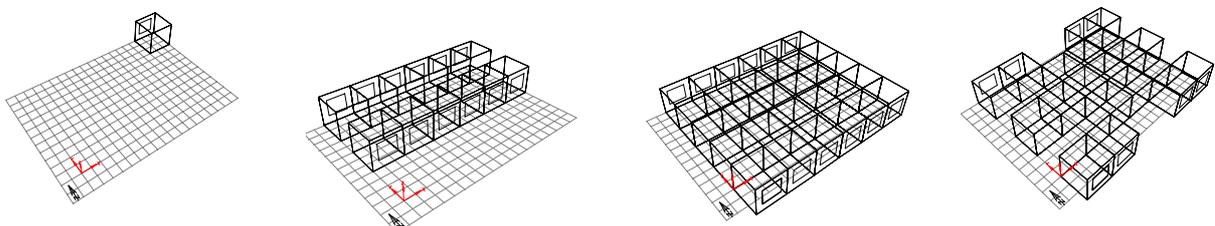


Figura 5 - Variações de forma

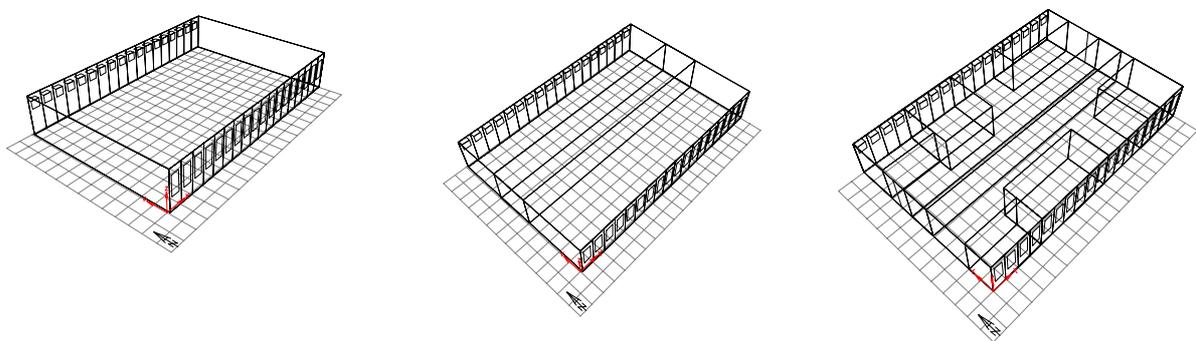


Figura 6 - Variações de *layout*

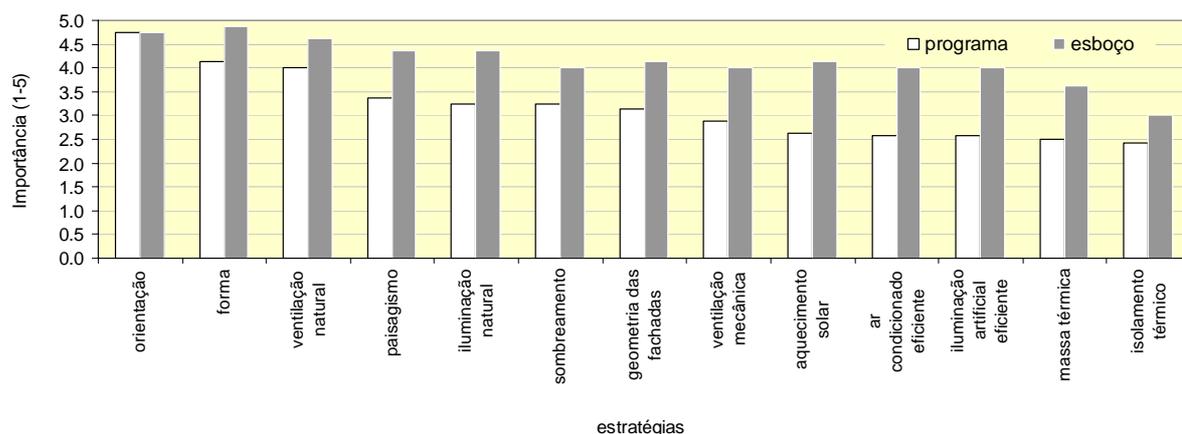


Figura 7 - Importância das estratégias para arquitetos que são reconhecidos por projetos

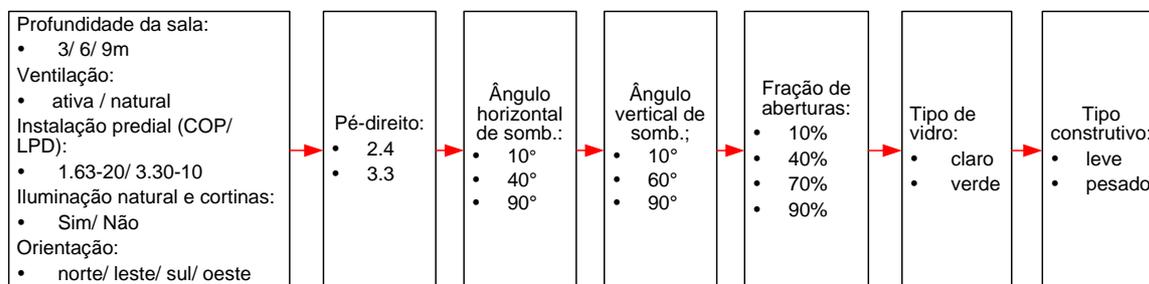


Figura 8 - Variáveis analisadas

## Simulação

Após o planejamento de modelagem, foram simulados aproximadamente 36.000 modelos em um mês intensivo de trabalho. Entretanto, os modelos e resultados tiveram que ser descartados devido a um erro de conversão de unidades (do SI para o Sistema Imperial) do algoritmo do programa. Como o problema poderia estar no próprio código do DOE-2.1E, optou-se por reproduzir o trabalho empregando o Sistema Imperial de unidades (do contrário seria necessário esperar meses). Entretanto, essa experiência aprimorou o processo. Observou-se que uma das variáveis poderia ser eliminada na simulação e obtida posteriormente por meio de interpolação, e assim seriam necessárias as simulações de “apenas” 24.000 casos. Além disso, a ordem de combinação das variáveis foi estrategicamente escolhida em função da facilidade para mudá-las (segundo características da ferramenta), após uma profunda revisão e testes prévios. Com essas mudanças, as modelagens e simulações tomaram poucos dias de trabalho intenso.

## Primeiras análises

A análise de aproximadamente 36.000 casos foi viabilizada pelo programa Microsoft Access: os resultados foram organizados no banco de dados e puderam ser analisados e comparados mediante a formulação de uma interface gráfica nos moldes do LTV.

A primeira constatação dos resultados mostrou que as decisões arquitetônicas podem ser mais influentes do que as decisões pertinentes à instalação predial (Tabela 1). Destaca-se que para zonas voltadas para o oeste, o consumo de energia pode variar em até 354 kWh/m<sup>2</sup>, ou 72%, entre a pior e a melhor combinação de variáveis arquitetônicas, enquanto o uso de sistemas prediais com eficiências diferentes tem um impacto de 47%.

A segunda constatação concerne à interação das variáveis. Por exemplo, o aumento do pé-direito de 2,40 m para 3,30 m pode reduzir 10% do consumo de energia de um determinado modelo, enquanto a redução de 3,30 para 2,70 m também pode reduzir em 17%, porém em outro modelo; o aumento da profundidade de uma zona de 3 m para 9 m pode

reduzir em 34%, enquanto a redução de 9 m para 3 m também pode reduzir em 34% (em modelos diferentes); a aumento de área envidraçada de 10% para 70% pode reduzir em até 14%, enquanto a redução de 90% para 10% também pode reduzir em 41%. Em muitos casos, o comportamento das variáveis não é linear e varia de acordo com as combinações. Logo, torna-se inviável resumir o comportamento de uma variável a uma sentença ou recomendação simples e direta.

Com base na constatação anterior, é razoável levantar a suspeita de que as recomendações existentes são superficiais se comparadas com a capacidade de informação que as simulações oferecem. Logo, é mais interessante investir em métodos de avaliação de resultados do que simplesmente procurar por tendências generalistas.

### Protótipo de interface

Pensando em produzir uma interface para análise instantânea do comportamento de variáveis, desenvolveu-se uma interface em Microsoft Access, simples e flexível, de acordo com as limitações impostas pelo software. A interface apresenta um módulo principal no lado esquerdo (Figura 9), o qual permite selecionar um dos 36.864 modelos previamente simulados. A seqüência de entrada é compatível com a preferência média dos projetistas durante a tomada de decisões (PEDRINI, 2003). Há três opções para análises dos resultados. O primeiro módulo apresenta a interdependência entre duas variáveis: ângulo vertical e ângulo horizontal de sombreamento externo. Conforme a Figura 9, esse módulo permite que o projetista entenda a influência dramática das possíveis combinações de proteções solares verticais (eixo x) e horizontais (eixo y) quando se usa vidro claro (o consumo de energia é apresentado no eixo z, e a classificação através de estrelas é indicada por cores e textura da superfície). No exemplo da Figura 9, o desempenho energético pode oscilar entre duas e cinco estrelas. Com a simples mudança do vidro claro para o vidro eficiente "Evergreen" (Figura 10), observa-se que a influência das proteções solares é reduzida, enquanto o desempenho energético da célula fica restrito a quatro e cinco estrelas.

Ainda que os resultados sejam avaliados pelo consumo de energia por área durante o ano ( $\text{kWh/m}^2$ ), observou-se que poderiam ser incompatíveis com a prática de muitos projetistas ou mesmo inviáveis para uma análise rápida. Considerando que avaliações diretas como "positivo" e "negativo" são preferidas por projetistas, optou-se por algo intermediário: os resultados estão associados à escala de classificação do desempenho energético, o Australian Building Greenhouse Rating Scheme (BANNISTER, 1999). A classificação consiste de uma a cinco estrelas: quanto maior o número de estrelas, mais eficiente é a edificação. Conforme a Tabela 2, a escala original foi normalizada para atender às características de ocupação dos modelos simulados. Logo, uma edificação com consumo anual inferior a  $227 \text{ kWh/m}^2$  é classificada com cinco estrelas.

O próximo módulo enfatiza o balanço térmico e luminoso em aberturas, isto é, a busca por uma redução do ganho térmico conjugada com o aumento do uso da iluminação natural e a conseqüente redução da energia consumida pela iluminação artificial. Conforme a Figura 11, observa-se que, para uma dada célula, a redução do sombreamento (ou o aumento do ângulo horizontal) tem uma influência muito maior sobre o consumo de resfriamento do que sobre a economia de iluminação artificial. Em outras palavras, o melhor desempenho energético será obtido por ângulo de sombreamento horizontal de  $10^\circ$  (cinco estrelas), enquanto ausência do sombreamento resultaria num desempenho de quatro estrelas. No caso do sombreamento vertical, a influência dos ângulos é menor, porém menos previsível. O ângulo que proporciona o menor consumo é  $60^\circ$ , o que coincide com o cruzamento das curvas de consumo de resfriamento e iluminação, ou seja, o melhor balanço.

O último módulo é orientado a teste de hipóteses: apresenta o consumo de energia por uso final e total, em valor absoluto e percentual, os quais correspondem ao modelo selecionado no módulo principal (do lado esquerdo da interface). A exemplo da Figura 12, a simples alteração da opção do modelo com uso da iluminação natural (gráficos da esquerda) ocasiona a duplicação percentual do uso final da energia consumida pelo sistema artificial de iluminação (gráficos da direita).

Variáveis	NORTE		LESTE		SUL		OESTE	
	%	kWh/m <sup>2</sup>	%	kWh/m <sup>2</sup>	%	kWh/m <sup>2</sup>	%	kWh/m <sup>2</sup>
arquitetônicas	69	306	64	247	53	157	72	354
instalação predial	47	170	48	150	47	120	47	155

Tabela 1 - Importância das variáveis no desempenho energético

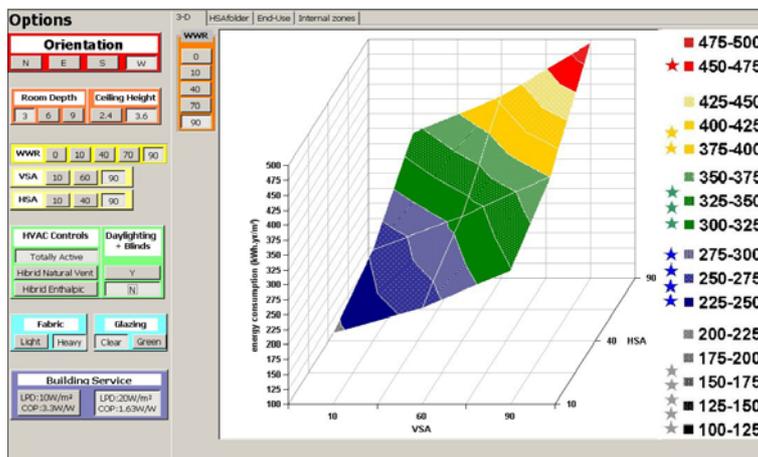


Figura 9 - Possibilidades de combinação de proteção externa e consumo de energia para vidro simples e claro

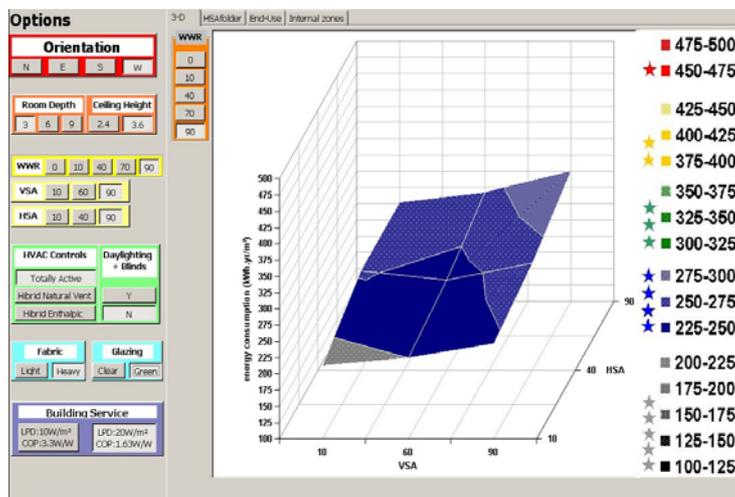


Figura 10 - Possibilidades de combinação de proteção externa e consumo de energia para vidro do tipo “Evergreen”

Número de estrelas	Classificação original (kWh/m <sup>2</sup> )	Classificação corrigida para a ocupação usada nas simulações (kWh/m <sup>2</sup> )
☐ (1)	387	546
☐☐ (2)	323	466
☐☐☐ (3)	259	386
☐☐☐☐ (4)	194	306
☐☐☐☐☐ (5)	130	227

Tabela 2 - Classificação de desempenho energético para a análise paramétrica

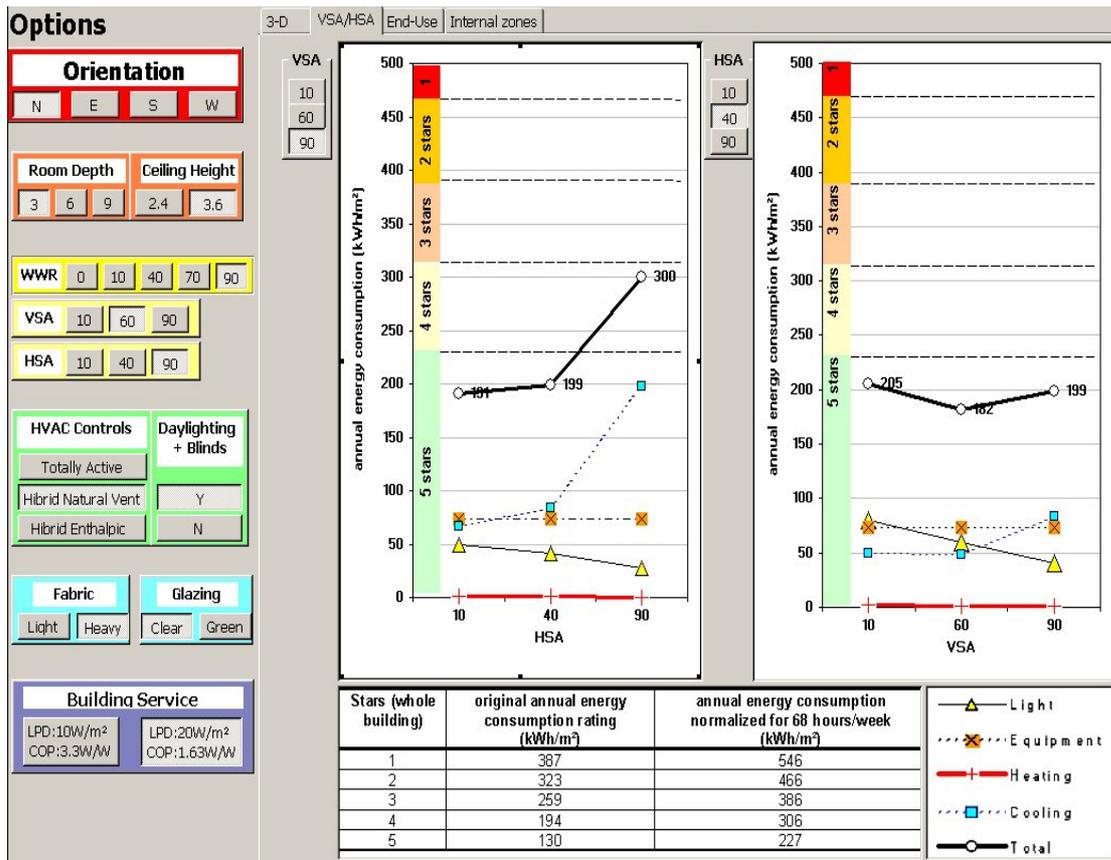


Figura 11 - Estudo da proteção horizontal e vertical em termos de uso final de energia

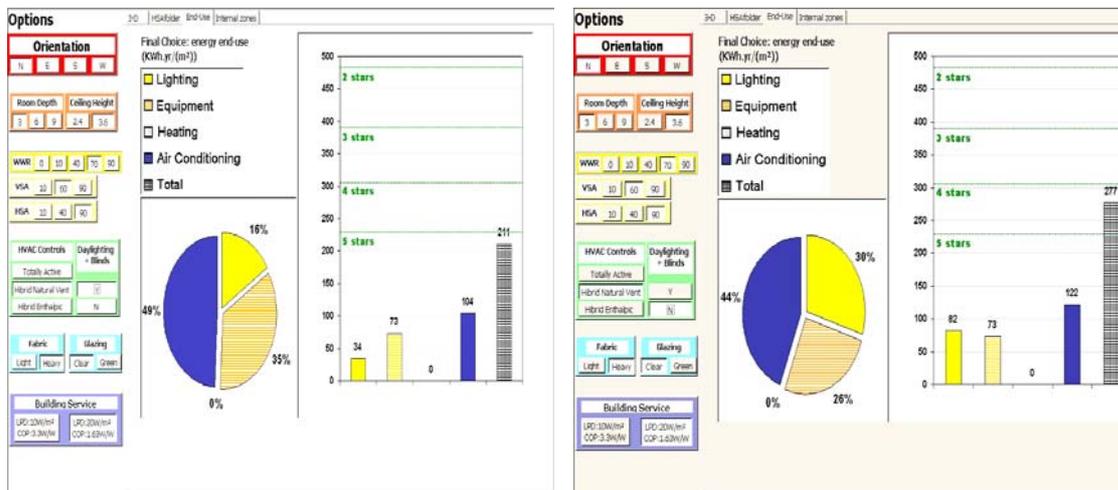


Figura 12 - Comparação de consumo de energia por uso final para dois casos: com e sem uso de iluminação natural

## Conclusões

A metodologia apresentada faz parte da tese de doutorado de Pedrini (2003) e, portanto, da pesquisa desenvolvida pelo autor, sob orientação do Dr. Steven Szokolay. Há uma notória influência do desenvolvimento de ferramentas anteriores e das experiências pessoais dos autores que atuam como pesquisadores e consultores. Quanto ao protótipo, este deve ser entendido mais como uma exemplificação do que poderia ser uma ferramenta apropriada para atender às necessidades de consultores e de projetistas que desejam estimar o impacto de suas decisões desde o início. Provavelmente esse protótipo está longe de atender às necessidades do projetista médio; é, antes de tudo, a ferramenta desenvolvida para atender à necessidade dos autores e da equipe de T. R. Hamzah & Yeang. São necessários maiores desenvolvimentos para aumentar o potencial de uso do protótipo, como o desenvolvimento de recursos gráficos para caracterização e visualização espacial das células analisadas. As células poderiam ser caracterizadas por meio de um CAD simplificado, em vez do uso de botões. Além disso, geometrias complexas poderiam ser criadas a partir da combinação das células para que fosse comparado o desempenho entre células e de todo o projeto.

Como mencionado, o protótipo exemplifica o potencial de uma ferramenta que estima instantaneamente o consumo de energia entre milhares de configurações possíveis a partir de uma simplificação aceitável da geometria.

Ferramentas como o VisualDOE poderiam ser adaptadas para incorporar esse recurso mediante poucas transformações. Além da adoção de geometrias simplificadas como células, é importante incluir opções que permitam ao usuário especificar variáveis que devem ser recombinadas e os valores que podem assumir, tal qual exemplificado na Figura 13. Paralelamente, o programa especificaria o número de modelos que seriam gerados e o tempo estimado para executar as simulações.

Além dos relatórios usuais, a ferramenta deveria incorporar rotinas de análise estatística, tal como identificação das combinações com maior e menor consumo, assim como oferecer recursos de visualização de um determinado grupo de combinações, conforme o protótipo faz. Nessa hipotética circunstância, o usuário da ferramenta especificaria seu universo de interesse, e o resto seria produzido automaticamente em horas ou dias, segundo o número de modelos. As simulações deveriam ser realizadas apenas uma vez para gerar os resultados (em vez de meses, como acontece entre os consultores). Uma vez obtidos os resultados, a consulta seria rápida, transparente e educativa, conforme recomenda Steemers (1994). Além disso, seria compatível com a prática dos projetistas, pois, conforme observa Mazria (1980), “se um procedimento toma mais do que 10 ou 15 minutos, logo não será usado”.

Envoltória	Aberturas	Sombreamento	Uso	Iluminação Artificial	Ar Cond.
<b>VARIÁVEIS</b>	vidro			percentual de abertura (WWR)	
<b>CASO BASE</b>	<input type="text" value="vidro claro 3 mm"/>			<input type="text" value="10 %"/>	
<b>Número de alternativas:</b>	<input type="text" value="2"/>			<input type="text" value="5"/>	
<b>Valores</b>	<input type="text" value="vidro claro 6 mm"/>			<input type="text" value="0 %"/>	
	<input type="text" value="vidro verde 6 mm"/>			<input type="text" value="20 %"/>	
				<input type="text" value="50 %"/>	
				<input type="text" value="80 %"/>	
				<input type="text" value="100 %"/>	
					Número de modelos:30
					tempo estimado: 3 minutos

Figura 13 - Proposta para geração sistemática de modelos

## Referências bibliográficas

- AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS (THE). **Understanding the Design Process**. 2000 1999.
- AUSTRALIAN BUILDING CODES BOARD. **Appendix F - Features**. Canberra: Australian Building Codes Board, 2001a.
- AUSTRALIAN BUILDING CODES BOARD. **Consultancy Brief**. Energy Modelling of Office Buildings for Benchmarking and Zoning (Class 5 Climate Zoning Consultancy). Canberra: Australian Building Codes Board, 2001b.
- BAKER, N. V. **The LT Method 2.0**: a An energy design tool for non-domestic buildings. K. Steemers. Cambridge Architectural Research Limited: Royal Institute of British Architects, 1994.
- BALCOMB, J. D. **ENERGY-10: The Making of a Design Tool**. SOLAR 97, 22nd National Passive Solar Conference. Washington, D.C. Apr. 25-30, 1997.
- BALCOMB, J. D.; CURTENER, A.; ANDRESEN, I.; HESTNES, A. G. **Multi-criteria decision-making process for buildings**. PLEA 2000. Cambridge, United Kingdom: James and James (Science Publishers) Ltda., July 2000. p. 719-724.
- BALCOMB, J. D.; MCFARLAND, R. D. **A simple empirical method for estimating the performance of a passive solar heated building of the thermal storage wall type**. 2nd National Passive Solar Conference. Philadelphia, PA. March 16-18, 1978. 13 p.
- BANNISTER, P. **SEDA Greenhouse Rating Scheme Methodology**. Exergy Group Limited. Canberra: 27 Aug. 1999.
- BURBERRY, P. **Mitchell's Practical thermal design in buildings**. London: Batsford Academic and Educational. 1983. 191 p.
- ELEY ASSOCIATES. **VisualDOE 3**. San Francisco, CA, USA, 2000.
- G. JAMES PTY. LTD. **G. James Glass Handbook**: G. James Pty. Ltd., 2002. Documento Eletrônico. Disponível em: <<http://www.gjames.com.au/gjames/cdrom/gj/handbook.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2002.
- GIVONI, B. **Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines**. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 11-23, 1992.
- GOULDING, J. R.; LEWIS, J. O. **Energy conscious design**: A Primer for European Architects. London: Batsford, 1992.
- HYDE, R. A.; PEDRINI, A. **The (LTV) architectural design tool**: critique of planning strategies for energy efficiency. ANZAScA. Sydney, Nov. 1999.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**: PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia - ELETROBRAS). 1997. 176 p.
- LAMBERTS, R.; SCHUCH, M.; MATSUO, C. A.; BUDAG, K. H.; GOULART, S.; DUTRA, L.; MENDES, N. **Analysis Bio**. Florianópolis, SC, 2003.
- LAWSON, B. **How designers think**. London: Butterworth Architecture, 1990. 243 p.
- LI, Y.-H. **Climate Consultant**. California, Los Angeles: Murray Milne, 1991.
- LOUDON, A. G. **Summertime temperatures in buildings**. Thermal environment in modern buildings: aspects referring the design team. February, 1968.
- MARSH, A. **WEATOOL, The Weather Tool**: Climatic Visualisation and Design Analysis. Perth, Australia, 1991.
- MARSH, A. **SUNTOOL v1.10** - Window Shading and Overshadowing. Perth (Australia), 2001.
- MAZRIA, E. **The Passive Solar Energy Book**. In: BALCOMB, J. D.; BARLEY, D. *et al* (Ed.). **Passive Solar Design Handbook**. Volume Two of Two Volumes: Passive Solar Design Analysis. Washington: U.S. Department of Energy, 1980. *The Passive Solar Energy Book*, p.269
- PEDRINI, A. **Integration of low energy strategies to the early stages of design process of office buildings in warm climate**. University of Queensland, St. Lucia, Qld., 2003. 300 p.
- PEDRINI, A.; HYDE, R. A. **A database energy tool for early stages of building design**: the LTV Method. PLEA 2001 18th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Florianópolis. Nov. 2001.

PEDRINI, A.; LAMBERTS, R. Influência do tamanho e forma sobre o consumo de energia de edificações de escritório em clima quente. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC), 7., CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES (COTEDI), 3. **Anais...** Curitiba, Nov. 2003.

ROYAL INSTITUTE OF BRITISH ARCHITECTS. **Plan of Work for Design Team Operation.** London: RIBA Publications,. 1973

SIMULATION RESEARCH GROUP. **DOE-2:** Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). 2000 2000.

STEEMERS, K. (Ed.). **Tools for energy efficient design.** European Directory of Energy Efficient Building. London: James & James, European Directory of Energy Efficient Buildinged, 1994.

SZOKOLAY, S. V. **Energetics in Design.** PLEA'84 - The Third International PLEA Conference. Mexico: Pergamon Press. Aug. 1984. p. 1000-1006.

SZOKOLAY, S. V. (Ed.). **ARCHIPAK User Manual.** Brisbane, 5. 1. ed., 1995.

TOOLS DIRECTORY. U.S. Department of Energy - Office of building technology, state and community programs. 2001.

WILDE, P. D.; VOORDEN, M. V. D.; BROUWER, J.; AUGENBROE, G.; KAAAN, H. **The need for computational support in energy-efficient design projects in the Netherlands.** Building Simulation 2001 - Seventh International IBPSA Conference. Rio de Janeiro. Aug. 2001.

WILLRATH, H. **The thermal performance of houses in Australian climates.** [St. Lucia, Qld.], 1998. 1 v.

YEANG, K. **The skyscraper bioclimatically considered:** a design primer. London, England: Academy Editions, 1996. 269 p.

YEANG, K. **The green skyscraper:** the basis for designing sustainable intensive buildings. Munich: Prestel, 1999. 304 p.

## Agradecimentos

Ao CNPq, pela bolsa de doutorado pleno no exterior e ao arquiteto Dr. Ken Yeang e sua equipe, pela colaboração no estudo de caso.