



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

**VII ELACAC**  
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO  
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

Búzios - RJ - 2011

## **A INFLUÊNCIA DE DIFERENTES ABERTURAS ZENITAIS NA DISTRIBUIÇÃO DA LUZ NATURAL E NA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Ana Beatriz Lima (1); Fernando R. Pereira (2); Rogério Versage (3); Roberto Lamberts (4)**

(1) Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, [anabeatriz@labcon.ufsc.br](mailto:anabeatriz@labcon.ufsc.br)

(2) PhD, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, [feco@arq.ufsc.br](mailto:feco@arq.ufsc.br)

(3) Doutorando em Engenharia Civil, [rogerio@versage.com.br](mailto:rogerio@versage.com.br)

(4) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, [lamberts@labeee.ufsc.br](mailto:lamberts@labeee.ufsc.br)

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental, Caixa Postal 476, Florianópolis - SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721-9797

### **RESUMO**

Num momento de preocupação global com eficiência energética, o uso adequado da luz do sol tem sido assunto de grande enfoque, devido a possíveis economias. O aproveitamento da luz por aberturas zenitais é uma das estratégias que pode ser empregada na redução do desperdício de energia. Com o intuito de avaliar prováveis economias e a distribuição da iluminação proveniente de 6 diferentes tipologias zenitais, simulações foram realizadas com o emprego do *software* de consumo de energia *EnergyPlus* e de simulação dinâmica da luz natural *Daysim*, para um ambiente de escritório, na cidade de Florianópolis/SC. Os resultados aqui encontrados mostram que é possível alcançar em média 7,2% de economia em energia, com o controle da iluminação artificial por dimerização. Nessa situação, dentre os modelos simulados, todos os casos apresentaram consumo total de energia menor ou igual ao do caso de referência. Portanto, constata-se que o aproveitamento da luz do dia pela cobertura é uma prática vantajosa em ações contra o desperdício de energia.

Palavras-chave: eficiência energética, iluminação zenital, simulação computacional.

### **ABSTRACT**

In times of global concern about energy efficiency, the proper use of sunlight has been a subject of intense approach, due to potential savings. One strategy to minimize energy waste is the skylights implementation. In order to estimate possible savings and the illumination supply from 6 different toplights, simulations were performed with *EnergyPlus* and *Daysim*, for an office environment, in Florianópolis/SC. The findings reveal that it is possible to achieve an average 7.2% savings in energy, dimming the artificial lighting system. In these circumstances, all cases had total energy consumption less or equal than the reference case. Therefore, it is clear that the use of toplights is profitable in actions against energy waste.

Keywords: energy efficiency, toplights, computer simulation.

# 1. INTRODUÇÃO

De uma forma geral, as soluções mais usuais e práticas do aproveitamento da iluminação natural advêm das aberturas laterais. Em situações em que os ambientes possuem grandes dimensões e uma razão entre largura e comprimento perto de um, as aberturas para o exterior se transformam numa espécie de bem precioso e disputado, tanto pela possibilidade da vista para o exterior quanto pela qualidade da iluminação. Para o segundo motivo, os usuários que são favorecidos com a proximidade a essas aberturas percebem benefícios na saúde da pele, dos olhos, secreção hormonal e humor, revelando um melhor comportamento social. Além disso, a variação temporal proporcionada pela luz do sol pode servir para combater o *jet lag* e a síndrome do edifício doente (IEA SHC TASK 21, 2000).

Sendo assim, tratar do melhor aproveitamento da luz solar nos edifícios significa abordar a saúde dos ocupantes desses espaços. Entretanto, as proporções e restrições de área bem como a falta de controle da luz natural, na grande maioria dos edifícios, impede o aproveitamento desta de maneira satisfatória e por consequência passa a ser substituída pelas comodidades da luz artificial, que traz uniformidade e previsibilidade dos níveis de iluminância oferecidos.

Sabe-se ainda que elevados desperdícios de energia estão relacionados ao uso indiscriminado e ineficiente da iluminação artificial. Estudos indicam um consumo de energia para a iluminação em torno de 23% no setor comercial e 22% no setor residencial (CORREIA, 2007). Além disso, a iluminação é apontada como segundo maior usuário final de energia, ficando atrás apenas do condicionador de ar (consumo de 48% no setor comercial e 47% no residencial).

Além do mais, o incremento da luz natural nos edifícios gera o dilema com o qual os projetistas evitam lidar, ou seja, à medida que se aumentam as áreas envidraçadas, o consumo de energia elétrica para iluminação tende (quando automatizado) a diminuir, mas o consumo de energia para o resfriamento e aquecimento do ar aumenta. Num ambiente interno, o equilíbrio entre a qualidade do sistema de iluminação natural e suas cargas térmicas é um ponto crucial para se atingir a eficiência energética em edificações.

Conforme Souza (2003) é possível reduzir o consumo de energia elétrica para iluminação através de estratégias de controle automático, atingindo-se um percentual de aproveitamento da luz natural (PALN) máximo de 87%, quando a iluminação é feita com janelas opostas. Portanto, o adequado incremento da iluminação natural nos edifícios implica em significativas economias de energia. Sendo assim, boas práticas que visem integrar iluminação natural e artificial, são vantajosas quando se deseja amenizar os gastos com energia elétrica.

É importante recordar ainda que a luz solar (quer direta ou difusa) introduz menos calor por unidade de luz que as lâmpadas disponíveis no mercado (aproximadamente 125 lm/W, advinda da luz do sol ou da abóbada celeste versus 65 para lâmpadas fluorescentes, 30 para lâmpadas incandescentes e 110 para lâmpadas de alta pressão de sódio). Deste modo, para uma dada quantia de luz, aberturas zenitais introduzem menos cargas que a iluminação artificial dispõe, quando a luz natural pode ser eficientemente usada e distribuída (MOORE, 1985).

Conforme Lam (1986), para edifícios baixos, a iluminação através da cobertura pode ser a maneira mais eficiente de iluminação natural, relacionando-se medições de níveis de iluminação com cargas de aquecimento e resfriamento. Isso se deve ao fato de que a distribuição na iluminação pode ser feita de forma bastante uniforme enquanto a área de vidro permanece mínima.

Além disso, tendo-se em vista que em ambientes de trabalho o aproveitamento da iluminação se dá prioritariamente no plano horizontal, a estratégia mais eficiente para se garantir conforto visual e qualidade de iluminação no ambiente é através do uso da iluminação zenital. Segundo Moore (1985), a luz que chega normal ao plano de trabalho contribui com um nível maior de iluminação do que a luz que chega oblíqua a este plano. Se o plano de referência é horizontal, um refletor localizado acima da cabeça maximizaria a iluminação. Levando-se em conta eventuais sombras causadas pelo usuário bem como a presença de reflexões ofuscantes advindas dessa iluminação perpendicular ao plano de trabalho, Moore sugere como ponto ótimo a inclinação de 45° entre a fonte luminosa incidente e o plano de referência, o que gera perdas em torno de 30% da iluminância, devido ao efeito cosseno<sup>1</sup>. Essa perda, para Moore é compensada pela redução de excessivas reflexões no teto e claridade no campo de visão do usuário.

Também, pode-se dizer que o uso da iluminação zenital proporciona diversas vantagens. Lam (1986) relata algumas delas:

---

<sup>1</sup> Efeito cosseno (ou lei do cosseno): É a lei em que a iluminância em qualquer superfície varia de acordo com o cosseno do ângulo de incidência. O ângulo de incidência é aquele entre a normal da superfície e a direção da luz incidente.

- Possibilidade de localizar as fontes de luz natural onde elas são desejadas (conforme o *layout* proposto em projeto) e distribuídas uniformemente;
- Simples de se atingir iluminação uniforme, devido sua flexibilidade;
- Ao contrário da iluminação vertical, a iluminação horizontal normalmente não exige que se ilumine exageradamente uma área para se atingir níveis suficientes de iluminação nas áreas adjacentes;
- Poucas aberturas são necessárias.

Ainda que as vantagens supracitadas sejam atraentes, é importante se considerar as desvantagens quanto ao uso da iluminação zenital, sendo que:

- É pouquíssimo usada em edifícios de vários andares, porque ilumina apenas um ou dois pavimentos (LAM, 1986);
- Devido à grande quantidade de radiação solar nas superfícies horizontais durante o verão, aberturas zenitais introduzem consideráveis ganhos térmicos e são frequentemente evitados a fim de reduzir as cargas de condicionamento de ar. (MOORE, 1985);
- Não fornece uma visão do entorno (SOUZA, 2003).

Também, desafios impostos pelo emprego da iluminação natural são lembrados por Lam (1986) tais como: otimizar a relação entre iluminação e condicionamento de ar durante as variações diárias e sazonais nos períodos de disponibilidade de luz solar, criar ambientes bonitos, agradáveis e visualmente apropriados, que satisfaçam as necessidades dos ocupantes de orientação no tempo e espaço e, por fim, edifícios de escritórios e industriais deveriam dar prioridade à maximizar a satisfação do trabalhador por longo tempo e consequentemente sua produtividade. Portanto, a prioridade inicial deveria ser proporcionar prazer através da luz natural.

## 2. OBJETIVO

O presente trabalho visa aferir as possíveis economias de energia (em condicionamento de ar e iluminação) e a distribuição da luz natural proveniente de diferentes aberturas zenitais em um ambiente de serviços, para o clima de Florianópolis/SC.

## 3. MÉTODO

Neste estudo empregam-se simulações computacionais com o *EnergyPlus* e *Daysim*. Para os casos simulados, são adotadas diferentes aberturas zenitais, de acordo com as recomendações do Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), para se atingir nível A (edifício mais eficiente). Essas recomendações estão indicadas na tabela 1. Os valores do fator solar (FS) dos vidros e do percentual da abertura zenital (PAZ) devem se compensar para minimizar os ganhos térmicos pela cobertura. Além do sugerido pelo regulamento, três outros modelos são incluídos como objetos de estudo, sendo eles; um caso que não possui nenhuma abertura e outros dois, cujas aberturas foram propostas com o mesmo PAZ de 5% e FS de 0,87, mas diferentes sombreamentos. Contabiliza-se, então, um total de 7 casos avaliados.

Tabela 1: Limites de fator solar de vidros e de percentual de abertura zenital para coberturas, recomendados pela RTQ-C.

PAZ	0 a 2%	2,1 a 3%	3,1 a 4%	4,1 a 5%
FS	0,87	0,67	0,52	0,30

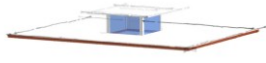
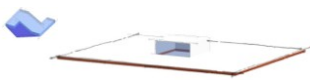
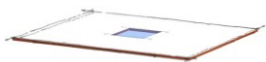




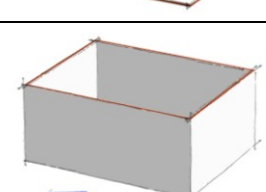
Análises da distribuição da iluminação natural proveniente das aberturas zenitais, são feitas com base nos resultados das simulações dinâmicas, realizadas através do software *DaySim*. São obtidos valores da iluminação natural distribuídos numa malha de pontos, para cada sistema proposto. Destas simulações, resultam também relatórios, contendo a potência necessária de iluminação artificial para complementar a iluminação natural, a fim de se atingir um nível desejado de iluminância no interior do ambiente. Estes relatórios são integrados a simulações termo-energéticas no *EnergyPlus* para se obter o consumo total de energia e também o consumo por uso final, para um sistema de iluminação artificial controlado por dimerização. Também, para análise do consumo de energia em um sistema de iluminação não dimerizado, simulações termo-energéticas no *EnergyPlus*, são efetuadas, porém sem a inserção dos valores correspondentes ao incremento de iluminação natural.

### 3.1 Características das aberturas zenitais em estudo

Um espaço de serviços, do tipo escritório, é simulado para o clima de Florianópolis/SC, em cuja cobertura são testadas seis diferentes tipologias de aberturas zenitais, e uma sétima (caso base) em que não há nenhuma abertura. A tabela 2 destaca as características de cada modelo proposto.

A nomenclatura de cada tipologia avaliada adota o seguinte padrão; primeiro é indicado o percentual de abertura zenital (PAZ) e em seguida seu valor é resumido, mantendo o número percentual, mas retirando-se o símbolo de porcentagem. Ou seja, a nomenclatura que simplifica um PAZ de 5% é PAZ5. Posteriormente discrimina-se o fator solar do vidro aplicado na abertura, então, um vidro com FS de 0,87 (87%) é nomeado de FS87. Os dois modelos sombreados são identificados com a terminação BS1 e BS2, em que BS significa *brise-soleil*. Por fim, o caso base é aquele cuja laje não possui nenhuma abertura zenital e os ganhos térmicos adquiridos são analisados e equiparados.

Tabela 2 - Características dos tipos de aberturas zenitais em estudo.

Forma	Classificação	Características
	PAZ5FS87BS2	Porcentagem de Abertura Zenital = 5% / Fator Solar = 0,87 Abertura Zenital: 2,4m <sup>2</sup> - 1,55m x 1,55m Laje Mista: 22 cm
	PAZ5FS87BS1	Porcentagem de Abertura Zenital = 5% / Fator Solar = 0,87 Abertura Zenital: 2,4m <sup>2</sup> - 1,55m x 1,55m Laje Mista: 22 cm
	PAZ5FS30	Porcentagem de Abertura Zenital = 5% / Fator Solar = 0,30 Abertura Zenital: 2,4m <sup>2</sup> - 1,55m x 1,55m Laje Mista: 22 cm
	PAZ4FS52	Porcentagem de Abertura Zenital = 4% / Fator Solar = 0,52 Abertura Zenital: 1,92m <sup>2</sup> - 1,385m x 1,385m Laje Mista: 22 cm
	PAZ3FS67	Porcentagem de Abertura Zenital = 3% / Fator Solar = 0,67 Abertura Zenital: 1,44m <sup>2</sup> - 1,2m x 1,2m Laje Mista: 22 cm
	PAZ2FS87	Porcentagem de Abertura Zenital = 2% / Fator Solar = 0,87 Abertura Zenital: 0,96m <sup>2</sup> - 0,31m x 0,31m Laje Mista: 22 cm
	CASO BASE	Sem abertura zenital Laje Mista: 22 cm
	EDIFÍCIO	Área: 48m <sup>2</sup> (8m x 6m) Volume: 168m <sup>3</sup> (48m <sup>2</sup> x 3,5m) Parede (argamassa e bloco cerâmico): 165 mm Piso (laje mista e piso cerâmico): 23 cm

Na tabela acima, é importante elucidar que no modelo PAZ5FS87BS1, a abertura é voltada para o norte e as outras laterais são fechadas.

### 3.2 Programas computacionais empregados

Com o intuito de simular as diferentes geometrias apresentadas, diversos programas computacionais são empregados. Um deles é o *software* de simulação computacional *EnergyPlus*, que tem por finalidade auxiliar no cálculo de desempenho de um determinado edifício, quanto ao consumo de energia e água.

Para facilitar a representação dos modelos em forma tridimensional, o *software Sketchup* foi usado como recurso de modelagem do ambiente, cujas geometrias e informações construtivas são exportadas através do *plugin OpenStudio* para o *EnergyPlus*.

O *Daysim*, que gera medidas estáticas e dinâmicas da performance da iluminação natural, foi utilizado para se valorar a iluminação natural proveniente das aberturas zenitais e, de forma integrada ao *EnergyPlus*, para análises termo-energéticas de um sistema iluminação artificial dimerizado.

É importante ressaltar que, a escolha pela integração dos *softwares Daysim e EnergyPlus* visa garantir maior confiabilidade nos resultados, já que Didoné (2009) constatou que o *EnergyPlus* superestima a

quantidade de luz natural no interior do ambiente e, conseqüentemente, subestima o consumo de energia elétrica, usada na iluminação artificial. Também, Ramos e Ghisi (2010) compararam a iluminação natural e as iluminâncias internas calculadas através dos programas *EnergyPlus*, *Daysim/Radiance* e *Troflux* e constataram que os cálculos da parcela de luz refletida interna e das iluminâncias externas fornecidas pelo *EnergyPlus* foram maiores do que as reais.

Procedidas as simulações, 3 tipos de resultados são gerados, conforme ilustra a figura 1. Das simulações do *Daysim*, são obtidos os valores de *Daylight Autonomy* (DA), ou melhor, autonomia da luz natural (ALN), os quais são utilizados na análise do desempenho da iluminação natural. Já, das simulações no *EnergyPlus*, em que se associam relatórios de rotinas do *Daysim*, são alcançados os resultados de consumo de energia, considerando-se a dimerização do sistema de iluminação artificial. E, por fim, das simulações do *EnergyPlus*, sem controle automatizado da iluminação, são obtidos resultados de consumo sem a dimerização. Os relatórios conseguidos através dessa metodologia são utilizados no estudo dos resultados.

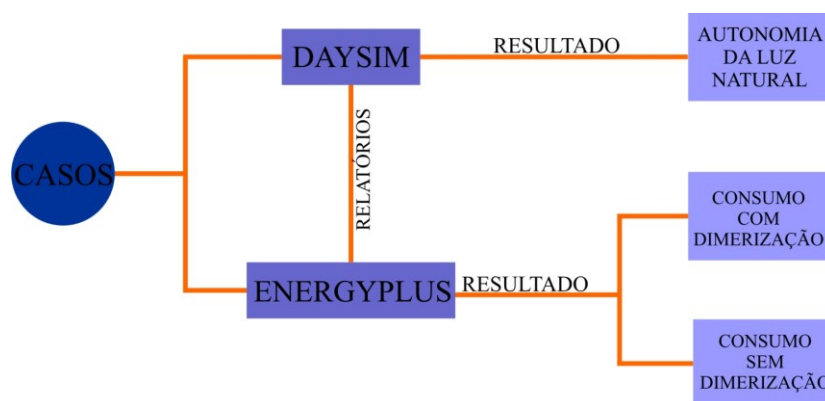


Figura 1 – Fluxos das simulações.

### 3.3 Dados de entrada para as simulações

Para realizar as simulações, os modelos têm suas coordenadas desenhadas tridimensionalmente no *Sketchup* e transferidas para o *DaySim* e *EnergyPlus*. Neles também é inserido o arquivo climático *SWERA* para a cidade de Florianópolis, obtido no *website* do *EnergyPlus* (ENERGYPLUS, 2011).

Os valores de absorvância das superfícies de todos os modelos, são equivalentes, tanto no *Daysim* quanto no *EnergyPlus*.

Para análises da disponibilidade da luz natural, nove pontos (sensores) são estipulados, no *Daysim*, conforme ilustrado na figura 2.

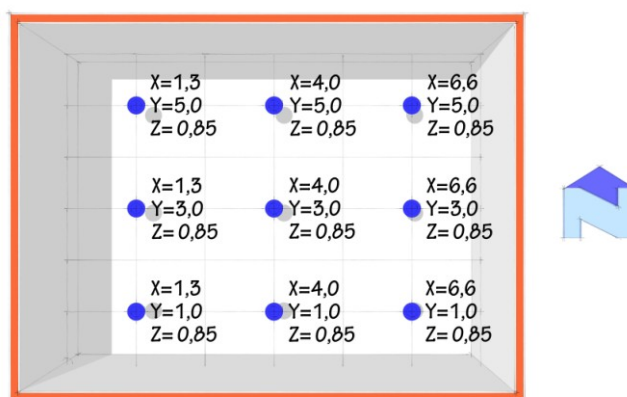


Figura 2 - Localização dos pontos em coordenadas cartesianas (X, Y, Z).

O *Daysim* fornece como consequência da simulação, diversas medidas de desempenho da luz natural, para cada um dos pontos escolhidos. Neste trabalho, opta-se por considerar os valores da autonomia da luz natural (ALN) para cada ponto, visando avaliar a porcentagem das horas ocupadas do ano em que um nível mínimo de iluminância estipulado é atingido em cada ponto, somente pelo incremento da luz natural (Reinhart C F & Walkenhorst O, 2001 apud Reinhart C F et al, 2006).

A NBR5413 (1992) sugere a iluminância de 500lux para ambientes de escritórios e foi aqui considerada para caracterizar a autonomia da luz natural.

Além disso, o tipo de ocupação do recinto simulado é o de escritório padrão, com chegada dos ocupantes às 8 horas e saída às 18, com intervalos para refeições. O escritório possui 48m<sup>2</sup> de área e a densidade de potência instalada é de 14 W/m<sup>2</sup>.

As propriedades dos materiais e as características construtivas das paredes, piso, cobertura e aberturas, conforme constam nas tabelas 2 e 4, são inseridas no *EnergyPlus*, assim como as rotinas de ocupação, atividade e infiltração de ar descritas na tabela 3.

Tabela 3 - Rotinas de ocupação, atividade e infiltração de ar (*EnergyPlus*).

Rotina	Período	Padrão
Ocupação	Todos os dias do ano	Da 00hr até as 8hrs = 0% de ocupantes Das 8hrs às 12hrs = 100% dos ocupantes Das 12hrs às 14hrs = 50% dos ocupantes Das 14hrs às 18hrs = 100% dos ocupantes Das 18hrs às 24hrs = 0% dos ocupantes
Atividade	Todos os dias do ano	Durante a ocupação Taxa metabólica: 117 W/m <sup>2</sup>
Infiltração (relativo ao sist. de condicionamento de ar)	Todos os dias do ano	Durante a ocupação 100%

Tabela 4 - Propriedades dos materiais construtivos.

Material	Propriedade	Piso Cerâmico (10mm)	Laje Mista (120mm)	Argamassa Reboco (25mm)	Camada Bloco Cerâmico Ext.	Camada Bloco Cerâmico Int.	Laje Maciça Concreto (100mm)
		Espeçura	0,01	0,12	0,025	0,007	0,012
Condutividade	0,9	1,33	1,15	0,9	0,9	1,75	
Densidade	1600	861	2000	1600	1600	2200	
Calor Específico	920	920	1000	920	920	1000	
Absortância Térmica	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	
Absortância Solar	0,6	0,7	0,4	0,7	0,7	0,7	
Absortância Visível	0,6	0,3	0,4	0,7	0,7	0,7	
Câmara de ar dos blocos cerâmicos	Resistência Térmica	0,16 m <sup>2</sup> -K/W					
Vidro Simples (3mm)	Transmitância	0,57					
	Fator Solar	0,30 / 0,52 / 0,67 / 0,87					
	Transmitância Visível	0,8					

Todas as superfícies são consideradas adiabáticas, exceto o plano de cobertura, cujas trocas de calor são permitidas e contabilizadas.

Também, considera-se para o ambiente em questão, uma ocupação total de 24 pessoas, consumo de 6,9W/m<sup>2</sup> para os equipamentos instalados e taxa de infiltração de 0,5ACH (trocas de ar por hora). Um mesmo condicionador de ar foi dimensionado para todos os modelos, com capacidade de 60.000 Btus. O termostato foi configurado com um valor nominal constante de 20°C para aquecimento e de 24°C para resfriamento.

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1. Avaliação do consumo de energia para as situações simuladas

O estudo do consumo de energia dos modelos propostos é feita através da análise da figura 3, que contém um gráfico com os consumos totais de energia para o sistema sem dimerização (em azul) e com dimerização (em laranja). Dentro de cada consumo total, os usos finais foram destacados. O consumo dos equipamentos (em azul mais claro ou laranja mais claro) é para todos os casos, 23 kWh/m<sup>2</sup>. O consumo da iluminação se mantém inalterado no sistema sem dimerização, visto que ele permanece sempre ligado de acordo com a ocupação do ambiente. Já no sistema com dimerização, o sistema é aceso apenas quando a iluminação natural é inferior a 500lux e a iluminação artificial precisa compensá-la. Já o consumo do condicionador de ar sofre influência direta da variação das aberturas zenitais e das cargas internas, logo varia em todos os casos.

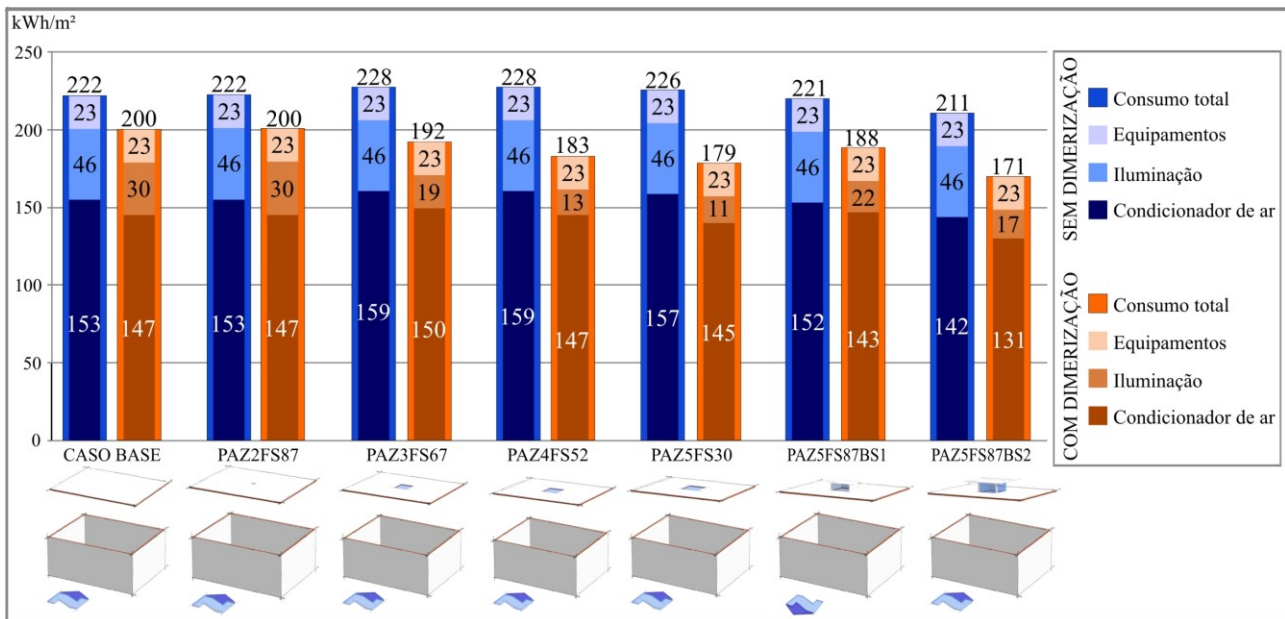


Figura 3 - Consumo total de Energia por m² e por uso final (condicionador de ar, equipamentos e iluminação).

No caso base, a diferença de consumo total entre os sistemas sem dimerização (222kWh/m²) e com dimerização (200kWh/m²) se deve ao fato de que, no primeiro sistema a iluminação está sempre ligada nos períodos de ocupação e no segundo sistema apenas visa atender a iluminância exigida de 500lux.

A comparação entre os sistemas com e sem automatização da luz artificial confirmou que melhores economias em energia são atingidas através da dimerização. A iluminação artificial foi poupada em até 63,3%, para o caso PAZ5FS30, quando comparado ao caso base.

Para o sistema sem dimerização, foi possível atingir economia de energia apenas quando as aberturas zenitais são sombreadas, ou seja, nos casos PAZ5FS87BS1(221kWh/m²) e PAZ5FS87BS2 (211kWh/m²). Isso revela economias totais de energia na ordem de 0,4% e 4,9%, respectivamente, quando esses casos são comparados com o caso base. O consumo com condicionamento de ar sofreu impacto direto, chegando a uma economia de 7,2% no caso sombreado 2, quando comparado ao modelo base. Isso se deve à redução das cargas recebidas pela cobertura, que foram amortizadas pelo anteparo de sombreamento, logo acima dos vidros.

Ainda quanto à condição não dimerizada, dos casos recomendados pela RTQ-C, o PAZ2FS87 se equiparou com o modelo de referência em consumo de energia. Os demais consumiram mais energia, representando desperdício em relação ao caso de referência. Atenta-se para o modelo com PAZ de 5% e FS de 0,30, que apresentou melhor eficiência do que os casos com PAZ3FS67 e PAZ4FS52, embora sua abertura seja maior. Isso sugere que a redução no fator solar do vidro teve influência na redução do consumo do condicionador de ar.

Já, para as simulações do sistema dimerizado da iluminação, observam-se nítidas economias. Nesta situação, os casos mais econômicos são em primeiro lugar o PAZ5FS87BS2, em segundo o PAZ5FS30 e em terceiro o PAZ4FS52. Isso confirma que o sombreamento das aberturas ajuda a reduzir o consumo de condicionamento de ar, mas aumenta o consumo de energia para iluminação, quando se compara com modelos não sombreados. É visível que o caso PAZ5FS87BS2, teve seu consumo total de energia 8,5% menor do que o caso PAZ5FS87BS1. Já, para os modelos recomendados pela RTQ-C, observa-se novamente que, conforme se reduz o fator solar do vidro, o consumo de energia reduz, mesmo que se aumente o tamanho das aberturas.

Quanto ao consumo por uso final, as economias em iluminação foram melhores no PAZ5FS30, PAZ4FS52, e PAZ5FS87BS2. Economias de 63,3%, 56,6% e 43,3% foram alcançadas, respectivamente, quando comparados com o modelo de referência. Entretanto, convém ressaltar que, apesar das aberturas não sombreadas receberem maior quantidade de luz e conseqüentemente diminuir o consumo de iluminação artificial, em momentos de céu claro, a radiação direta da luz provocará desconforto por ofuscamento nos usuários, induzindo-os ao bloqueio da abertura zenital. Essa situação reduziria o aproveitamento da luz natural nos casos não sombreados, tornando-os possivelmente menos econômicos do que aqui apresentados.

O consumo de condicionador de ar teve sua maior redução nos modelos sombreados, sendo uma economia de 10,9% com o PAZ5FS87BS2 e 2,7% PAZ5FS87BS1, quando comparados com o caso base.

Dos modelos sugeridos pelo regulamento, novamente o modelo PAZ5FS30 se mostra mais eficiente, embora as economias sejam apenas, na ordem de 1,4%, em relação ao caso base.

Destaca-se o caso PAZ3FS67 por ser o único a apresentar consumo de condicionador de ar superior ao do caso de referência. Isso se deve ao excesso de cargas térmicas advindas da cobertura e do sistema de iluminação artificial. Nesta situação, a economia de energia apenas foi alcançada devido ao aproveitamento da luz natural que poupou o sistema artificial de iluminação.

#### 4.2. Avaliação do desempenho luminoso através da autonomia da luz natural (ALN)

O comportamento da luz diurna no plano de trabalho, proporcionado pelas aberturas zenitais, é apresentado em isocurvas da autonomia da luz natural (ALN), numa planta baixa, para os 7 modelos estudados. Essas imagens estão apresentadas da figura 4 até a 9.

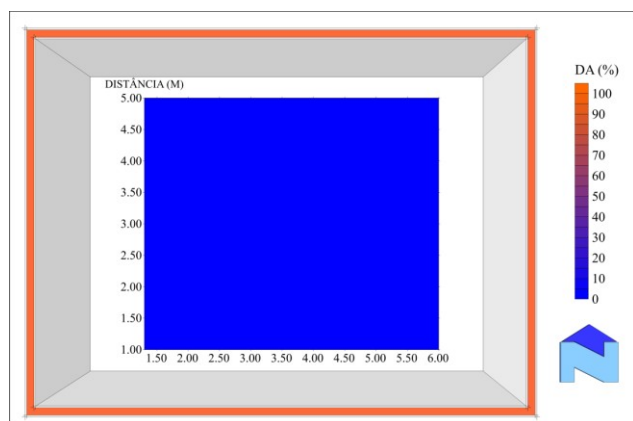


Figura 4 - Isocurvas de ALN para Caso Base e PAZ2FS87.

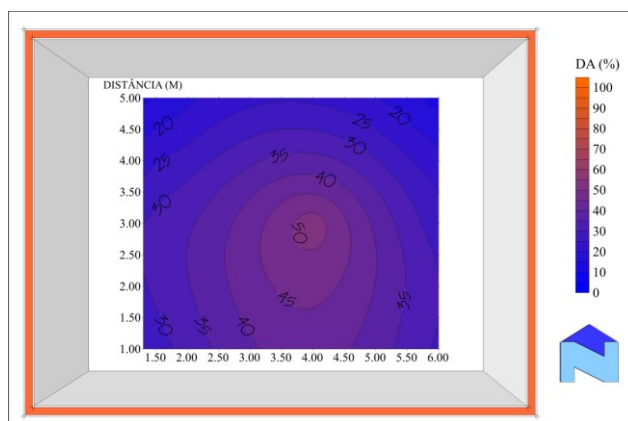


Figura 5 - Isocurvas de ALN para o PAZ3FS67.

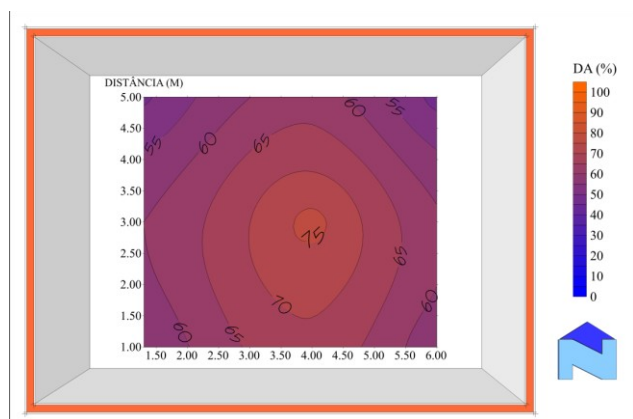


Figura 6 - Isocurvas de ALN para o PAZ4FS52.

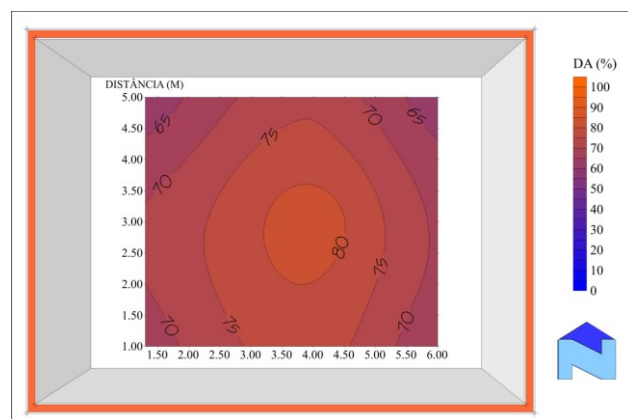


Figura 7 - Isocurvas de ALN para o PAZ5FS30.

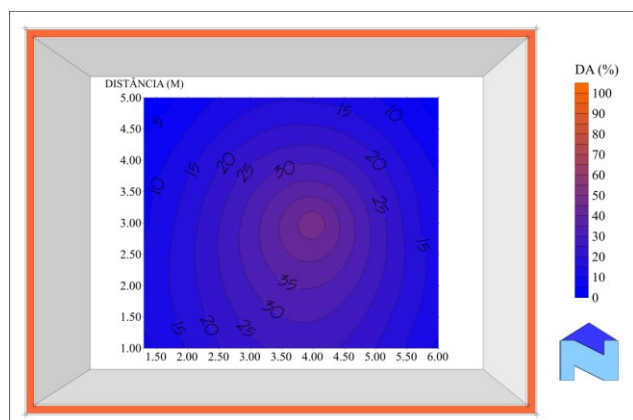


Figura 8 - Isocurvas de ALN para o PAZ5FS87BS1.

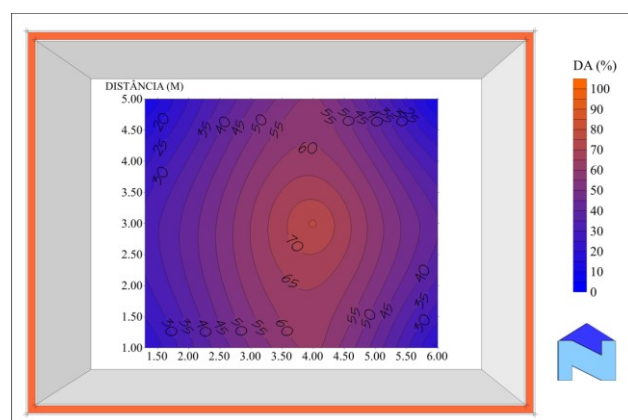


Figura 9 - Isocurvas de ALN para o PAZ5FS87BS2

Das figuras que representam a ALN, o caso base foi mostrado juntamente com o caso PAZ2FS87 (figura 4), pois possuem os mesmos resultados de ALN, ou seja, 0% de autonomia da luz natural para todos os 9 pontos. O caso base, logicamente, por não possuir nenhuma abertura, não apresenta autonomia da luz



natural. Já no caso de PAZ 2% e FS de 0,87 nota-se a não ocorrência de iluminâncias iguais ou superiores a 500lux em nenhum ponto do ambiente.

Para melhor análise dos resultados, o plano de trabalho foi setorizado em três áreas, de acordo com a distribuição da luz, do centro para a periferia. Na figura 10 essa setorização é representada.

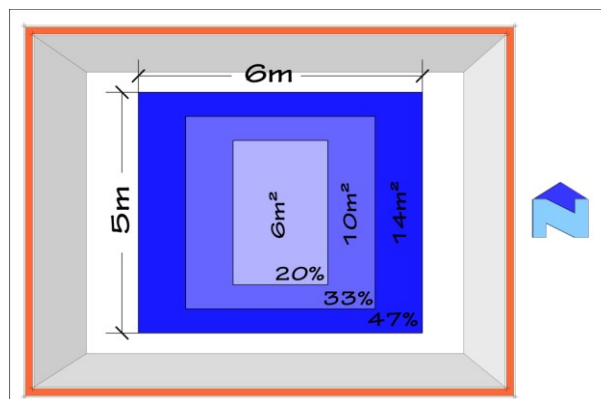


Figura 10 – Setorização do plano de trabalho.

A figura 5 ilustra o caso PAZ3FS67. Para 20% da área do plano de trabalho, atinge-se 500lux em 35 a 53% do tempo (ano). Para 33% da área do plano de trabalho, alcança-se a iluminância mínima em 25% a 45% do tempo, e para 47% da área do plano de trabalho, atinge-se 500lux em 13 a 43% do tempo. A variação total da ALN, no plano de trabalho para esse modelo ficou entre 13 e 53%.

Na figura 6, verifica-se a ALN do modelo PAZ4FS52. No centro do plano de trabalho (20% da área) se alcança 500lux em 65 a 77% do tempo. Em 33% da área do plano de trabalho, a iluminância mínima é atingida entre 60 e 71% do tempo. E na área periférica (47%) a iluminância alvo foi alcançada entre 48 e 69% do tempo. A variação total da ALN, no plano de trabalho para esse modelo ficou entre 48 e 77%. Essa menor variação sugere uma distribuição mais uniforme da iluminância mínima exigida, quando se compara com os outros casos.

O caso PAZ5FS30, mostrado na figura 7, aparenta desempenho semelhante ao caso anterior, com distribuição mais homogênea da autonomia da luz natural. No centro do plano de trabalho (20% da área), alcança-se a iluminância alvo em 75 e 84% do ano. Na porção de 33% da área do plano de trabalho, 500lux são alcançados em 70 a 80% do tempo, e, na periferia do plano (47%), a iluminância mínima é atingida entre 61 e 76% do tempo. A variação total da ALN, no plano de trabalho para esse modelo ficou entre 61 e 76%.

É importante salientar que a medida dinâmica da autonomia da luz natural não deixa explícito que, embora a iluminância mínima seja atingida, iluminâncias muito altas, superiores a 2.000lux, possam ocorrer nesses ambientes, o que pode acarretar problemas de ofuscamento e desconforto. Essa situação impacta diretamente no comportamento do usuário, que tende a bloquear a abertura e reduzir seu desconforto visual. Essa conduta reduziria as possíveis economias de energia pelo aproveitamento da luz natural.

O modelo sombreado PAZ5FS87BS1, apresenta grande variação da ALN, entre 1 e 49%, indicando também, valores baixos, quando comparados aos outros casos. Contudo, o sistema de sombreamento pode impedir que iluminâncias superiores a 2.000lux estejam presentes no plano de trabalho. Para esse modelo, em 20% do plano, se garante a iluminância de 500lux entre 24 e 49% do ano. Na área de 33% do plano de trabalho, 500lux é obtido em 11 a 39% do tempo. E na área periférica (47%) do plano de trabalho, a iluminância alvo é atingida entre 1 e 29% do tempo.

O último caso apresentado, PAZ5FS87BS2, o sombreamento gerou melhores valores de ALN nas proximidades das paredes norte/sul e valores mais baixos nas proximidades das paredes leste/oeste. Nesse caso a orientação solar e o sombreamento tiveram forte influência na distribuição das iluminâncias no plano de trabalho. Altas variações da autonomia da luz natural foram observadas quando comparado com os demais casos. Verifica-se uma ALN total entre 9 e 76%. Sendo que, em 20% do plano de trabalho se atinge 500lux em 50 a 76% do tempo. Para 33% do plano de trabalho, a iluminância alvo é atingida entre 32 e 64% do ano e na zona periférica (47%) do plano de trabalho, o nível de luz exigido é alcançado entre 9 e 63% do ano.

Nota-se que, os pontos periféricos do plano de trabalho de todos os casos apresentam maiores variações da autonomia da luz natural. A orientação solar e o sombreamento parecem ter efeito direto na representatividade de iluminâncias menores nas proximidades das paredes leste/oeste e maiores nas proximidades das paredes norte/sul.

## 5. CONCLUSÕES

O estudo aqui apresentado se propõe a investigar a influência de 6 diferentes aberturas zenitais no consumo de energia e na distribuição da luz natural, através da comparação entre si e entre um caso de referência.

Constata-se que o aproveitamento da luz natural pela cobertura é uma estratégia vantajosa, haja vista que todos os casos simulados apresentaram consumo total de energia menor ou igual ao do caso de referência, quando houve controle da iluminação artificial por dimerização. Nessa situação, economias de até 63,3% são alcançadas, em energia para iluminação, dentre os modelos aqui simulados.

A compensação entre PAZ e FS se mostrou satisfatória para o equilíbrio das cargas térmicas, visto que os modelos baseados na tabela da RTQ-C mostraram consumos de energia aproximados.

Quando a distribuição da luz é analisada, todos os modelos apresentam desempenhos distintos. Ou seja, a compensação entre os valores de PAZ e FS não parece adequada para manter a mesma distribuição de luz nos ambientes.

As análises de ALN evidenciaram que o aumento do PAZ tem influência na melhor distribuição das iluminâncias mínimas exigidas, conseqüentemente, na redução do consumo de energia para iluminação. Entretanto, não é possível garantir a uniformidade da luz no plano de trabalho, pois presumíveis iluminâncias excessivas não foram aqui avaliadas, as quais poderiam prejudicar o adequado aproveitamento da luz natural.

Por fim, investigações futuras são sugeridas para outros tipos de sombreamento, percentuais de abertura maiores que 5%, distribuição de diversas aberturas zenitais na cobertura e análises de ofuscamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DIDONÉ, Evelise. A influência da luz natural na avaliação da eficiência energética de edifícios contemporâneos de escritórios em Florianópolis/SC. Dissertação de mestrado em arquitetura e urbanismo. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal Santa Catarina. Florianópolis, 2009.
- ENERGYPLUS. EnergyPlus Engineering Reference. The Reference to EnergyPlus Calculations. EnergyPlus, set., 2007.
- HESCHONG, L., and McHugh, J. □ 2000 □ . “Skylights: Calculating illumination levels and energy impacts.” J. Illum. Eng. Soc., Winter, 90–100.
- LAM, W.M.C. Sunlighting as Formgiver for Architecture, Van Nostrand Reinhold Corp., NY, 1986.
- MARC Fontoyont. Daylight Performance of Buildings, James & James (Science Publishers) Ltd., UK, August 1998.
- MARC Schiller (Editor), Simulating Daylight with Architectural Models, DNNA (Daylighting Network of North America), Marc Schiller, School of Architecture, UCLA, CA, USA, 1988.
- MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. C. Uso de Instrumentos Computacionais para Análise do Desempenho Térmico e Energético de Edificações no Brasil. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.5, n.4, p. 47-68, out./dez. 2005.
- MOECK, M., Yoon,\* Y., Bahnfleth, W. and Mistrick, R., “How Much Energy Do Different Toplighting Strategies Save?,” submitted to Journal of Architectural Engineering, Feb. 2006.
- MOORE, Fuller. Concepts and practice of architectural daylighting. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- NBR 5413. Iluminância de Interiores. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Abril/1992.
- 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, Christoph 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 building. Leukos, v.3, no. 1, pp. 1 – 25, July 2006.
- SOUZA, Marcos B. Potencialidade de Aproveitamento da Luz Natural Através da Utilização de Sistemas Automáticos de Controle para Economia de Energia Elétrica. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis. In: BUILDING SIMULATION, 9., 2005, Montreal. Proceedings... Montreal: IBPSA, 2005. p. 1331-1338.
- ENERGYPLUS. Energy Efficiency and Renewable Energy. Building Technologies Program - Weather Data. Disponível em: <[www.eere.energy.gov/buildings/EnergyPlus](http://www.eere.energy.gov/buildings/EnergyPlus)>. Acesso em: fev 2011.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. 2009. 60 p. Disponível em <<http://www.procelinfo.com.br>> Acesso em: jan 2011.