

Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações

Integrated computational simulation for the consideration of daylight in the energy performance evaluation of buildings

Evelise Leite Didoné
Fernando Oscar Ruttkay Pereira

Resumo

A luz natural é uma importante estratégia para redução do consumo de energia em edificações. Para sua previsão, recomenda-se a utilização de programas de simulação que empregam arquivos climáticos e processam as simulações com o conceito do Daylight Coefficients. O EnergyPlus, programa para simulação termoenergética, é uma dessas ferramentas. Porém, este software possui limitações no módulo de iluminação natural que superestimam a luz natural em ambientes internos. Para contornar essas limitações, o presente trabalho propõe uma metodologia para avaliação da eficiência energética, considerando o aproveitamento da luz natural, através da utilização de dois programas. A metodologia consiste na avaliação do desempenho luminoso e energético através de simulação com os programas Daysim e EnergyPlus. O Daysim produz um relatório que descreve o controle da iluminação artificial que é utilizado na simulação energética do EnergyPlus, que calcula o consumo energético final dos ambientes analisados. Os resultados indicam que a metodologia proposta mostrou-se adequada para suprir as limitações do EnergyPlus e para a avaliação da eficiência energética em edificações, considerando o aproveitamento da luz natural. Este trabalho mostra um caminho alternativo e confiável para a consideração do aproveitamento da iluminação natural na avaliação da eficiência energética de edificações.

Palavras-chave: Eficiência energética. Iluminação natural. Simulação computacional.

Evelise Leite Didoné
Laboratório de Conforto Ambiental, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Universitário Trindade, Caixa Postal 470 Florianópolis - SC - Brasil CEP 88040-900
Tel.: (+49) 15771419697
E-mail: evelisedidone@gmail.com

Fernando Oscar Ruttkay Pereira
Laboratório de Conforto Ambiental, Departamento de Arquitetura e Urbanismo Universidade Federal de Santa Catarina
Tel.: (48) 37214894
E-mail: feco@arq.ufsc.br

Abstract

Daylight is an important strategy to reduce the energy consumption of buildings. For simulating the use of daylighting in buildings it is advisable to use computer programs that incorporate local weather data and use the Daylight Coefficients concept to process simulations. One of those tools is EnergyPlus, a software used for thermodynamic simulations in buildings. However, this software has some limitations, since it overestimates daylighting inside the building. In order to overcome those limitations, this study proposes a methodology to evaluate the energy efficiency of buildings considering daylighting through the combined use of two programs. The methodology consists of an evaluation of the luminous and energy performance through computational simulations using the Daysim and EnergyPlus programs. Daysim produces a report that describes the control of artificial lighting that is used in the simulation with EnergyPlus, which calculates the overall energy consumption of the environment being analysed. The results indicate that this methodology is adequate to overcome the limitations of the EnergyPlus software, and to evaluate the energy efficiency of buildings. This study shows an alternative and reliable way to include daylighting in the evaluation of the energy efficiency of buildings.

Keywords: Energy efficiency. Daylighting. Computer simulation.

Recebido em 19/02/10
Aceito em 21/07/10

Introdução

Nas edificações contemporâneas de escritório a iluminação artificial dos ambientes é responsável por grande parte do consumo de energia junto com o sistema de condicionamento artificial. Isso pode ser revertido quando as edificações são dotadas de dispositivos mais eficazes associados a estratégias de projeto que priorizam o aproveitamento da iluminação e ventilação natural. O uso da luz natural nessas edificações, além de garantir níveis de iluminação adequados para as atividades humanas, reduz a necessidade do uso da luz artificial, que em conjunto com um controle de iluminação artificial eficiente e a influência das aberturas e dos equipamentos interfere nos ganhos térmicos do ambiente e no consumo total de energia. Vale ressaltar que a luz natural está fartamente disponível no período diurno, horário de uso das edificações não residenciais.

Como a luz do dia é extremamente variável, é necessário se aprofundar no conceito das medidas dinâmicas para avaliação da luz natural no interior dos ambientes. Com essas medidas é possível descrever em detalhe o comportamento que ocorre entre um edifício e o clima local através de uma base anual de dados, promovendo uma maior aproximação do projeto à realidade local (REINHART; MARIDALJEVIC; ROGERS, 2006). Para isso, existem ferramentas de simulação de iluminação natural que permitem simulações de modelos com geometrias complexas. O *Daysim* é uma ferramenta de simulação computacional desenvolvida por Reinhart, Maridaljevic E Rogers (2006) que calcula o perfil anual de iluminação interna utilizando arquivos climáticos, tendência verificada na maioria dos programas de simulação do comportamento termoenergético da atualidade. O aplicativo que utiliza o arquivo climático se diferencia dos outros por poder prever a quantidade de luz natural em um ambiente no curso de um ano inteiro. Programas de simulação estática apenas simulam o fenômeno sob uma condição de céu predeterminada.

Algumas ferramentas são capazes de fazer uma análise integral entre os sistemas de iluminação natural, refrigeração e aquecimento. O *EnergyPlus* é uma delas, fornece resultados horários e realiza simulações termoenergéticas, permitindo uma avaliação mais detalhada do desempenho da edificação. No entanto, o *EnergyPlus* possui algumas limitações no algoritmo do sistema de iluminação natural (WINKELMANN;

SELKOWITZ, 1985). Isso também foi comprovado por Ramos (2008), que verificou grande influência do programa no cálculo da iluminação natural, tanto no cálculo da parcela de luz refletida no ambiente como no cálculo das iluminâncias externas, que resultaram maiores do que as reais. Ou seja, o *EnergyPlus* superestima a quantidade de luz natural no interior do ambiente e, conseqüentemente, subestima o consumo de energia elétrica usada na iluminação artificial.

Vários trabalhos têm comprovado que o aproveitamento da luz natural é capaz de proporcionar uma significativa economia de energia elétrica gasta em iluminação. No Brasil, algumas pesquisas já foram realizadas a fim de caracterizar edificações comerciais sob a ótica do consumo de energia elétrica considerando o aproveitamento da iluminação natural. Souza (2003) propôs uma metodologia para estimar o Potencial de Aproveitamento da Luz Natural (PALN) através da utilização de sistemas automáticos de controle para economia de energia elétrica gasta em iluminação artificial e verificou que as estratégias de controle automático podem reduzir significativamente o consumo de energia elétrica gasta em iluminação, chegando a atingir uma redução de 87% em ambientes com janelas opostas.

O presente estudo tem como objetivo propor e aplicar uma metodologia para avaliação da eficiência energética, considerando o aproveitamento da luz natural, através da simulação integrada com a utilização de dois aplicativos de simulação computacional, *Daysim* e *EnergyPlus*, a fim de suprir as limitações deste último nos cálculos da iluminação natural.

Revisão bibliográfica

Medidas dinâmicas de avaliação da luz natural

Atualmente muitas pesquisas em todo o mundo têm sido realizadas buscando maneiras para melhor compreender e utilizar a luz natural nas edificações e avaliar seu potencial de aproveitamento. Essas análises podem ser feitas por meio de simulação computacional. As simulações computacionais podem ser estáticas ou dinâmicas.

Uma simulação estática expressa resultados na forma de imagens fotorrealísticas e/ou valores absolutos de iluminância, ou ainda em relação à iluminância produzida por um céu de referência como o *Daylight Factor* (DF).¹ O DF oferece uma prospecção limitada no desempenho da iluminação natural por ser fundamentado em um valor da iluminação com um único tipo de céu, o céu encoberto. Porém, essa medida ainda persiste como a avaliação dominante da iluminação natural. Como limitação, não leva em consideração estações, horas, luz solar direta, condições variáveis do céu, orientação ou posição (NABIL; MARDALJEVIC, 2006).

Já as simulações dinâmicas produzem séries anuais de iluminâncias e são usadas como indicadores dinâmicos do desempenho da luz natural. As principais medidas dinâmicas são: *Daylight Autonomy* (DA); *Useful Daylight Illuminances* (UDI); e o Percentual de Aproveitamento da Luz Natural (PALN).

Daylight Autonomy (DA) é definida como uma porcentagem das horas ocupadas por ano nas quais um nível mínimo de iluminância pode ser mantido apenas pela iluminação natural (REINHART, 2006). Um alto valor de DA não é necessariamente uma garantia para a economia de energia elétrica, pois independe do sistema de iluminação artificial instalado e do tipo de controle. Além disso, esse índice não permite a identificação de situações onde os níveis de iluminação são excessivamente elevados, podendo provocar efeitos adversos associados ao conforto visual e à carga térmica.

Useful Daylight Illuminances (UDI) é dada pela frequência da iluminância em um determinado tempo de acordo com faixas preestabelecidas. O índice permite verificar qual porção do ambiente possui valores úteis (não muito baixos, nem muito altos, que possam causar ofuscamento ou ganho de calor) e qual a porcentagem de ocorrência durante um ano (NABIL; MARDALJEVIC, 2006).

O Percentual de Aproveitamento da Luz Natural (PALN) indica a quantidade de energia que pode ser economizada mediante o aproveitamento da luz natural e permite a comparação entre diversas estratégias de controle da iluminação artificial.

Diferentes do convencional DF, o DA, o UDI e o PALN ajudam na interpretação do arquivo climático real, que é capaz de descrever a variação temporal e espacial do céu, a ocorrência de insolação direta e os níveis horários de iluminação natural absoluta.

¹O fator da luz do dia é a relação da iluminância interna de um ponto no interior do ambiente com a iluminância horizontal externa desobstruída sob o céu nublado padrão da CIE (fórmula: $E_{int}/E_{ext} \times 100\%$) (MOORE, 1985).

Programas de simulação computacional

A avaliação do desempenho energético de edificações é uma tarefa complexa que envolve grande quantidade de variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares. Com o uso do computador foi possível desenvolver modelos computacionais para representar o comportamento térmico, luminoso e energético de edificações, através da simulação de diferentes cenários, permitindo a análise de alternativas distintas de eficiência energética quando a edificação está em fase de projeto ou após a construção.

Através de programas de simulação computacional é possível avaliar os projetos a partir de suas características dimensionais, componentes construtivos, sistema de iluminação ou de condicionamento de ar, além de informações do padrão de uso e ocupação da edificação. Pode-se estimar o consumo de energia, o custo desse consumo e o impacto ambiental provocado pela alternativa de projeto antes mesmo de sua execução. Para isso, é necessário dispor de informações climáticas disponíveis nos arquivos de dados climáticos horários (8.760 horas do ano), que são utilizados para representar as condições externas à edificação, tais como temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar e ventos.

Atualmente, no *Building Energy Tools Directory*², página da internet mantida pelo Departamento de Energia dos EUA que reúne informações sobre as principais ferramentas disponíveis, existem mais de 345 programas de simulação listados. Alguns países vêm desenvolvendo programas menos complexos para serem utilizados com mais facilidade pelos usuários e difundidos no meio comercial. Na Inglaterra, foi desenvolvido o programa *Design Builder*³, para ser utilizado como interface, facilitando o manuseio do programa *EnergyPlus*. Na sequência são apresentados, mais detalhadamente, os programas escolhidos para serem utilizados neste estudo.

EnergyPlus

O programa computacional *EnergyPlus* foi criado a partir da junção de características de dois programas, *BLAST* e *DOE-2*. É um programa de simulação termoenergética que trabalha com o balanço de calor do *BLAST*, com um ar condicionado genérico, programas de iluminação natural e novos algoritmos de transferência de calor e fluxo de ar entre zonas. Estima o consumo de energia considerando as trocas térmicas da

²http://HHTwww.eere.energy.gov/buildings/tools_directoryT

³<http://www.designbuilder.co.uk/T>

edificação com o exterior com base na caracterização do edifício ou da sala a ser estudada e leva em consideração a geometria, componentes construtivos, cargas instaladas, sistemas de condicionamento de ar e padrões de uso e ocupação (CRAWLEY *et al.*, 1999).

Na simulação de iluminação natural o programa determina o impacto do aproveitamento da luz natural no consumo de energia de acordo com as condições ambientais e os tipos de controle de iluminação e gerenciamento das aberturas em função da disponibilidade de luz natural e ocorrência de ofuscamento. O cálculo da iluminação natural deriva do programa *DOE-2*, por isso o programa produz resultados mais confiáveis em ambientes que possuem formato cúbico, sem divisória interna. O método *Split Flux*, empregado pelo programa, não é recomendado para ambientes em que a profundidade medida a partir da janela seja maior que três vezes a altura do pé-direito. Nesse caso, o método pode superestimar em até duas vezes ou mais a iluminação interna refletida na parede dos fundos (WINKELMANN; SELKOWITZ, 1985).

Para verificar o comportamento do método *Split Flux*, Wilkelmann e Selkowitz (1985) fizeram dois tipos de estudos de validação. No primeiro estudo as análises paramétricas foram feitas para testar a sensibilidade de cada processo do cálculo e verificar alguns parâmetros de projeto, como a influência do tamanho da janela, a transmitância do vidro e a refletância das superfícies internas. No segundo estudo, foi feita uma comparação através de três diferentes métodos: o uso do programa *DOE-2*, o uso do programa *SUPERLITE* e medidas feitas em modelos de escala no simulador de céu do laboratório de *Lawrence Berkeley* (LBL). Os resultados mostraram que, no modelo profundo, o método *Split Flux* superestimou a iluminação através das inter-reflexões internas.

Ramos (2008) avaliou o cálculo da iluminação natural através da comparação das iluminâncias internas calculadas com as simulações realizadas pelos programas *EnergyPlus*, *Daysim/Radiance* e *Troplux*. A principal conclusão desse estudo foi a verificação das deficiências do *EnergyPlus*, que tem maior influência no cálculo da iluminação natural: o cálculo da parcela de luz refletida no ambiente, e o cálculo das iluminâncias externas, maiores do que as reais.

Daysim

O *Daysim* é um programa de análise da iluminação natural desenvolvido pelo *National Research*

Council Canada (NRCC), que utiliza o algoritmo do *RADIANCE*⁴ para calcular eficientemente as iluminâncias internas de um ambiente no período de um ano (REINHART, 2006). O programa trabalha com dados anuais através de arquivos climáticos completos, os mesmos utilizados no programa *EnergyPlus*, que contém uma série horária de dados de radiação solar convertendo as séries horárias em séries sub-horárias.

O programa simula a iluminação natural através do *Daylight Coefficients* pelo programa *RADIANCE*, que utiliza o método do raio traçado (*ray-tracing*) e o modelo de céu de Perez *et al.* (1990). Dessa forma, possibilita a simulação das iluminâncias sob qualquer condição de céu. Com a plataforma do programa *RADIANCE* integrado ao conceito do *Daylight Coefficients*, o *Daysim* calcula o perfil anual de iluminação natural. O uso desse conceito pelo *Daysim* viabiliza o tempo de simulação para todas as horas do ano, evitando a necessidade de simular todas as condições de céu para se traçar o perfil anual de iluminação (REINHART, 2006).

A simulação é realizada a partir de um modelo tridimensional do ambiente a ser analisado. O modelo é importado de programas como o *Ecotect* e o *Sketchup*. No modelo são definidas as propriedades ópticas das superfícies, e do arquivo climático são retirados dados como latitude, longitude e radiação. Além do cálculo das iluminâncias, o programa permite a determinação do *Daylight Factor* (DF), *Useful Daylight Illuminance* (UDI) e *Daylight Autonomy* (DA) para cada ponto de referência. Outra possibilidade é a verificação do consumo da iluminação artificial de acordo com diferentes padrões de uso (número de pessoas no local e horas de permanência), iluminância de projeto, potência e sistema de controle da iluminação artificial.

O *Daysim* integra um algoritmo comportamental chamado *Lightswitch*, que busca prever as ações dos sistemas de controle de iluminação ou de usuários no controle do sistema de iluminação em relação ao nível de iluminação. Esse modelo permite a simulação sub-horária do uso da iluminação a partir do comportamento dinâmico de utilização dos sistemas de iluminação em todas as horas do ano (BOURGEOIS; REINHART; MACDONALD, 2006).

⁴O *RADIANCE* é um programa de simulação baseado no comportamento físico da luz, desenvolvido nos Estados Unidos, na Universidade da Califórnia. O programa prediz a distribuição de iluminâncias e luminâncias em edificações sob condições de céu definidas. Possui um mecanismo baseado no método de cálculo Ray-trace largamente utilizado e aceito na avaliação de iluminação natural em edificações (WARD, 1993).

EnergyPlus e Daysim

Com o intuito de verificar a distribuição anual da iluminação natural no ambiente e o potencial de redução do consumo energético proveniente do uso da luz natural, e diante das limitações do *EnergyPlus*, propõe-se a utilização de dois programas de simulação: o *Daysim*, para a análise anual de iluminação, e o *EnergyPlus*, para a verificação do desempenho energético da edificação.

O *Daysim*, utilizando os mesmos arquivos climáticos que o *EnergyPlus*, calcula o perfil anual de iluminâncias internas e gera automaticamente um arquivo de dados (*.intgain.csv), que contém a carga elétrica gasta com iluminação e fica armazenado em seu subdiretório "res". O arquivo contém os resultados anuais da simulação detalhados em intervalos de tempo, de hora em hora. Entendendo o problema do *EnergyPlus* e o funcionamento dos dois programas, *EnergyPlus* e *Daysim*, surgiu a ideia de integrar os resultados do *Daysim* no *EnergyPlus*.

Bokel (2007) e Koti e Addison (2007) já demonstraram a possibilidade de integração dos dados de saída do *Daysim* (*.intgain.csv) a outros programas de simulação termoenergética, como o Capsol e o DOE-2.

Metodologia

A metodologia foi baseada na avaliação e comparação do desempenho luminoso e energético de modelos de edifícios de escritórios com diferentes variáveis arquitetônicas através de simulação computacional. As etapas metodológicas utilizadas estão apresentadas na sequência.

A primeira etapa se refere aos levantamentos de dados, obtidos em trabalhos já realizados, das tipologias e usos de edificações não residenciais na cidade de Florianópolis/SC. Esses dados foram utilizados para a definição da tipologia predominante entre os edifícios de escritórios, escolha das variáveis a serem investigadas e elaboração dos modelos para simulação.

A segunda etapa consiste das simulações computacionais que foram divididas em três tipos: a simulação termoenergética, através do programa *EnergyPlus*, para a comparação com os resultados da simulação integrada; a simulação de iluminação natural através do programa *Daysim*, para avaliar o comportamento dinâmico da luz natural e obter os dados necessários (operação da iluminação artificial) para a simulação energética integrada; e a simulação energética integrada através do

programa *EnergyPlus*, para a obtenção dos dados referentes aos consumos energéticos finais dos modelos.

Características dos modelos para as simulações

Foram modeladas e simuladas diferentes salas de escritório representadas por um paralelepípedo ortogonal dividido em piso, paredes e teto, com a fachada frontal medindo 8 m de largura e a profundidade variando em 4 m, 8 m e 16 m. Todos os modelos possuem pé-direito de 2,70 m, com exceção do modelo 4, que foi avaliado com pé-direito de 3,50 m, para um estudo da influência da altura do ambiente na distribuição da luz natural (Tabela 1).

As refletâncias internas dos ambientes foram de 70% para teto, de 50% para paredes e de 20% para o piso. Os modelos foram avaliados nas quatro orientações cardeais, norte (0°), leste (90°), sul (180°) e oeste (270°), e o entorno não foi levado em consideração.

Para a elaboração do modelo predominante de edifício de escritórios na cidade de Florianópolis/SC foram levantados dados da literatura e de trabalhos já realizados. Analisaram-se 35 edifícios em relação à caracterização construtiva e 41 escritórios em relação ao padrão de ocupação e uso de equipamentos (SANTANA, 2006; CARLO, 2008).

Em relação ao uso de equipamentos e padrão de ocupação foram considerados os equipamentos mais comuns apresentados nos levantamentos de Santana (2006): aparelhos de ar condicionado, cafeteiras, computadores, fax, lâmpadas, geladeiras, impressoras, ventiladores, filtro d'água e rádio. Através dos monitoramentos, esses equipamentos apresentaram uma carga térmica por unidade de área média de 9,7 W/m².

O sistema de condicionamento de ar utilizado é composto de um aparelho de janela que opera durante o horário de uso da edificação (8h às 18h) para manter a temperatura interna entre 18 °C e 24 °C ao longo de todo o ano. Essa temperatura é comumente encontrada nas literaturas de trabalhos relacionados à cidade de Florianópolis (CARLO, 2008). O sistema de condicionamento de ar foi modelado com a Etiqueta de Eficiência A do INMETRO, com um COP (*Coefficient of Performance*) para resfriamento de 3,19 W/W, dimensionado de acordo com a área do protótipo em estudo.

O sistema de iluminação artificial foi definido a partir de um projeto luminotécnico de iluminação

geral. Os sistemas são compostos de luminárias de embutir de alta eficiência e aletas metálicas que impedem o ofuscamento. Cada luminária contém duas lâmpadas fluorescentes tubulares T5 de 28 W, que proporcionam uma densidade de potência instalada de 7 W/m². No controle da iluminação artificial utilizou-se um sistema automático *dimmerizável* para garantir que a iluminação artificial seja diminuída ou desligada quando a luz natural alcançar os níveis de iluminação desejados. A iluminância de projeto foi adotada conforme os fatores determinantes para as atividades de

escritório, segundo a NBR 5413 (ABNT, 1992), com um valor de 500 lux.

Para o padrão de ocupação, os períodos com ocupação mais intensa são das 8h às 12h e das 14h às 18h. Isso ocorre devido ao horário de almoço e horários que normalmente não existe expediente, portanto se adotou nas simulações o período de 8h às 18h com 100% de ocupação. A taxa de ocupação é de 16 m² por pessoa.

Na sequência estão descritos os modelos utilizados nas simulações e suas diferentes variáveis.

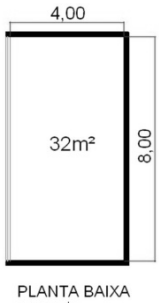
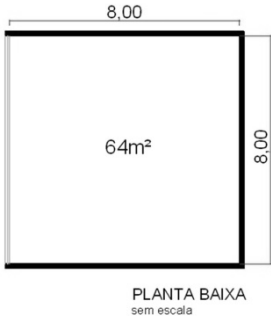
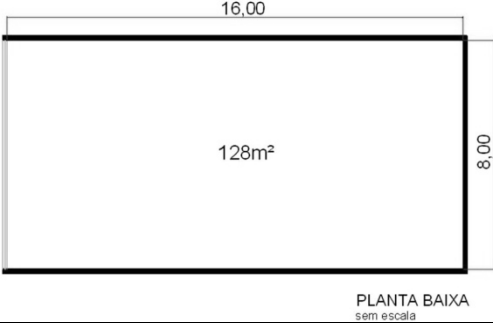
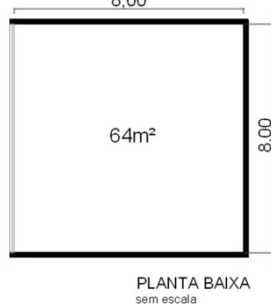
Modelo	Profundidade (m)	Altura (m)
Modelo 1	 <p>4,00 32m² 8,00 PLANTA BAIXA sem escala</p>	Pé-direito = 2,70
Modelo 2	 <p>8,00 64m² 8,00 PLANTA BAIXA sem escala</p>	
Modelo 3	 <p>16,00 128m² 8,00 PLANTA BAIXA sem escala</p>	
Modelo 4	 <p>8,00 64m² 8,00 PLANTA BAIXA sem escala</p>	

Tabela 1 - Planta baixa dos modelos com suas diferentes alturas e profundidades

Modelos paramétricos

Os modelos com diferentes variáveis têm a finalidade de formar um conjunto de dados com diversas combinações de parâmetros construtivos que interferem no comportamento da luz natural. Diante dos resultados obtidos com as simulações foi possível estabelecer quais são os parâmetros mais adequados para a economia de energia a partir do aproveitamento da luz natural. Na Tabela 2 estão sintetizadas as características dos modelos simulados com suas respectivas variações. Foram construídos e avaliados 72 modelos com diferentes variáveis, totalizando 576 simulações: 288 simulações no *Daysim*; e 288 simulações no *EnergyPlus*.

Os modelos foram construídos com diferentes profundidades, porcentual de área de abertura na fachada (PAF), fator solar (FS), ângulo horizontal de sombreamento (AHS) e ângulo vertical de sombreamento (AVS).

Modelos-base

Os modelos-base serviram de referência para as análises dos resultados das simulações dos modelos paramétricos. Optou-se por um protótipo que representasse baixa eficiência no uso da luz natural, com características que induzissem uma baixa eficiência energética na edificação. O modelo apresenta um sistema de iluminação artificial ligado durante todo o período de ocupação, sem sensores fotoelétricos e sistema de *dimerização*, com o PAF de 75% e FS de 0,82. Foi construído um modelo-base para cada um dos quatro modelos em estudo.

Plano de análise

Para a avaliação da medida dinâmica do *Daylight Autonomy* (DA) no plano de trabalho, as simulações foram realizadas em uma quantidade de pontos suficiente para caracterizar um plano de

análise. O ambiente interno foi dividido em áreas iguais, formando uma malha cujas medidas são dadas no centro de cada área. A malha de pontos é uma superfície horizontal situada a 0,75 m de altura do piso, com os pontos distanciados 1,33 m entre si e 0,67 m da parede (Figura 1).

Simulações computacionais

As simulações foram divididas em três etapas. Primeiramente, realizou-se a simulação termoenergética com os modelos-base, utilizando isoladamente o aplicativo *EnergyPlus*. Na sequência, a simulação de iluminação natural nos modelos paramétricos, através do programa *Daysim*. Para finalizar, a simulação integrada, para a obtenção dos dados do consumo energético total no *EnergyPlus*, inserindo o controle do sistema de iluminação obtido no *Daysim*.

Neste trabalho, adotou-se como dado de entrada o arquivo climático TRY (*Test Reference Year*) de referência para a cidade de Florianópolis/SC. O arquivo climático encontra-se disponível no site do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC (<http://www.labeee.ufsc.br>).

Simulação termoenergética

A simulação termoenergética foi realizada com o uso do programa *EnergyPlus*, versão 3.0, e dos modelos-base. Os resultados obtidos serviram de referência comparativa para os resultados das simulações dos modelos com diferentes variáveis.

Simulação de iluminação natural

As simulações de iluminação natural foram realizadas com o programa *Daysim* 2.1.P4, que fornece dados para a avaliação da luz natural e dados horários de acionamento da iluminação artificial pelo controle automatizado.

Modelos	Profundidade (m)	Pé-direito (m)	PAF %	FS	Proteção solar		Orientação
					AHS (graus)	AVS (graus)	
Modelo 1	4	2,70	25	0,82 0,23	0 45 0	0 0 45	Norte Sul Leste Oeste
Modelo 2	8		50				
Modelo 3	16		75				
Modelo 4	8	3,50	20 40 60				

Tabela 2 - Síntese dos modelos

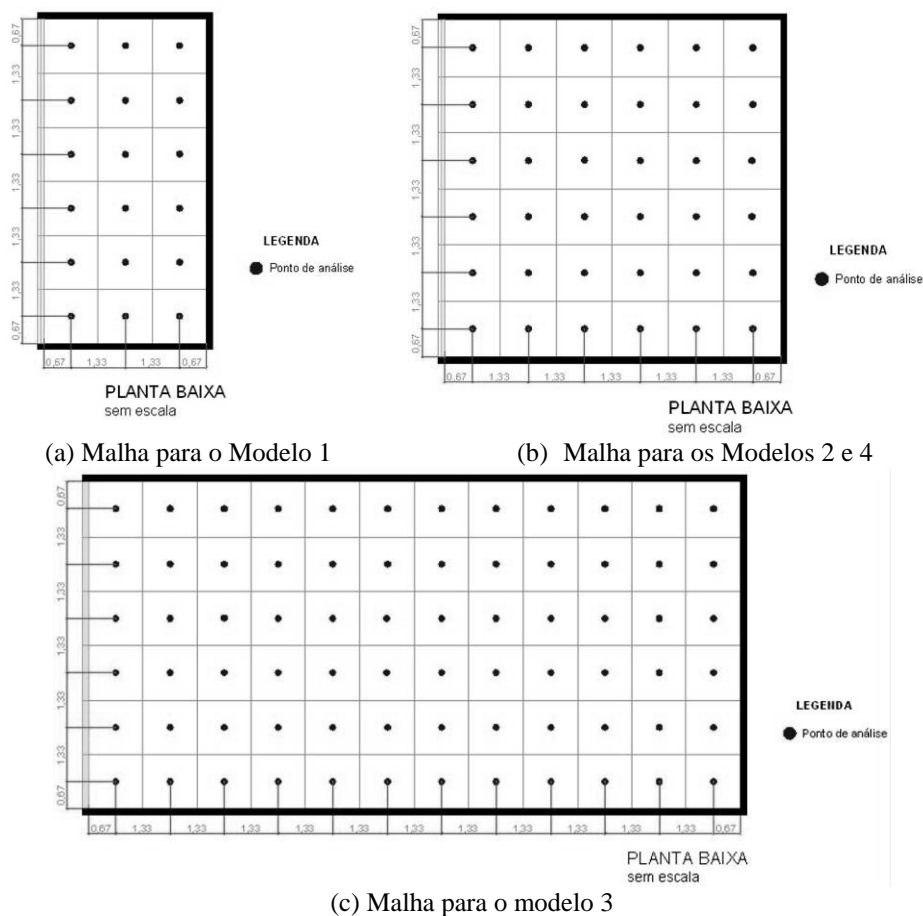


Figura 1 - Malhas de pontos do plano de análise para o Modelo 1, Modelo 2 e Modelo 3

Modelo	Interreflexão no ambiente	Divisão do ambiente	Amostragem do ambiente	Acuracidade	Resolução	Fonte direta	Amostragem direta
Sem proteção solar	5	1.000	20	0.1	300	0	0
Com proteção solar	7	1.500	100	0.1	300	0	0

Fonte: adaptado de Reinhart (2006).

Tabela 3 - Dados de entrada para os modelos

Para iniciarem-se as simulações, foi necessário preparar os modelos computacionais em um programa CAD. O *Daysim* aceita modelagem em diversos aplicativos computacionais, contanto que o arquivo seja exportado no formato 3DS. Como o *Daysim* simula a iluminação através do RADIANCE, seu tutorial sugere alguns dados de entrada que devem ser inseridos de acordo com as características do modelo utilizado (Tabela 3).

Após cada simulação, o programa produz um relatório com os valores de *Daylight Autonomy* para cada ponto da malha e um relatório CSV (*comma separated value*) com os dados de

consumo da iluminação artificial, necessário para o cálculo do consumo de energia elétrica. Este último foi utilizado como controle de iluminação para a simulação integrada no *EnergyPlus*.

Simulação energética integrada

Com a simulação energética integrada foi possível avaliar o impacto na economia de energia a partir do aproveitamento da luz natural. A simulação energética integrada é possível com a utilização do relatório gerado pelo *Daysim*, que informa os valores horários de ocupação e acionamento da iluminação.

Para os dados de entrada no programa de simulação, utilizaram-se as características construtivas de uso e ocupação dos modelos e o relatório do controle de iluminação artificial obtido na simulação de iluminação. O sistema de iluminação utilizado no *Daysim* possui um controle de sensores fotoelétricos *dimmerizáveis* que regulam a intensidade de energia para iluminação conforme a disponibilidade de luz natural e mantém o ambiente com um nível de iluminação constante. A iluminação é ativada por meio de um único interruptor liga/desliga, perto da porta, e a fotocélula consome 2 W em *standby*.

Antes de utilizar o relatório com os ganhos internos (CSV) no *EnergyPlus*, os dados devem ser convertidos, já que o *EnergyPlus* e o *Daysim* trabalham com unidades de iluminação diferentes, watts e ILD respectivamente. Sendo assim, os valores de *Installed Lighting Power Density* do relatório do *Daysim* foram convertidos para um valor correspondente de potência instalada, dividindo-se a densidade de potência do relatório pela potência instalada (7 W/m²), que resultou em um valor percentual de utilização da potência instalada em toda a sala.

Dessa forma, foi possível utilizar os valores horários do fator da potência em uso como *Schedule* de controle do sistema de iluminação no *EnergyPlus*, inserida como ilustra a Figura 2.

Inicialmente foi necessário realizar um teste no *EnergyPlus* para comparar os dois métodos existentes no cálculo com o sistema de controle de iluminação:

- (a) o método da radiosidade, que pode ser acionado pelo comando *DElight*; e
- (b) o método *Split Flux*, que pode ser acionado pelo comando *Daylighting:Controls*.

Resultados e discussão

Esta seção apresenta os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta. Inicialmente é apresentada a comparação entre os resultados obtidos com a simulação do consumo energético através do sistema de controle de iluminação do *EnergyPlus* e da integração dos resultados de controle de iluminação do *Daysim* na simulação energética do *EnergyPlus*. Na sequência pode-se observar o comportamento da luz natural nos diferentes modelos em estudo com os valores de *Daylight Autonomy* (DA) obtidos nas simulações com o programa *Daysim*. Para finalizar, são apresentados os resultados das simulações termoenergéticas e das simulações integradas, no *EnergyPlus*, com os modelos-base e os modelos de diferentes parâmetros.

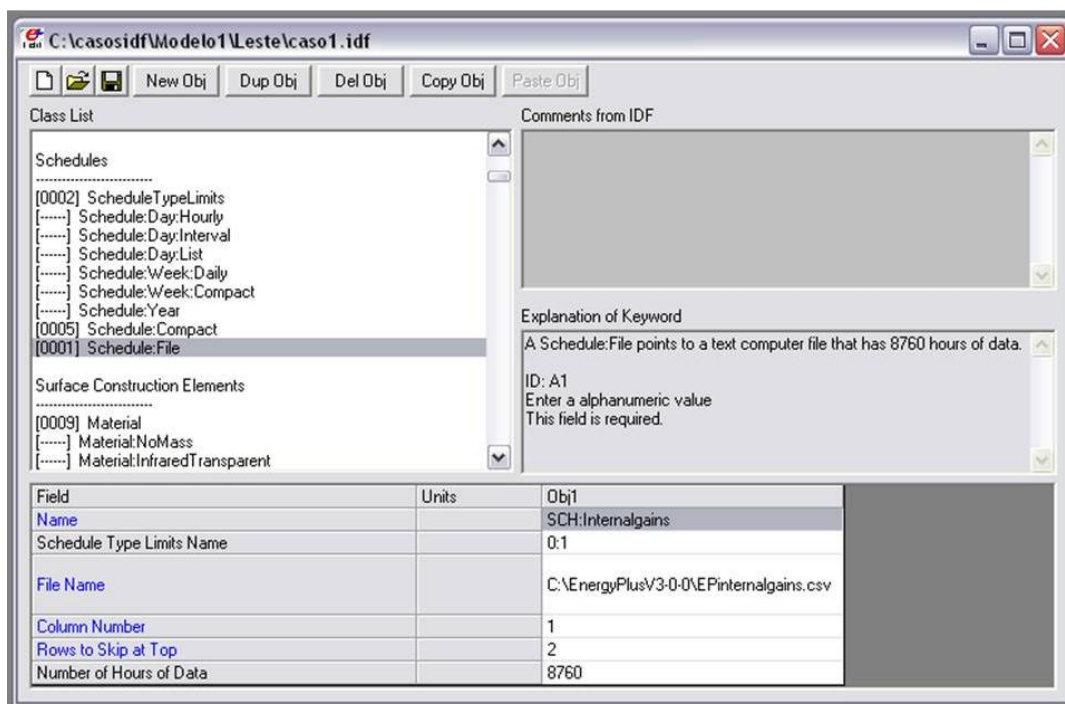


Figura 2 - Configuração do funcionamento do sistema de iluminação artificial no *EnergyPlus*

Simulação termoenergética versus simulação integrada

Nas simulações realizadas pelo *EnergyPlus* foram levantados valores de consumo de energia por uso final em iluminação, ar condicionado e equipamentos de cada caso em estudo. Para esta análise foram comparados os resultados adquiridos pelo modelo-base, que possui iluminação artificial ligada durante todo o período de ocupação; pelos modelos simulados com sistema de controle de iluminação do *EnergyPlus*, que simula a luz natural pelo método *split flux* e pelo método da radiosidade; e pelos modelos simulados com o sistema de controle de iluminação do *Daysim*, que utiliza o método *ray-tracing* para simular a iluminação natural. Essa análise foi realizada nos modelos com orientação norte, PAF de 75%, FS de 0,82 e ausentes de proteção solar (AVS e AHS igual a 0°) (Figura 3).

O uso do controle de iluminação, nas simulações com o *EnergyPlus* e com o *Daysim*, proporcionou redução do consumo, já que o consumo proveniente da iluminação artificial diminuiu. O consumo com ar condicionado apresentou valores elevados nos modelos-base (MBase). O ar condicionado se refere apenas ao resfriamento do ambiente. O consumo com aquecimento apresentou valores de apenas 12 kWh/ano; assim, decidiu-se por não incluir o aquecimento nas análises. O baixo consumo com aquecimento para o clima de Florianópolis foi consequência do calor gerado pelos equipamentos e usuários no período de ocupação e, por se tratar de ambientes de trabalho, as cargas internas foram altas e suficientes para aquecer o ambiente no inverno.

Os dois tipos de controle simulados no *EnergyPlus*, pelo método da radiosidade e pelo método *split flux*, apresentaram valores

semelhantes e próximos a 1 kWh/m²/ano, o que corresponde a uma redução do consumo com iluminação artificial de mais de 94% quando comparado ao MBase. Esse valor de redução significa que o sistema de iluminação artificial foi mantido desligado quase todo o tempo, com exceção do Modelo 3, que, pelo método da radiosidade, obteve um consumo de 8,1 kWh/m²/ano, resultando numa redução de 68% do consumo de energia em relação ao MBase. O consumo com iluminação obtido pelo *Daysim* apresentou uma redução de aproximadamente 50% em relação ao MBase. Dependendo da profundidade do ambiente, o *Daysim* apresentou valores no consumo com iluminação artificial até 10 vezes maiores do que o *EnergyPlus*.

Esses dados servem de indicação da inadequação do *EnergyPlus* na simulação de iluminação natural. O uso da simulação integrada é uma alternativa para contornar esse problema, já que a integração dos valores de iluminação natural obtidos pelo *Daysim* junto com a simulação energética do *EnergyPlus* apresentou resultados mais factíveis.

Comportamento da luz natural

Os modelos elaborados para o estudo do comportamento da luz natural obtiveram diferentes resultados de DA, de acordo com as variáveis geométricas utilizadas em sua composição. De forma geral, em relação às variáveis relacionadas à abertura, os modelos orientados para norte, sem proteção solar, com PAF de 75% e FS de 82%, foram os que obtiveram maiores valores de DA em uma maior porcentagem de área. Os modelos orientados para sul, com AVS, PAF de 25% e FS de 23%, apresentaram os menores valores de DA por unidade de área.

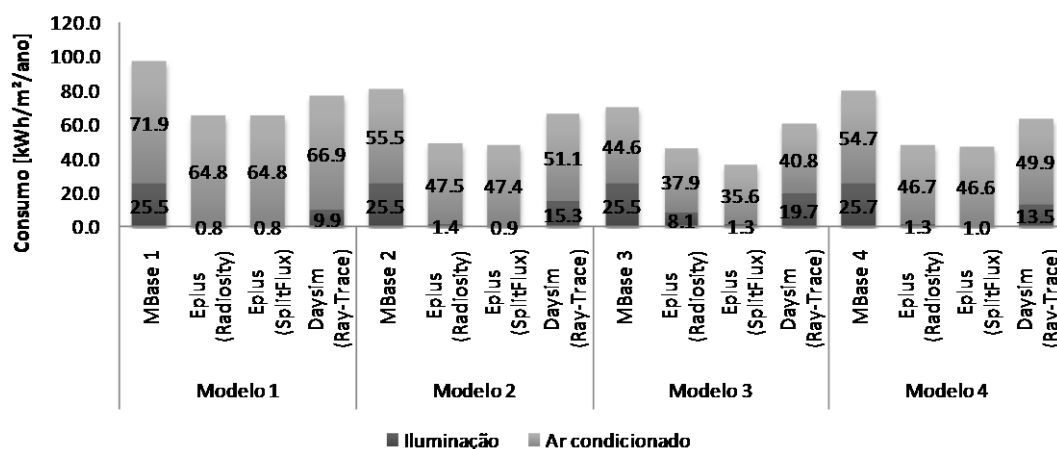
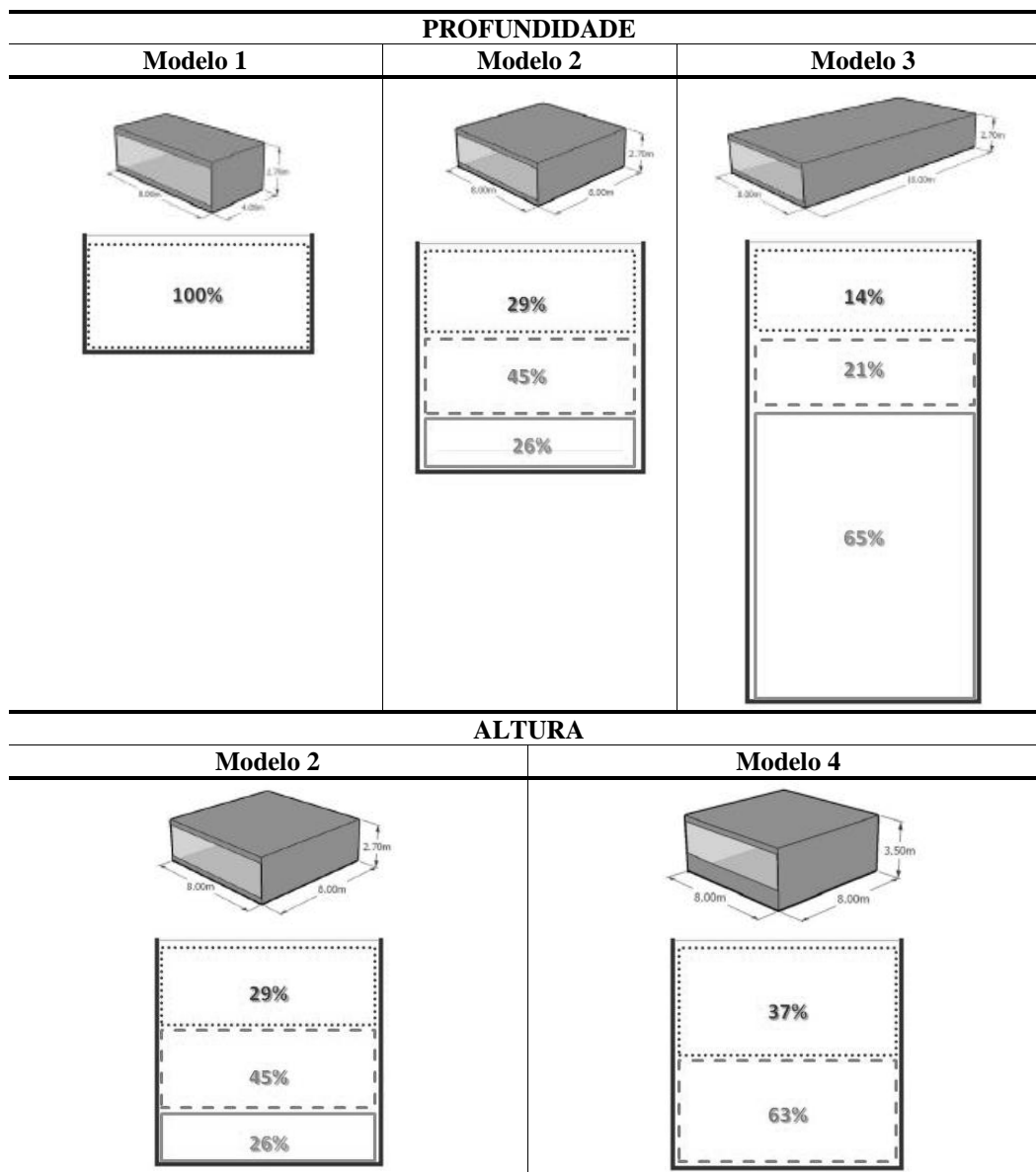


Figura 3 - Consumo energético simulado por diferentes métodos - modelos orientados para o norte



Legenda:

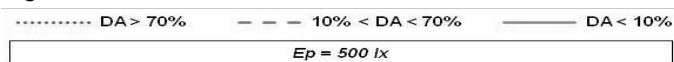


Tabela 4 - Síntese dos modelos com diferentes variáveis e alturas

A Tabela 4 sintetiza os resultados dos modelos em relação à profundidade e à altura do ambiente. Os gráficos isoDA (*Iso Daylight Autonomy*) possuem três marcações: a marcação pontilhada corresponde à porcentagem de área do modelo com valores de DA maiores do que 70%; a marcação tracejada corresponde a valores de DA entre 10% e 70%; e a marcação contínua corresponde a valores de DA menores do que 10%. Como pode ser observado na tabela, o Modelo 1, com profundidade de 4 m, possui 100% de sua área com autonomia da luz natural acima de 70%; já o Modelo 3, com profundidade de 16 m, possui apenas 35% de sua área com autonomia da luz

natural maior do que 10%. O mesmo pode ser constatado em relação à altura. O aumento do pé-direito elevou a autonomia da luz natural, permitindo que o ambiente tivesse 100% de sua área com DA acima de 10%.

A análise com o DA não identifica as situações com níveis de iluminação muito elevados. A utilização de um dispositivo do tipo persiana seria uma possível solução para reduzir o excesso de luz e prevenir efeitos indesejáveis como o desconforto visual.

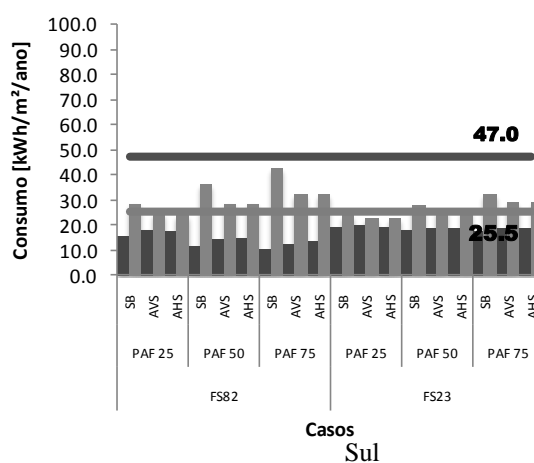
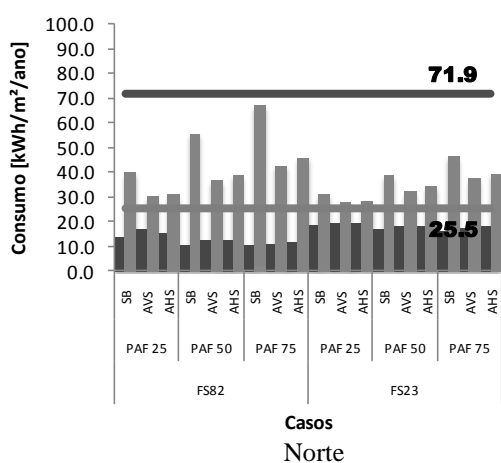
Influência da luz natural no consumo de energia

Todas as simulações têm como comparação os resultados das simulações do *EnergyPlus*, que considera a iluminação artificial ligada durante todo o período de ocupação, com os resultados das simulações integradas: *Daysim + EnergyPlus*.

Os resultados estão apresentados em gráficos formados por colunas e linhas. As colunas representam os valores de consumo obtidos com as simulações integradas dos modelos com diferentes parâmetros, e as linhas representam os valores de

consumo obtidos com as simulações termoenergéticas para os modelos-base de cada grupo de modelo (Figuras 4 a 7).

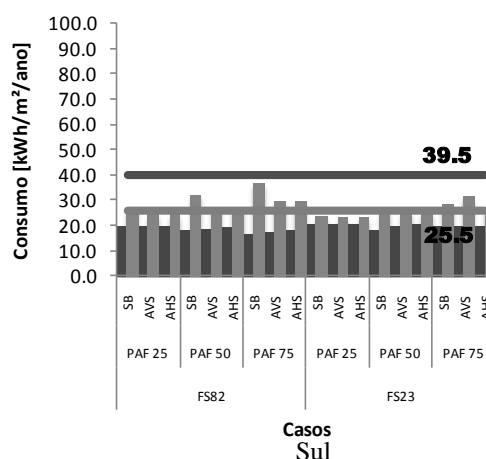
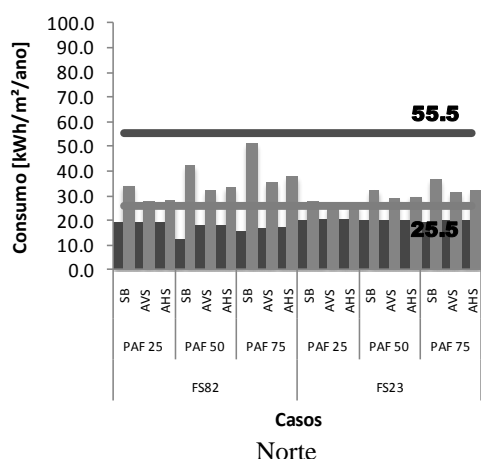
As figuras acima contêm os dados obtidos nas simulações integradas. Optou-se por apresentar apenas a orientação norte e sul de cada modelo. As orientações leste e oeste tiveram valores totais de consumo bem semelhantes aos da orientação norte. A orientação sul obteve os menores valores de consumo por uso final, porém maiores em relação ao consumo de iluminação, já que em Florianópolis, devido à localização geográfica, é a orientação que menos recebe luz natural.



Legenda:



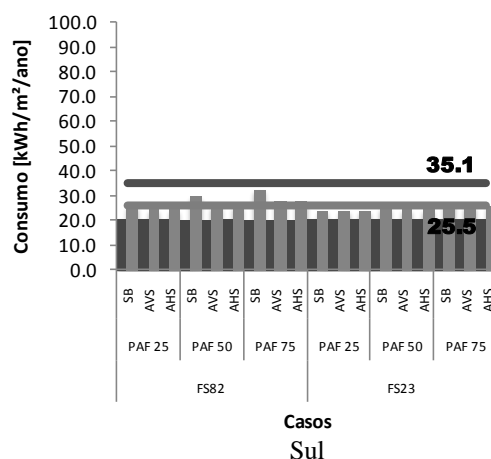
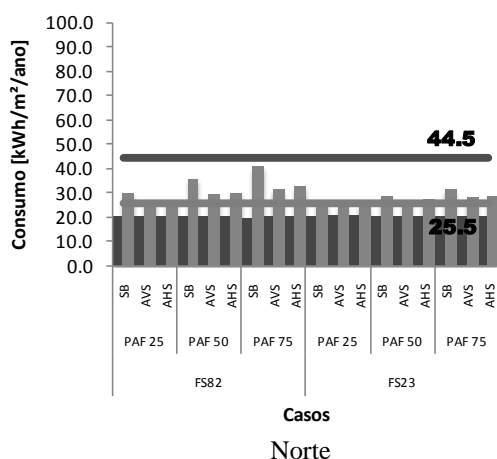
Figura 4 - Resultados do consumo de energia nas simulações do Modelo 1



Legenda:



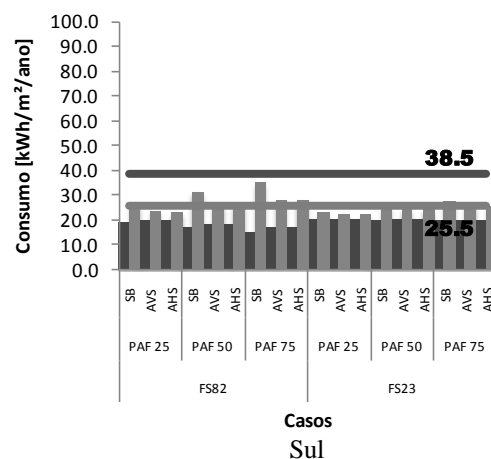
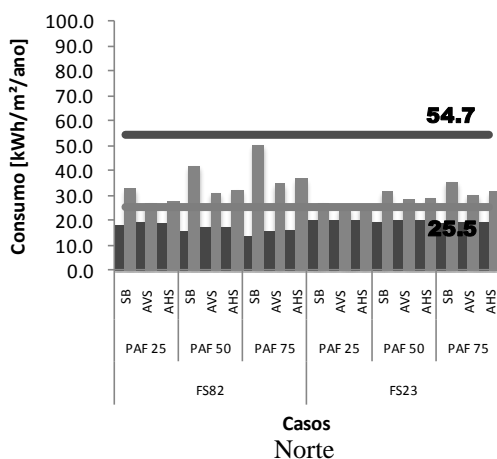
Figura 5 - Resultados do consumo de energia nas simulações do Modelo 2



Legenda:

- Iluminação
- Ar condicionado
- MBase_Iluminação
- MBase_ArCondicionado

Figura 6 - Resultados do consumo de energia nas simulações do Modelo 3



Legenda:

- Iluminação
- Ar condicionado
- MBase_Iluminação
- MBase_ArCondicionado

Figura 7 - Resultados do consumo de energia nas simulações do Modelo 4

Na análise do consumo energético referente ao sistema de iluminação artificial percebe-se nos modelos em estudo que o consumo com iluminação está diretamente relacionado à profundidade do ambiente. Ou seja, quanto menor a profundidade da sala, maior é a porcentagem da área atingida pela luz natural e menor é o consumo com iluminação artificial. Como pode ser visto na Figura 6, em todos os casos do Modelo 3, com profundidade de 16 m, quase não há variação na iluminação. Isso acontece pelo fato de que os modelos apresentam luz natural apenas na região próxima à abertura, deixando mais de 50% da área do ambiente com necessidade da iluminação

artificial ligada durante todo o período de ocupação para atingir a iluminância de projeto.

A redução do consumo com iluminação, pelo aproveitamento da luz natural, influencia positivamente o comportamento do ar condicionado, que apresenta menor consumo de energia devido à redução das cargas internas provenientes do sistema de iluminação artificial. Isso acontece em todas as orientações e pode ser observado quando se compara com o MBase; quanto menor é o consumo com iluminação artificial, menor é o consumo com ar condicionado.

Na análise dos diferentes modelos observou-se que todos aqueles com o PAF de 75%, FS de 82% e sem proteção solar apresentaram o menor consumo com iluminação artificial, porém maior consumo com ar condicionado. Esses casos apresentam os maiores valores de DA por unidade de área e, conseqüentemente, maior carga térmica proveniente da radiação solar devido aos materiais utilizados e à ausência de proteção solar.

Os resultados obtidos com os diferentes modelos tornaram possível identificar uma tendência na relação entre o consumo de energia e os parâmetros geométricos, confirmando o que já foi apontado e discutido por Ghisi, Tinker e Ibrahim (2005). Na análise do consumo com iluminação artificial identificou-se uma tendência com a razão da área de fachada pela área de piso, e na análise do consumo com ar condicionado a tendência foi identificada pela razão da área de fachada pelo volume do modelo.

Essa tendência pode ser observada na Figura 8, que ilustra um dos casos simulados como exemplo, o caso orientado para norte, com PAF de 75%, FS de 82% e sem proteção solar. No gráfico as colunas se referem, respectivamente, ao consumo com iluminação artificial, ar condicionado e consumo total; a linha tracejada corresponde à razão da área de fachada pela área de piso [AF/AP]; e a linha pontilhada corresponde à razão da área de fachada pelo volume do modelo [AF/V].

Como os ambientes em estudo foram modelados com apenas uma fachada voltada para o ambiente externo, proporcionando ganho de calor pelas trocas térmicas, houve relação entre as formas geométricas e o consumo de energia. Os modelos mais compactos apresentaram o maior consumo por unidade de volume, apresentando menor perda

de calor no interior do ambiente pelas trocas térmicas.

Analisando a relação entre o consumo com iluminação artificial e a razão [AF/AP], percebe-se que, quanto maior a razão, menor o consumo com iluminação artificial, já que os ambientes mais rasos e mais altos apresentam melhor distribuição da luz natural. Na relação do consumo com ar condicionado e a razão [AF/V], ocorre o inverso: quanto maior esta razão, maior o consumo com ar condicionado.

Conclusão

Este estudo avança na avaliação do impacto do uso da iluminação natural na redução do consumo de energia elétrica em edificações não residenciais. A integração de duas ferramentas computacionais utilizadas na análise do desempenho luminoso e termoenergético de edificações, *Daysim* e *EnergyPlus*, foi a solução encontrada para contornar a limitação existente no *EnergyPlus*. A aplicação do método da simulação integrada consistiu em calcular num programa (*EnergyPlus*) o consumo energético anual utilizando o arquivo de dados gerado em outro programa (*Daysim*).

O impacto do aproveitamento da luz natural no consumo energético total foi analisado pelo consumo de energia com ar condicionado e iluminação artificial. O uso do controle do sistema de iluminação artificial, diante do aproveitamento da luz natural, proporcionou uma redução no consumo de energia com iluminação em todos os modelos e influenciou o comportamento do ar condicionado, que teve seu consumo reduzido devido à diminuição das cargas internas provenientes do sistema de iluminação artificial. A redução obtida no consumo final variou de 12% a 52%.

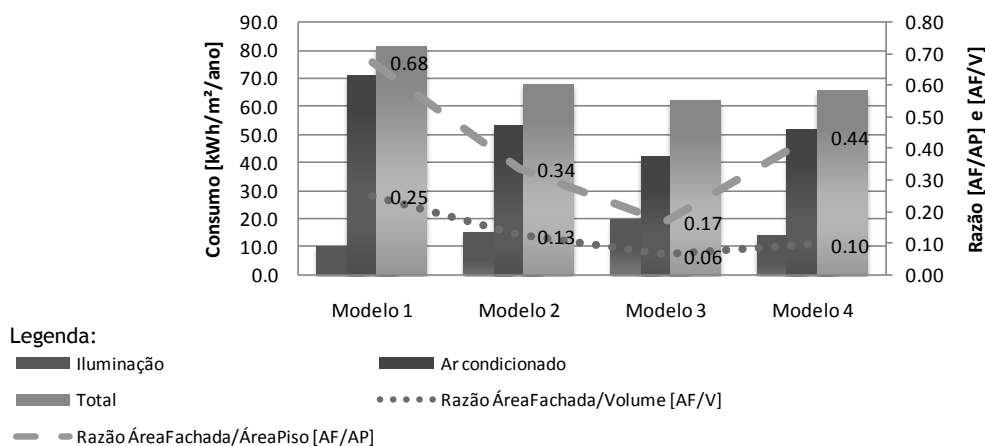


Figura 8 - Relação do consumo com a razão [AF/AP] e [AF/V]

Na avaliação da volumetria dos modelos, que engloba as variáveis profundidade e altura (pé-direito), percebeu-se que, quanto menos profundo e mais alto for o ambiente, menor será o consumo com iluminação artificial. Por serem ambientes iluminados unilateralmente, o interior acaba ficando mais próximo da abertura, sendo beneficiado pela luz natural, ficando os modelos mais profundos com mais de 50% de sua área carente de iluminação durante todo o ano. Por outro lado, os ambientes mais profundos, por possuírem maior volume (afastado do ponto de admissão de calor – a abertura), apresentaram menor carga térmica por metro cúbico, reduzindo gastos com ar condicionado. Mais uma vez confirma-se a correlação existente entre o consumo de energia e o inverso da profundidade dos ambientes.

A partir dos resultados obtidos e das limitações encontradas na realização deste trabalho, sugere-se investigar em trabalhos futuros a redução no consumo de energia elétrica através da exploração de modelos comportamentais para o controle de cortinas, iluminação artificial e proteções solares.

Espera-se que este estudo contribua com informações acerca do processo de avaliação do desempenho luminoso e energético e sirva de subsídio para a inclusão da iluminação natural no processo de avaliação da eficiência energética de edificações em geral.

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5413**: iluminância de Interiores. Rio de Janeiro, 1992. 13 p.

BOKEL, R. M. J. The Effect of Window Position and Window size on the Energy Demand for Heating, Cooling and Electric Lighting. In: BUILDING SIMULATION, 2007, Delft, Netherlands. **Proceedings...** Delft: BS, 2007. p. 117-121.

BOURGEOIS, D.; REINHART, C.; MACDONALD, I. Adding Advanced Behavioral Model in Whole Building Energy Simulation: a Study on the Total Energy Impact of Manual and Automated Lighting Control. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 814-823, 2006.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética da Envoltória de Edificações Não Residenciais**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CRAWLEY, D. B. *et al.* EnergyPlus: a new-generation building energy simulation program. In: BUILDING SIMULATION; INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 6., Kyoto, 1999. **Anais...** Kyoto: BS, 1999. 1 CD-ROM.

GHISI, E.; TINKER, J. A.; IBRAHIM, S. H. Área de Janela e Dimensões de Ambientes para Iluminação Natural e Eficiência Energética: literatura versus simulação computacional. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 81-93, out./dez. 2005.

KOTI, R.; ADDISON, M. An Assessment of Aiding DOE-2's Simplified Daylighting Method With Daysim's Daylight Illuminances. In: AMERICAN SOLAR ENERGY SOCIETY ANNUAL CONFERENCE, 36., Cleveland, 2007. **Proceedings...** Cleveland, 2007.

MOORE, F. **Concepts and Practice of Architectural Daylighting**. New York: VNR, 1985.

NABIL, Azza; MARDALJEVIC, John. Useful Daylight Illuminances: a replacement for daylight factors. Science Direct. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 905-913, 2006.

PEREZ, Richard *et al.* Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance. **Solar Energy**, v. 44, n. 5, p. 271-289, 1990.

RAMOS, G. **Análise da Iluminação Natural Calculada por Meio do Programa Energyplus**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

REINHART, C. F. **Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design**. Ottawa: Institute for research in Construction National Research Council Canada, 2006.

REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. **Leukos**, v. 3, n. 1, 2006.

SANTANA, M. V. **Influência de Parâmetros Construtivos no Consumo de Energia de Edifícios de Escritório Localizados em Florianópolis, SC**. 2006. 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SOUZA, M. B. **Potencialidade de Aproveitamento da Luz Natural Através da Utilização de Sistemas Automáticos de Controle para Economia de Energia Elétrica**. 2003. 208 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

WARD, G. **Radiance Tutorial**. Building Technologies Department. Lawrence Berkeley Laboratory. 1993. Disponível em: <<http://radsite.lbl.gov/radiance/>>. Acesso em: 10 jun. 2008.

WINKELMANN, F.; SELKWITZ, S. Daylighting Simulation in the DOE-2 Building Energy Analysis Program. **Energy and Buildings**, v. 8, n. 4, p. 271-286, 1985.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro na forma de bolsa de estudo.