



**XIENCAC**  
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO  
NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

**VIIELACAC**  
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO  
NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Búzios - RJ - 2011

## **AValiação DO CONSUMO DE ENERGIA DE EDIFICAÇÕES CONSIDERANDO A LUZ NATURAL E SISTEMAS DE CONTROLE ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL INTEGRADA**

**Ana Paula de Almeida Rocha (1); Fernando Oscar Ruttkay Pereira (2)**

(1) Arquiteta, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo,  
anapaula@labcon.ufsc.br

(2) PhD, Professor Titular do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, feco@arq.ufsc.br  
Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Conforto Ambiental, Caixa Postal 476, Florianópolis  
- SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721-9797

### **RESUMO**

A iluminação natural é uma importante estratégia para economia de energia elétrica em edificações. Para uma previsão adequada do potencial de economia de energia via aproveitamento da luz natural em edificações é fundamental considerar os sistemas de controle da iluminação artificial e natural (p.ex. cortinas, venezianas, brises, etc.), uma vez que os seus usos, freqüentemente afetados pela ação dos usuários, influenciam no comportamento da luz natural e no consumo de energia elétrica final da edificação. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar do consumo de energia elétrica total em um ambiente interno, considerando o aproveitamento da luz natural e o uso de sistemas variados de controle de iluminação artificial e natural utilizando dois programas de simulação. A metodologia empregada consiste na avaliação do desempenho luminoso e energético por meio de simulação computacional integrada dos programas Daysim e EnergyPlus. Inicialmente, o modelo de estudo é simulado no Daysim alternando-se os diferentes tipos de controle de iluminação artificial e de venezianas disponíveis no programa, com um padrão de ocupação misto – existência de ocupantes passivos e ativos. O Daysim produz um relatório descrevendo os horários de ocupação e de acionamento dos sistemas de controle que é posteriormente utilizado na simulação energética do EnergyPlus, que calcula o consumo de energia do ambiente analisado. Os resultados indicam uma diferença considerável nos valores encontrados a partir das simulações de luz natural e de consumo de energia final em função das variações dos tipos de controle. Este trabalho ressalta a importância de se considerar a relação entre a iluminação natural, os sistemas de controle de iluminação (artificial e natural) e a participação do usuário para avaliação mais precisa da eficiência energética de edificações.

Palavras-chave: iluminação natural, sistemas de controle, eficiência energética, simulação computacional.

### **ABSTRACT**

Daylighting is an important strategy for energy savings in buildings. For an adequate prediction of the potential energy savings via use of daylighting in buildings it is essential to consider the control systems of artificial lighting and blinds (eg curtains, shutters, louvers, etc.). This study aims to evaluate the total energy consumption in an indoor environment, considering the use of natural light and the use of various control systems using two simulation programs. The methodology consists in evaluating the energy through integrated simulation programs Daysim and EnergyPlus. Initially, the model was simulated in Daysim with different types of control for artificial lighting and blinds, using a mixed pattern of occupation - passive and active. Daysim produces a report describing the schedules and use control systems. This report is used in EnergyPlus, which calculates the total energy consumption. The results indicate a considerable difference in the values of daylighting metrics and energy consumption as a function of changes in the types of control. This work emphasizes the importance of considering the natural lighting, control systems, lighting (natural and artificial) and user participation in energy efficiency of buildings.

Keywords: Daylighting, control systems, energy efficiency, computer simulation.

## 1. INTRODUÇÃO

O uso da iluminação natural em ambientes de trabalho pode representar um grande potencial de economia de energia elétrica; setores como o comercial e público utilizam cerca de 20% da energia elétrica em iluminação (PROCEL/ELETOBRAS, 2007). Para garantir essa economia, é necessário que o edifício esteja adequado às condições de iluminação e clima do local e tenha um sistema de iluminação artificial eficiente e apropriado para o edifício e seu tipo de uso.

Além disso, o uso de sistemas de controle de iluminação artificial e de venezianas adequados ao padrão de ocupação e uso do edifício é essencial para a real contribuição da luz natural no uso eficiente da energia minimizando o gasto com a luz artificial. Alguns estudos mostraram que em edifícios comerciais, a escolha pelo controle pode proporcionar uma melhora de 30 a 40% no uso de iluminação (BAKER e STEEMERS, 2002). Souza (2003) desenvolveu o PALN (Percentual de Aproveitamento da Luz Natural), uma metodologia para estimar a potencialidade de aproveitamento da luz natural utilizando os sistemas automáticos de controle para economia de energia elétrica em iluminação artificial. O PALN indica o período em que é possível utilizar a luz natural para substituir ou complementar a iluminação artificial. Considerando aspectos concretos, Galasiu (2007) apresentou um estudo de campo em um edifício real onde foram instalados diferentes tipos de controle de iluminação. Dependendo da combinação dos sistemas, foram constatadas economias de energia variando de 15 a 67% na carga de iluminação.

Muitos trabalhos discutem a economia de energia gerada pela instalação de diferentes sistemas de controle de iluminação artificial integrados a luz natural, entretanto é necessária ressaltar a importância de se analisar também os sistemas de controle de venezianas, justificada principalmente pelo emprego comum nos edifícios comerciais e públicos no Brasil. O uso adequado dos dispositivos de sombreamento pode melhorar o aproveitamento da luz natural e impedir a incidência solar direta, diminuindo os efeitos de ofuscamento e brilho e os excessos de ganho de calor. Por outro lado, o seu acionamento indevido interfere no uso do sistema de iluminação artificial. Em edifícios não residenciais, é comum observar um cenário de venezianas abaixadas e lâmpadas acesas em períodos que a luz natural poderia ser aproveitada, caracterizando um conjunto energeticamente ineficiente. Wielnold (2007) descreve um método para avaliar estratégias de controle para instrumentos de sombreamento, explorando as questões de admissão de luz natural, conforto e energia. Através de simulações computacionais, verificou-se que sistemas de controle automatizados alcançaram melhores resultados nos aspectos de conforto e energia.

O comportamento dos ocupantes tem um efeito significativo sobre o consumo energético de uma edificação. Um edifício com sistemas eficientes pode falhar se os ocupantes tiverem um comportamento de desperdício energético. Estudos estão sendo feitos utilizando modelos comportamentais para simulações que avaliem o impacto do tipo de controle no consumo de energia. O Lightswitch2002 é um desses modelos comportamentais, que prediz as respostas dos usuários à dinâmica da iluminação no controle de sistemas de iluminação e cortinas e requer dados de entrada simples como a chegada e saída dos usuários, o tempo médio de intervalos e refeições, etc (BOURGEOIS et al, 2006).

Para avaliar o desempenho luminoso e energético das edificações, programas computacionais têm sido largamente utilizados porque são capazes de desenvolver modelos complexos que envolvem uma grande quantidade de variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares.

As análises de desempenho da iluminação natural podem ser realizadas através de medidas estáticas ou dinâmicas. As simulações estáticas representam condições de iluminação para uma única situação determinada e seus resultados são expressos geralmente na forma de imagens foto-realísticas ou por valores numéricos de iluminância, como medida mais comum, pode-se citar o Fator de Luz Diurna; já as simulações dinâmicas consideram todas as condições de iluminação natural durante o ano e traçam o perfil anual de iluminação natural, seus resultados são expressos como a ocorrência do nível de iluminação de interesse, e geralmente podem ser representadas pelas seguintes medidas: Autonomia da luz natural e Iluminâncias úteis da luz natural. As simulações dinâmicas são consideradas mais vantajosas por considerar variações horárias e sazonais na distribuição de iluminação natural (REINHART et al, 2006).

O programa Daysim é um dos simuladores que desenvolve a análise de iluminação natural usando o algoritmo do *Radiance*<sup>1</sup> para calcular as iluminâncias internas de um ambiente no período de um ano. O Daysim utiliza dados anuais de radiação solar de arquivos climáticos completos para calcular o perfil anual

---

<sup>1</sup> O programa Radiance, desenvolvido por Greg Ward no Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), baseia-se no método do raio traçado, para prever iluminâncias internas e a distribuição das luminâncias em ambientes de geometria complexa, sob qualquer condição de céu (REINHART, 2006)

de iluminação interna e simular o comportamento do sistema de controle de iluminação e venezianas por meio do modelo comportamental Lightswitch (REINHART, 2006).

Na simulação do consumo energético também é recomendado considerar as variáveis climáticas no curso de todo ano. A análise integral entre sistemas de iluminação natural, refrigeração e aquecimento pode ser feita através da aplicação de programas como o EnergyPlus – derivado dos programas BLAST e DOE-2. O EnergyPlus prediz o consumo de energia considerando o balanço de calor do BLAST com base na caracterização do edifício quanto a sua geometria, componentes construtivos, cargas instaladas, sistemas de condicionamento de ar e padrões de ocupação (ENERGYPLUS, 2007).

O programa EnergyPlus permite também determinar o impacto do aproveitamento da luz natural no consumo energético. No entanto, Winkelmann e Selkowitz (1985) já demonstraram algumas limitações no cálculo da iluminação natural. Os resultados do programa apresentam diferenças em relação a sistemas que utilizam outros métodos de simulação como o Daysim. O método empregado pelo EnergyPlus, Split Flux, não é recomendado para ambientes em que a profundidade medida a partir da janela seja maior que três vezes a altura do pé-direito, uma vez que o método pode superestimar a iluminação interna refletida na parede dos fundos. Ramos e Ghisi (2010) analisaram o cálculo da iluminação natural comparando as iluminâncias internas calculadas através dos programas EnergyPlus, Daysim/Radiance e Troplux e verificaram-se das deficiências do EnergyPlus: os cálculos da parcela de luz refletida interna e das iluminâncias externas foram maiores do que as reais.

Diante das limitações dos EnergyPlus, alguns trabalhos já optaram pela 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 (DIDONÉ, 2009).

Neste trabalho, foram feitas simulações computacionais integradas utilizando Daysim e EnergyPlus a fim de comparar o desempenho luminoso e energético de um modelo com diferentes sistemas de controle de iluminação artificial e de venezianas integrados a luz natural.

## **2. OBJETIVO**

Este artigo tem como objetivo avaliar o consumo energético final – iluminação, ar condicionado e equipamentos – de um modelo arquitetônico considerando o aproveitamento da luz natural e a integração de diferentes sistemas de controle de iluminação artificial e natural.

## **3. MÉTODO**

Esse trabalho avalia o desempenho luminoso e energético através de simulação computacional com os programas Daysim e EnergyPlus. O Daysim produz um relatório descrevendo o padrão horário de ocupação e os sistemas de controle da iluminação artificial e das venezianas, que é utilizado na simulação energética do EnergyPlus, que calcula o consumo de energia final do ambiente analisado. Este procedimento será detalhado a seguir.

### **3.1. Características do modelo para as simulações**

A primeira etapa consiste da escolha de um modelo para simulação, baseando-se em levantamentos e trabalhos anteriores. A partir do modelo e implantação estipulados, foi feita a variação dos sistemas de controle de iluminação e de venezianas – manual, automatizado e estático – a serem investigados e a elaboração dos arquivos para simulação.

Para a escolha do modelo predominante de edifício de escritórios na cidade de Florianópolis/SC foram levantados dados de trabalhos já realizados. Didoné (2009) elaborou seus modelos paramétricos a partir do trabalho de levantamento feito por Santana (2006) de 35 edifícios em relação à caracterização construtiva e 41 escritórios em relação ao padrão de ocupação e uso de equipamentos. Dessa forma, baseando-se no trabalho de Didoné (2009), um modelo foi utilizado para a realização da simulação.

O modelo escolhido está representado por um paralelepípedo ortogonal dividido em piso, paredes e teto, com as laterais medindo 8 metros, obtendo uma área interna total de 64m<sup>2</sup>. O modelo possui pé-direito de 2,70 metros; e uma área de janela de 10,80 m<sup>2</sup>, o que corresponde à largura total da sala de 8 metros e altura de 1,35m. O peitoril da janela equivale a 1,00 m. Nas figuras 1 e 2, o modelo escolhido está representado:



Figura 1 – Planta do Modelo para simulação

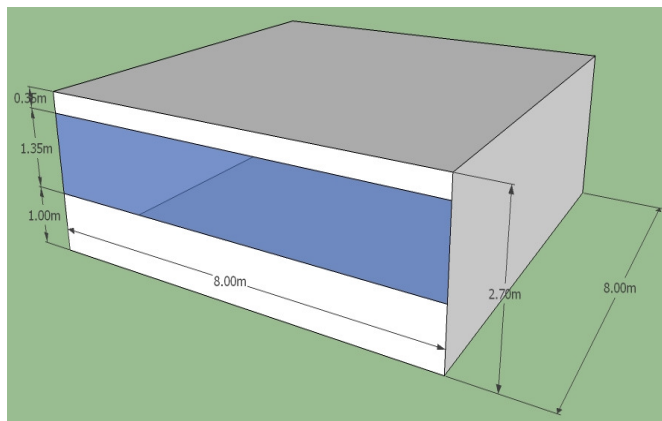


Figura 2 – Perspectiva do modelo

As refletâncias internas dos ambientes foram 70% para teto, 50% para paredes e 20% para o piso. E os vidros possuem transmitância solar equivalente a 87%.

A fachada frontal – onde está localizada a janela – tem orientação voltada para o norte. A escolha de uma só orientação para simulação se justifica pelo foco do trabalho na análise dos sistemas de controle de iluminação e de venezianas e do comportamento dos usuários diante esses dispositivos. É importante lembrar que o entorno não foi considerado.

Em relação ao uso de equipamentos e padrão de ocupação foram considerados os equipamentos básicos, como lâmpadas, computadores e aparelhos de ar condicionado.

O sistema de condicionamento de ar é composto por um aparelho de janela que opera durante o horário de uso da edificação para manter a temperatura interna entre 18° e 24°C durante todo o ano. Essa temperatura é comumente encontrada em trabalhos relacionados à cidade de Florianópolis.

Baseando em Didoné (2009), o sistema de iluminação artificial foi definido a partir de um projeto de iluminação geral, calculado pelo método dos lúmens. Os sistemas são compostos por luminárias de embutir de alta eficiência e aletas metálicas. Cada luminária contém duas lâmpadas fluorescentes tubulares T5 de 28W que medem uma densidade de potência instalada de 7W/m<sup>2</sup>. A iluminância de projeto com valor 500 lux foi adotada conforme os fatores determinantes para as atividades de escritório, segundo a NBR 5413.

A ocupação e o horário de funcionamento seguiram os padrões dos escritórios brasileiros. Normalmente, os períodos com ocupação mais completa são das 8 às 12h e das 14 às 18h, já que é comum não existir expediente no horário de almoço – 12 às 14h. Portanto, foi adotado o período de simulação de 8 às 18h com ocupação de 12 pessoas, o que equivale a uma média de taxa de ocupação de 18m<sup>2</sup> por pessoa.

Os computadores foram definidos com uma carga térmica média por pessoa de 90W.

Para avaliação da medida dinâmica da Autonomia da luz natural (Daylight Autonomy DA – em inglês) no plano de trabalho, as simulações foram feitas em uma quantidade de pontos suficiente para análise, tomando como base as orientações dadas pela norma para medição NBR15215-4. O ambiente interno foi dividido em áreas iguais formando uma malha e o centro de cada área serviu de referência para cálculo das medidas. A malha de pontos está localizada a uma altura de 75cm do piso e possui pontos distanciados 133cm entre si e 67cm da parede (Figura 3).

Na seqüência estão descritos os sistemas de controle de iluminação e de venezianas utilizados nas simulações e suas características.

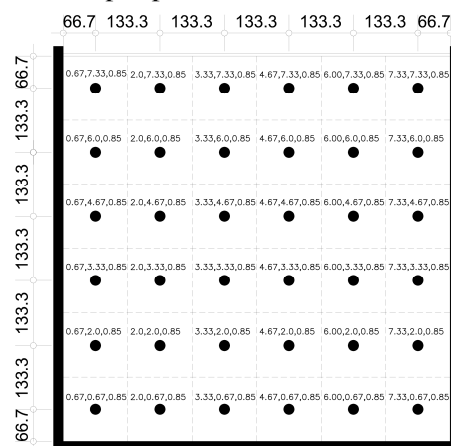


Figura 3 – Malha de pontos do plano de análise para o modelo

### 3.2. Caracterização dos Sistemas de Controle

Os sistemas de controle de iluminação artificial são divididos em duas categorias principais: estado liga-desliga do aparelho e sistema de dimerização. O funcionamento desses sistemas relaciona-se a ocupação ou ao nível de iluminação presente no plano de trabalho. Como exemplos mais utilizados, podem ser citados sensor de presença, sensor de luz natural, dimerizadores e interruptores. Já os sistemas de controle de dispositivos de sombreamento normalmente estão relacionados ao nível de iluminação natural ou radiação

solar no plano de trabalho e podem ser classificados como manuais ou automáticos. A escolha dos tipos de sistema a ser instalado na edificação depende basicamente da forma de ocupação e de uso do edifício.

Para a comparação e combinação de diferentes sistemas de controle e verificação da economia de energia gerada no modelo, foram utilizados todos os tipos de controle disponíveis no programa de simulação para análise de luz natural Daysim. Nas tabelas 1 e 2, os controles estão sintetizados com suas respectivas características.

Tabela 1 – Sistemas de controle de iluminação artificial.

<u>Controle de iluminação</u>	<u>Características</u>
Manual on/off próximo a porta	Os próprios usuários fazem o controle do sistema de iluminação
Sensor de ocupação off	Lâmpadas desligam após 10 min de o ambiente permanecer desocupado e podem ser somente reativadas manualmente
Sensor de ocupação on/off	Lâmpadas desligam após 5 min de o ambiente permanecer desocupado e são ligadas com a ocupação novamente
Sistema dimerizado controlado por um fotosensor	Fotocélulas dimerizam o nível de iluminação das lâmpadas até o limiar de iluminância adequado no plano de trabalho
Combinação de sensor de ocupação e sistema dimerizador	Fotocélulas dimerizam o nível de iluminação das lâmpadas e caso não haja ocupação, as lâmpadas são desligadas e só reativadas manualmente
Combinação de sensor de ocupação e sistema dimerizador	Fotocélulas dimerizam o nível de iluminação das lâmpadas e caso não haja ocupação, as lâmpadas são desligadas e só reativadas com o retorno da ocupação

Tabela 2 – Sistemas de controle de venezianas.

<u>Controle de venezianas</u>	<u>Características</u>
Manual	Corresponde a um sistema de venezianas que leva em consideração os padrões de comportamento do usuário quanto ao brilho
Automática	As venezianas são totalmente abaixadas para evitar brilho e luz solar direta acima de 50W/m <sup>2</sup> no plano de trabalho
Sem venezianas	Característica do edifício sem venezianas

O estado da iluminação elétrica e das venezianas ao longo do ano é derivado da relação do perfil anual de ocupação e das iluminâncias no plano de trabalho. Esses dois fatores são combinados com padrões probabilísticos de acionamento dos sistemas, que foram obtidos a partir de estudos de campo em vários países. Esses padrões definem o modelo comportamental Lightswitch que é utilizado no programa Daysim com intuito de imitar o comportamento de vários tipos de usuários diante dos sistemas de controle de iluminação e de venezianas.

Dessa forma, o padrão de ocupação do modelo foi detalhado conforme o programa que segue o Lightswitch (REINHART, 2004). A figura 4 esquematiza os horários de intervalos e de almoço, tomando como base o horário definido de chegada e saída dos ocupantes para simulação (8 às 18h). No início do expediente (8h), é observado um período de acomodação de 15 minutos até atingir a ocupação de 100%. Três intervalos são realizados: dois pequenos intervalos de 15 minutos para lanches e relaxamento no meio do turno matutino e vespertino; e um intervalo de maior duração para almoço que acontece por volta de meio-dia.

É importante destacar que a forma de ocupação interfere diretamente nos resultados de acionamento das lâmpadas e venezianas.

Outra questão relevante na definição do estado dos controles, além dos horários, é o comportamento dos usuários, ou seja, a forma como utilizam os sistemas. Existem duas formas principais de utilizar os sistemas: ativa ou passiva, que podem, respectivamente, potencializar ou deprimir a economia de energia gerada por meio do aproveitamento da luz natural. O usuário ativo é aquele que opera a iluminação artificial de acordo com as condições de natural do ambiente; abre as cortinas de manhã e pode parcialmente fechá-las durante o dia para evitar a luz solar direta. Por outro lado, o usuário passivo desconsidera qualquer tipo de

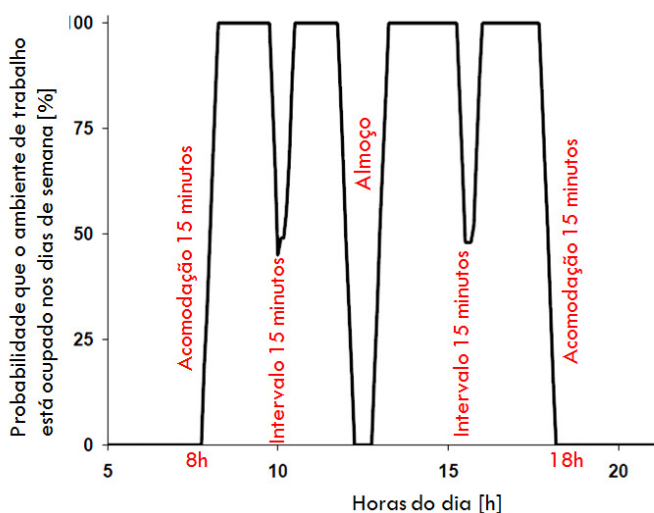


Figura 4 – Ocupação padrão de escritórios

condicionamento natural, mantendo a iluminação artificial acionada durante todo o dia e as venezianas parcialmente fechadas durante todo o ano. Para as simulações, foi considerada uma mistura dos dois tipos de usuários – ativo e passivo. Esse procedimento é indicado quando se desconhece os tipos de usuários que irão ocupar a edificação, podendo auxiliar, por exemplo, os projetistas e consultores na fase de desenvolvimento do projeto.

Para arranjo das simulações, os arquivos foram nomeados de forma a indicar os tipos de controle de venezianas e de iluminação artificial que estão sendo usados na simulação. Dessa maneira, para representar os controles de veneziana foi definida uma letra – M ou S – e para os sistemas de iluminação, foram utilizados números de 1 a 6. Como mostrado na tabela 3, os arquivos receberam títulos contendo sempre uma letra e um número, que representam o controle de venezianas e de iluminação artificial respectivamente.

Tabela 3 – Nomeação das combinações dos controles de venezianas e iluminação artificial para simulação

Controle de venezianas	Controle de iluminação	Nomes para arquivos de simulações
(S) Estática	(1) Manual on/off próximo a porta	S1 / S2 / S3
	(2) Sensor de ocupação off	S4 / S5 / S6
	(3) Sensor de ocupação on/off	
	(4) Sistema dimerizado controlado por um fotosensor	
(M) Manual	(5) Combinação de sensor de ocupação e sistema dimerizador	M1 / M2 / M3
	(6) Combinação de sensor de ocupação e sistema dimerizador	M4 / M5 / M6

### 3.3. Simulações computacionais

As simulações foram divididas em três etapas. Inicialmente, realizou-se a simulação termo-energética com o modelo utilizando somente o programa EnergyPlus, sem sistemas de controle. Em seguida, a simulação de iluminação natural, variando os sistemas de controle, através do programa Daysim. Para finalizar, a simulação integrada, para obtenção dos dados de consumo energético total no EnergyPlus inserindo os resultados de ocupação e controles do sistema de iluminação e de venezianas obtidos no Daysim.

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

#### 3.3.1 Simulação termo-energética

A simulação termo-energética foi realizada com o uso do programa EnergyPlus versão 5.0. Modelos com e sem venezianas foram simulados utilizando o método para avaliação da luz natural SplitFlux. Esses modelos foram nomeados nas simulações como Natural E+ (blinds) e Natural E+ (noblinds), respectivamente. Um modelo menos eficiente no quesito de consumo de energia para iluminação artificial também foi simulado, com as lâmpadas operando com sua potência total ao longo do ano. Os consumos obtidos serviram para comparação com os resultados da simulação integrada.

#### 3.3.2 Simulação da iluminação natural

As simulações de iluminação natural foram realizadas no aplicativo Daysim 2.1, que avalia o desempenho das medidas da luz natural e fornece dados horários de ocupação do ambiente e de acionamento da iluminação artificial e venezianas. O comportamento da iluminação natural foi avaliado por meio da medida dinâmica Autonomia da luz natural (DA, em inglês), que equivale à porcentagem das horas ocupadas por ano quando o mínimo nível de iluminância requerido para uma determinada tarefa pode ser mantido apenas com luz natural.

Para a simulação, o modelo foi desenhado no programa SketchUp e inserido no Daysim em formato 3DS. A malha de pontos foi tabelada em coordenadas x e y, usando blocos de notas e salvo em extensão .pts, para servir como dado de entrada no simulador de iluminação.

O programa Daysim simula a iluminação através do RADIANCE; e alguns parâmetros, conforme seu tutorial, devem ser configurados de acordo com as características do modelo a ser simulado (ver tabela 4).

Tabela 4 – Parâmetros para simulação Radiance.

Tipo de modelo	Interreflexão	Divisão do ambiente	Amostragem do ambiente	Precisão	Resolução	Fonte direta	Amostragem direta
S/ controle	5	10000	20	0.1	300	0	0
C/ controle	7	1500	100	0.1	300	0	0

Fonte: Adaptado de Reinhart (2006).

Após introdução dos parâmetros do modelo, os diferentes tipos de controle de iluminação artificial e de venezianas disponíveis no programa foram combinados e simulados, utilizando um padrão de ocupação misto, conforme já apresentado. Após cada simulação, um relatório é gerado com os valores da medida de DA para cada ponto da malha e um arquivo CSV (comma separated value) com os horários de ocupação e de acionamento dos sistemas de controle para todo o ano que é utilizado na simulação integrado do EnergyPlus.

### 3.3.3 Simulação integrada

Através da simulação energética integrada foi possível avaliar o impacto do consumo energético com o aproveitamento da luz natural e dos sistemas de controle. Além do relatório CSV gerado pelo Daysim, para simulação energética no EnergyPlus, foram utilizadas as características construtivas e de uso e ocupação do modelo. Nas tabelas abaixo estão resumidos os parâmetros dos materiais e das construções utilizados como dados de entrada para o EnergyPlus.

Tabela 5 – Características dos materiais

MATERIAIS	Argamassa de Emboço	Cerâmica de tijolo	Concreto Maciço	Piso Cerâmico	Laje de Concreto	Argamassa de reboco
Espessura	0.025	0.033	0.1	0.01	0.2	0.025
W/m-k	1.15	0.9	1.75	0.9	1.75	1.15
Kg/m <sup>3</sup>	2000	1103	2400	1600	2200	2000
J/kg-k	1000	920	1000	920	1000	1000

Tabela 6 – Composição das construções

	Parede	Piso	Teto
Camadas	Bloco cerâmico + reboco	Concreto + piso cerâmico	Laje de Concreto
	Argamassa de Emboço	Argamassa de reboco	Laje de Concreto
	Cerâmica de tijolo	Concreto Maciço	
	Camada de ar	Argamassa de reboco	
	Cerâmica de tijolo	Piso Cerâmico	
	Argamassa de Emboço		

O relatório com os dados horários de ocupação, do fator de potência usada e do estado das venezianas (abertas, fechadas ou parcialmente) foi introduzido no EnergyPlus como uma Schedule para ocupação, lâmpadas e venezianas, respectivamente.

Os dados de saída definidos para as simulações foram cargas de aquecimento e de resfriamento e a potência de iluminação elétrica, possibilitando análises de cada sistema – condicionamento de ar de iluminação artificial.

### 3.3.4 Simulação de dois usuários diferentes

Para discutir os tipos de usuários do modelo comportamental Lightswitch que é utilizado no programa Daysim, foram simulados dois modelos com configurações idênticas – sistema estático de venezianas e controle de iluminação manual, porém foram utilizados diferentes tipos de usuários para controlar os sistemas de controle de iluminação artificial. Na primeira simulação, optou-se pelo usuário ativo, que aproveita a disponibilidade de luz natural e controla os sistemas de controle de forma mais consciente. Já na segunda simulação, apresentando características adversas ao usuário ativo, o usuário passivo foi escolhido para controlar os sistemas.

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta etapa, serão apresentados os resultados encontrados a partir da metodologia aplicada. Primeiramente, será discutido o comportamento de iluminação natural no ambiente a partir dos valores da medida dinâmica Autonomia da luz natural obtidos pela simulação no Daysim. Na sequência, os resultados de consumo energia da simulação integrada no EnergyPlus são apresentados em formato de tabelas comparativas.

### 4.1. Comportamento da luz natural

Os modelos elaborados para estudo do comportamento da luz natural obtiveram diferentes resultados de DA, de acordo com as mudanças das características dos dispositivos de sombreamento (automático, estático e manual) e dos usuários (passivo e ativo). O DA foi calculado a partir da iluminância de referência de 500 lux – indicada como iluminância de projeto para as atividades de escritórios conforme normas.

Como foi escolhido um comportamento misto dos usuários para a realização das simulações – ou seja, existem usuários ativos e passivos no ambiente, os resultados de DA para os modelos (com venezianas estáticas, manuais ou automatizadas) foram divididos em passivos e ativos (ver figuras 5, 6, 7 e 8)

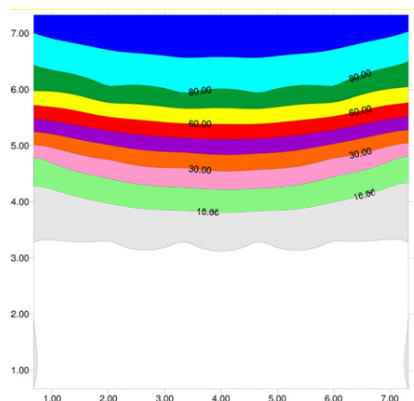


Figura 5 – DA para sistemas estático e manual de venezianas com usuário passivo

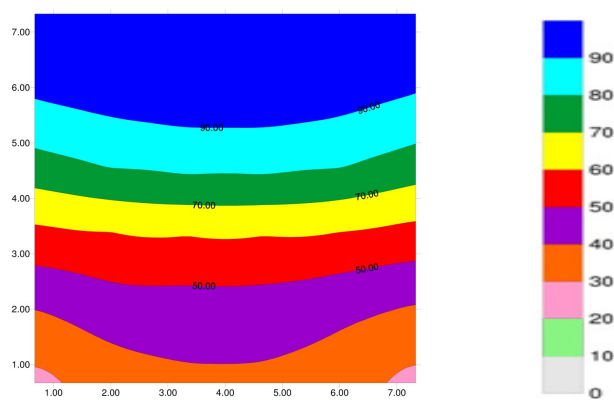


Figura 6 – DA para sistema automático de venezianas

DA%

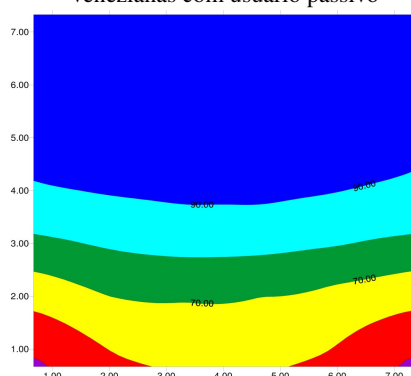


Figura 7 – DA para sistema estático de venezianas com usuário ativo

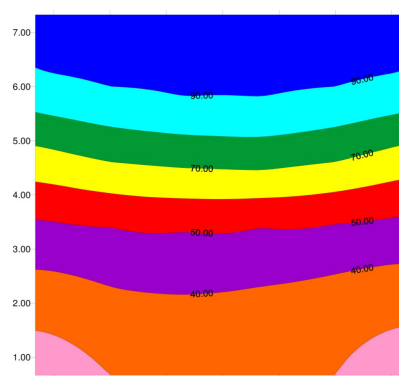


Figura 8 – DA para sistema manual de venezianas com usuário ativo

Conforme as figuras de 5 a 8, de forma geral, os modelos obtiveram valores de DA relativamente altos, devido a uma boa combinação das características geométricas do modelo: profundidade mediana, e grande abertura orientada para o norte com alto valor de transmitância. Entretanto, as mudanças dos tipos de sistemas de controle das venezianas mostraram resultados diferenciados para o DA: sistemas onde as venezianas ficam totalmente abertas, como estático com um usuário ativo, os valores de Autonomia da luz natural são mais altos; por outro lado, quando as venezianas ficam sempre fechadas, como descrito pelos sistemas estáticos e manuais com um usuário passivo, o DA não alcança bons resultados.

Valores intermediários de DA foram encontrados para os sistemas manuais com usuários ativos e para os sistemas automáticos, que provavelmente os resultados de DA foram condicionados pelo tempo em que as venezianas ficaram abertas ou abaixadas. Apesar dos dois sistemas funcionarem com as mesmas características, nas quais as cortinas são abaixadas quando detectada radiação solar acima de  $50\text{W/m}^2$  no plano de trabalho, nota-se que o tempo de luz natural no ambiente com o sistema manual é menor que o automático. Isso acontece devido a uma pequena diferença entre controles observada a partir dos resultados: no sistema manual, uma vez fechadas as cortinas, elas só serão reabertas pelos usuários no dia seguinte de trabalho, o que não ocorre necessariamente no mecanismo automatizado.

#### 4.2. Influência da luz natural e dos sistemas de controle no consumo energético

Todas as simulações têm como comparação os resultados das simulações através somente do EnergyPlus e os resultados das simulações integradas: Daysim + EnergyPlus. Utilizando apenas o EnergyPlus, temos os resultados do modelo com iluminação artificial ligada durante todo o período de ocupação (sistema menos eficiente), e do modelo considerando a luz natural através do método Split Flux (NaturalE+).

Os resultados estão apresentados, abaixo, em tabelas formadas por colunas e linhas. As colunas representam os consumos obtidos com as simulações usando diferentes sistemas e as linhas representam os valores de consumo resultantes das simulações termo-energéticas.



Tabela 7 – Consumo energético para os modelos configurados com sistema estático de venezianas (S) combinado a todos os tipos de controle de iluminação (1 a 6), e os modelos simulados somente no E+ (Luz natural sem venezianas e Sistema menos eficiente)

Consumo de cada sistema (KWh/m <sup>2</sup> /ano)	S1	S2	S3	S4	S5	S6	NATURAL E+ noblinds	Menos eficiente noblinds
ILUMINAÇÃO	18,31	15,51	15,07	6,33	5,5	5,38	2,91	25,55
AQUECIMENTO	1,59	1,62	1,63	1,73	1,74	1,74	1,85	1,51
RESFRIAMENTO	217,5	214,74	214,3	205,31	204,47	204,36	201,25	218,2

Na comparação dos sistemas de controle de iluminação artificial do modelo estático – cortinas abertas, foi detectada quase 80% de economia de energia em iluminação comparado ao sistema menos eficiente, principalmente com a introdução dos sistemas dimerizáveis – S4, S5, S6 (ver tabela 7). A carga de resfriamento nesta situação também diminuiu, provavelmente pela redução da potência usada nas lâmpadas; e a carga de aquecimento tem valores bem baixos, não ultrapassando a 2 KWh/m<sup>2</sup>/ano, já que o período usado ao longo do ano na cidade de Florianópolis é bem pequeno.

Comparando dois modelos iguais simulados através do EnergyPlus e pela simulação integrada (Natural E+ e S5, respectivamente), constata-se uma diferença nos valores: o consumo calculado somente pelo EnergyPlus (NaturalE+) corresponde a quase metade do resultado da simulação integrada (S5). Isso ocorre devido a superestimação da luz natural no ambiente interno, aspecto já mencionado anteriormente.

A tabela 8 apresenta o resumo dos resultados das simulações para as venezianas operando manualmente. O modelo manual de venezianas, nas simulações, foi caracterizado por cortinas sempre fechadas, isso se deu pela escolha de usuário como misto, demonstrando que nesse caso o usuário passivo – aquele que permanece com as cortinas fechadas ao longo de todo o ano – predominou sobre o ativo.

Tabela 8 – Consumo energético para os modelos configurados com sistema manual de venezianas (M) combinado a todos os tipos de controle de iluminação (1 a 6) e os modelos simulados somente no E+ (Luz natural com venezianas e Sistema menos eficiente)

Consumo de cada sistema (KWh/m <sup>2</sup> /ano)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	NATURAL E+(blinds)	Menos eficiente (blinds)
ILUMINAÇÃO	18,74	15,51	15,07	15,39	12,77	12,43	14,28	25,55
AQUECIMENTO	3,42	3,48	3,49	3,48	3,53	3,54	3,54	3,22
RESFRIAMENTO	186,33	183,15	182,72	182,95	180,38	180,04	178,46	186,66

Com as cortinas fechadas, houve economia de energia com a introdução dos sistemas de controle de iluminação artificial, mas em quantidade bem pequena. O máximo atingido foi com o sensor de ocupação on/off com sistema dimerizador (M6). Isso ocorre pela redução da disponibilidade de luz interna com o fechamento das cortinas durante todo o ano (tabela 8). Quanto às cargas de aquecimento e resfriamento, características semelhantes ao primeiro modelo foram encontradas: redução da carga de resfriamento, em função da diminuição de potência utilizada pelas lâmpadas, e reduzidas cargas de aquecimento.

Comparando as simulações através do EnergyPlus somente e pela simulação integrada (Natural E+ e M5, respectivamente), foi encontrada pequena diferença nos resultados. Nessas simulações, como as cortinas estavam fechadas, a simulação da luz natural no EnergyPlus não foi um fator determinante para o resultado, o que indica que o método de cálculo da luz natural no EnergyPlus não gera resultados aprimorados.

Os valores finais das cargas de aquecimento e resfriamento para as dois modelos (estático e manual) ficaram semelhantes, apesar das mudanças do estado das cortinas: abertas ou fechadas. Isso sucedeu devido à escolha para as simulações de um ar condicionado ideal definido somente pelas temperaturas do termostato.

É importante notar que os dois sistemas que utilizam somente sensor de presença (S1 a S3 e M1 a M3) tiveram os mesmos resultados, independente das cortinas abertas ou fechadas. Isso foi resultado do padrão da ocupação do edifício que é definido no programa Daysim a partir do modelo comportamental - Lightswitch, que foram iguais em todas as simulações.

### 4.3. Influência do tipo de usuário no consumo de iluminação artificial

A figura 9 indica a simulação do consumo de iluminação artificial utilizando diferentes tipos de usuários, conforme o tópico 3.3.4. O modelo simulado configura-se com sistemas manuais de controle de venezianas e de iluminação. Ou seja, os próprios usuários comandam o estado das lâmpadas e venezianas. O consumo em iluminação artificial quando o ambiente foi ocupado por usuários passivos foi duas vezes maior comparado ao consumo de um ambiente com ocupantes ativos.

É importante ressaltar que os reais usuários de um edifício podem

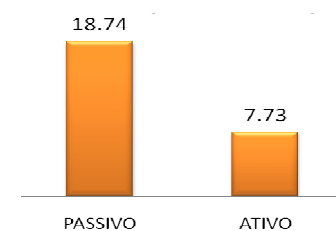


Figura 9 – Consumo de iluminação para usuários ativo e passivo

apresentar comportamentos de consumo muito diferentes dos modelados pela ferramenta. Desse modo, o aspecto comportamental ainda merece ser aprofundado, com intuito de aproximar os resultados da ferramenta a real satisfação do usuário e a sua forma de utilização dos instrumentos.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho mostra a influência do aproveitamento da iluminação natural e dos sistemas de controle de iluminação artificial e de venezianas no consumo total de energia nas edificações, utilizando a metodologia de simulação integrada Daysim + EnergyPlus.

Com a avaliação do comportamento da luz natural através da medida dinâmica Autonomia da luz natural foi possível identificar as diferenças entre os modelos com diferentes sistemas de venezianas. O comportamento do usuário passivo interferiu negativamente no desempenho da iluminação natural no interior do ambiente, independente do padrão do sistema de controle de venezianas. O ambiente ocupado por usuários passivos teve consumo duas vezes maior comparado ao consumo do ambiente com usuários ativos.

O impacto do aproveitamento da luz natural na eficiência energética foi avaliado através das simulações integradas. A análise foi realizada basicamente pelos resultados de consumo de energia dos sistemas de iluminação artificial e condicionamento de ar. O consumo com o uso de equipamentos não interferiu nas análises já que foi constante para todas as simulações. O uso de sistemas de controle de iluminação artificial integrados a luz natural resultou em economia de energia em todos os modelos e também influenciou nos resultados de condicionamento de ar, que apresentou seu consumo reduzido em torno de 10% devido a diminuição das cargas internas geradas pelo sistema de iluminação artificial.

Os sistemas dimerizáveis proporcionaram maiores reduções no consumo de energia com iluminação artificial, alcançando uma economia de até 70% com as cortinas abertas. Já os sistemas de controle que consideram a ocupação, como o sensor de presença, obtiveram resultados iguais de consumo, uma vez que um mesmo padrão de ocupação foi utilizado para todas as simulações.

Para aprofundamento do assunto, trabalhos futuros podem investigar sistematicamente o comportamento do usuário nas edificações brasileiras diante dos sistemas de controle de iluminação artificial e de venezianas, uma vez que a forma de usar esses sistemas é frequentemente afetada pela ação dos usuários, influenciando, assim, no comportamento da luz natural e no consumo de energia elétrica final da edificação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1992). **NBR 5413 Iluminância de Interiores**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 13p., Abril/1992.
- ABNT (2004). **NBR15215-4 Iluminação natural – Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações – Método de medição**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 13p., Novembro/2004.
- BAKER, N.; STEEMERS, K. **Daylight Design of Buildings**. James x James. London, 2002.
- BOURGEAIS, D.; REINHART, C.; MACDONALD, I. Adding advanced behavioural 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, abril 2006.
- DIDONÉ, E. L. **A influência da luz natural na avaliação da eficiência energética de edifícios contemporâneos de escritórios em Florianópolis/SC**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- ENERGYPLUS. **EnergyPlus Engineering Reference**. The Reference to EnergyPlus Calculations. EnergyPlus, abril., 2010.
- GALASIU A. D.; NEWSHAM, G.R.; SAVAGAU. C.; SANDER, D. M. **Energy saving lighting control systems for open-plan offices: a field study**. NRCC-49498, 2005.
- LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos Climáticos**. Disponível em: <www.labee.ufsc.br>. Acesso em: set. 2006.
- PROCEL/ELETRONBRAS. **Programa nacional de conservação de energia elétrica: áreas de atuação – edificações**. Disponível em: <www.eletronbras.gov.br/procel>. Acesso em: set. 2010.
- RAMOS, G.; GHISI, E.. Avaliação do cálculo da iluminação natural realizada pelo programa EnergyPlus. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 2, p 159-171, abril/jun.. 2010.
- REINHART, C. F. Daylighting Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds. **Solar Energy**, v. 77, n. 1, p 15-28. 2004.
- REINHART, C. F. **Tutorial on the use of Daysim Simulations for Sustainable Design**. Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, ago. 2006.
- REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. **Dynamic daylight performance metrics for sustainable design**. NRCC-48669. 2006.
- SOUZA, M. B. **Potencialidade de aproveitamento da luz natural através da utilização de sistemas automáticos para economia de energia elétrica**. Tese de Doutorado, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- WIENOLD, J. Dynamic simulation of blind control strategies for visual comfort and energy balance analysis. BuildingSimulation, Beijing, China, 2007.
- WINKELMANN, Frederick C.; SELKOWITZ, Stephen. Daylighting Simulation in the DOE-2 Building energy Analysis Program. **Energy and Buildings**, v. 10, n. 2, p 159-171, abril/jun.. 2010.