



XIENCAC
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

VIIELACAC
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

Búzios - RJ - 2011

SIMULAÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL EM CIDADES BRASILEIRAS: A INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DOS AMBIENTES RESIDENCIAIS

**Cláudia Naves David Amorim (1); Milena Sampaio Cintra (2); Larissa Olivier
Sudbrack(3)Gabriela Elias Camolesi (4); Cainã Silva (5)**

(1) Professora Doutora da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Controle Ambiental e Eficiência Energética – LACAM clamorim@unb.br(2) Arquiteta, Mestranda do Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Bolsista DTI no LACAM, milenascindra@gmail.com

(3) (4) (5) Graduando da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, bolsista ITI do LACAM, UnB Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Controle Ambiental e Eficiência Energética, Brasília-DF, Tel.: (61) 3107 7453

RESUMO

O aproveitamento da luz natural tem uma importante dimensão do ponto de vista ambiental, funcional e qualitativo da arquitetura. O contexto brasileiro tem grande potencial para uso da iluminação natural, devido às condições de céu favoráveis, mas ainda está em processo de desenvolvimento de recomendações e normas que possam indicar efetivamente parâmetros para o bom uso da luz natural. Inúmeras variáveis da edificação influenciam no comportamento da luz natural, tais como a dimensão e forma dos ambientes (largura, profundidade e altura), área e forma das aberturas, refletâncias internas (paredes, teto e piso), além do uso de proteções solares e elementos para distribuição da luz natural. Este artigo apresenta, através de estudos realizados por meio do uso de simulação computacional de métricas dinâmicas, a influência da profundidade do ambiente no comportamento da luz natural em ambientes residenciais, considerando o contexto climático brasileiro, de forma a contribuir para as boas práticas na e mais especificamente com o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (BRASIL,2010). Os resultados parciais apontam algumas indicações projetuais relativas à profundidade máxima dos ambientes.

Palavras-chave: simulação computacional, iluminação natural, profundidade de ambientes, RTQ-R.

ABSTRACT

Daylighting use has an important dimension for the environmental, functional and qualitative points of view in architecture. Brazil has a high potential for daylighting use, due to favorable sky conditions, but is still in process of development of standards and rules that indicate effectively parameters to daylighting use. Many building variables influence in daylighting behaviour, as room's dimension and form (width, depth and height), window's area and shape, internal reflectances(walls, ceilings and floor), besides the solar protections and elements of daylighting distribution. This article presents, studies performed by means of dynamic daylighting simulations the influence of room depth in daylighting behaviour in residential buildings, considering Brazilian climatic context, contributing to good practices in architecture for daylighting use, and specifically with Technical Quality Regulation of Energy Efficiency Level of Residential Buildings (BRASIL,2010). The results point that rooms with window area of 1/6 floor area, without solar protection and with internal reflectances of 84% in ceiling, 58 % in walls and 30% in floor should have maximal deep of 1,8 times the window's high to ensure 60 lux of daylighting in 70% of the space during 70% of the year hours.

Keywords: computer simulation, daylighting, room deep, RTQ-R.

1. INTRODUÇÃO

Considerando as questões ambientais, hoje prementes no contexto mundial da arquitetura, pode-se dizer que a luz natural e todas as suas implicações no projeto têm importante dimensão do ponto de vista ambiental, funcional e qualitativo da arquitetura. Incorporar a luz natural nos projetos de forma coerente, otimizando seus benefícios e minimizando impactos negativos, torna-se crucial. (AMORIM, 2007)

O Brasil tem condições de céu em geral favoráveis para o uso da iluminação natural, cujos valores estimados poderiam suprir em grande parte as necessidades de iluminação (PEREIRA, 1993). Mesmo com esse potencial, o Brasil ainda está em processo de ampliação de estudos para desenvolvimento de recomendações e normas que indiquem efetivamente o que projetistas devem considerar para se beneficiar da luz natural.

Em geral, há uma carência de conhecimento em relação às variáveis arquitetônicas que influenciam no desempenho da luz natural no espaço construído. Qual o tamanho da abertura necessário para iluminar o ambiente sem que seja prejudicado demasiadamente pela carga térmica? Qual a profundidade máxima do ambiente para que ele seja iluminado adequadamente com luz natural? São inúmeras as questões ainda não abordadas de maneira satisfatória e que carecem de valores baseados em estudos que os justifiquem.

No contexto internacional algumas normas e recomendações relacionam, por exemplo, a altura das aberturas e a profundidade limite de ambientes internos para o aproveitamento da luz natural. Reinhart (2005) cita algumas regras a este respeito como a “Tips for Daylighting”, que indica que deve-se “manter a profundidade dos ambientes entre 1,5 e 2 vezes a altura da verga da janela para garantir níveis adequados dos níveis de iluminação e boa distribuição da luz” (O’Connor et al. 1997, p. 3-1, apud REINHART, 2005); e o Daylighting Guide for Buildings o qual informa que “há uma relação direta entre a altura da verga da janela e a profundidade de penetração da luz natural. Uma iluminação adequada normalmente penetra 1,5 vezes a altura da verga da janela, podendo penetrar em até 2 vezes considerando-se raios solares diretos” (Robertson K. 2005, p.4, apud REINHART, 2005).

Essas regras são amplamente utilizadas por projetistas em geral, apesar de serem vagas e não possuírem justificativas por meio de pesquisas que efetivamente demonstrem o uso dos valores por elas aplicados. Nessas regras não é claro, por exemplo, o que é considerado como nível de iluminância natural mínima, nem para quais regiões climáticas, ou tipo de edifícios e orientações de fachadas em que podem ser aplicadas (REINHART, 2005). A ampla utilização destas regras acontece devido à simplicidade das mesmas (não há necessidade de cálculos) e de sua relevância para o projeto (ligação direta entre as proporções do ambiente e o tamanho da área iluminada naturalmente). É importante, portanto, estudar regras gerais para iluminação natural em edifícios, embasadas em conceitos científicos, adequadas às diversas tipologias e adaptadas aos contextos climáticos.

Para estabelecer normas ou regras de iluminação devem ser levadas em consideração as características de cada localidade e edificação, pois o nível de iluminação natural de uma edificação varia em função da condição do céu, da posição do sol, latitude, época do ano, horário, etc. Além disso, inúmeras variáveis da edificação também influenciarão no comportamento da luz natural, tais como a dimensão e forma dos ambientes (largura, profundidade e altura), área e forma das aberturas, refletâncias internas (paredes, teto e piso), além do uso de proteções solares e elementos de distribuição da luz natural. Neste trabalho, será apresentada especificamente a influência da profundidade do ambiente na profundidade de penetração da luz natural, considerando vários contextos climáticos e latitudes brasileiras.

Quanto aos métodos para avaliar o comportamento da luz natural na edificação, Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006) mencionam que muitas metodologias de avaliação da luz natural, que consideram apenas o Fator de Luz do Dia (FLD) e vista para o exterior não têm o objetivo de necessariamente promover um bom projeto com integração com a iluminação natural, mas conduzem a uma melhor filosofia para se projetar com a luz natural. Nessas metodologias, no entanto, alguns parâmetros importantes são negligenciados, como a sazonalidade da luz natural. Assim, os autores apontam para uma nova abordagem considerando métricas dinâmicas para o desempenho da iluminação natural, que consideram a especificidade local, interação dinâmica entre o edifício, seus ocupantes e as condições climáticas e do céu ao longo de um ano. As métricas dinâmicas da iluminação natural baseiam-se em dados de radiação solar anual para um local específico, oriundos de um arquivo climático anual, gerando uma série de dados de iluminâncias e luminâncias dentro da edificação. A principal vantagem de métricas de desempenho dinâmico de iluminação natural em comparação com as métricas estáticas é que eles consideram a quantidade e a natureza das variações diárias e sazonais da iluminação natural para um determinado edifício, em um determinado sítio, juntamente com eventos meteorológicos irregulares.

A avaliação da iluminação natural por meio de métricas dinâmicas requer o uso de um software CAD, bem como um software de simulação de luz natural. Os softwares disponíveis para este tipo de

avaliação são baseados na combinação do Radiance Raytracer com um coeficiente de luz natural e com modelo de céu. Esta combinação calcula de forma eficaz uma série temporal de iluminâncias e luminâncias em ambientes internos de edifícios, utilizando um arquivo climático anual (8760 horas).

Vários trabalhos comprovam que o aproveitamento da luz natural é capaz de proporcionar significativa economia de energia elétrica em iluminação (SOUZA, 1995; GHISI, 1997; CARLO, 2008). Já as pesquisas sobre o comportamento da luz natural nos ambientes internos ocorrem de maneira pontual, sendo avaliado um aspecto arquitetônico para apenas uma localidade, resultando em conclusões pouco aplicáveis a outros contextos e na prática projetual de arquitetos e engenheiros. Por outro lado, o contexto brasileiro conta agora com uma recente Regulamentação de Eficiência Energética em Edifícios, para a qual este trabalho contribui especificamente no Regulamento Residencial – RTQ-R (BRASIL, 2010). Assim, devido a pouca literatura existente, à complexidade do tema, à importância do uso da luz natural na edificação e às necessidades relativas à eficiência energética em edificações, a pesquisa apresentada nesse artigo pretende contribuir com indicações para o uso de luz natural de maneira racional e eficiente na arquitetura, focando especificamente ambientes residenciais.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é apresentar, através de estudos realizados por meio do uso de simulação computacional de métricas dinâmicas, a influência da profundidade do ambiente no comportamento da luz natural em ambientes residenciais, considerando o contexto climático brasileiro, de forma a contribuir para as boas práticas na arquitetura para o uso da luz natural e mais especificamente com o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (BRASIL, 2010).

3. MÉTODO

Tendo em vista a necessidade de simulação das diversas condições existentes ao longo do ano (condições de céu, data e hora), fez-se necessária a utilização do software de simulação de métricas dinâmicas-Daysim (REINHART, 2005). Foram desenvolvidos 5 modelos combinando os seguintes parâmetros: horário de ocupação, iluminância mínima desejada no ambiente interno e Autonomia de Luz Natural (Daylight Autonomy -DA). Os dados obtidos foram organizados em planilhas e gráficos para a análise, tornando possível verificar o comportamento da luz natural e definir uma relação entre a profundidade do ambiente interno relacionada à altura da verga da janela, de forma a garantir uma condição específica de iluminação natural ao longo do ano em várias condições climáticas brasileiras. Assim, a metodologia utilizada neste trabalho está dividida em três etapas:

1. Desenvolvimento do modelo de simulação e parâmetros de análise
2. Simulações computacionais com o software Daysim para diversas condições climáticas e latitudes brasileiras;
3. Análises e discussão dos resultados.

3.1. Desenvolvimento do modelo de simulação e parâmetros de análise

Para este estudo foi definido e construído um modelo base de um ambiente residencial hipotético de 23 m², de forma a permitir a verificação do alcance em profundidade da luz natural nas diversas situações simuladas. O modelo tem a mesma área dos modelos utilizados para os testes de desempenho térmico e energético do RTQ-R, com aumento do comprimento para permitir melhor análise da penetração da luz natural. O ambiente foi modelado com dimensões de 3,00 m de largura x 7,66 m de comprimento, com pé-direito de 2,50 m. A área de abertura possui 1/6 da área de piso com dimensões de 3,00 m de largura x 1,27 m de altura e peitoril de 1 m (Figura 1). As características das superfícies do modelo estão de acordo com o descrito na Tabela 1, que vem no *default* do programa e estão em consonância com dados sugeridos por Steffy (1990, apud SOUZA, 2003) como valores de refletâncias reais.

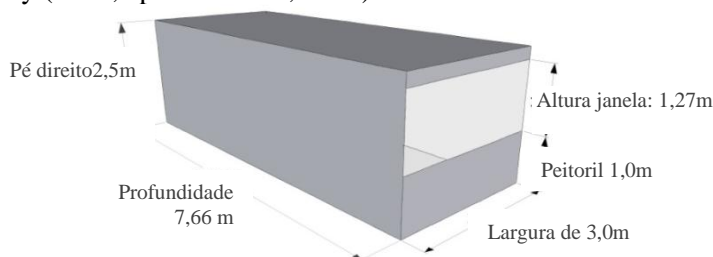


Figura 1 -3D do modelo base

Tabela 1 - Característica das Superfícies

Superfície	Característica
Pisos	30% de Refletância
Tetos	84% de Refletância
Paredes	58% de Refletância
Vidro	Transmissão luminosa de 90%.

Para verificar a profundidade de penetração da luz natural no ambiente na altura do plano de trabalho, foi estabelecida uma malha de pontos de acordo com o indicado pela NBR 15215-4 (2005), suficiente para caracterizar um plano de análise. O ambiente interno foi, portanto, dividido em partes iguais totalizando 18 pontos de medição, com espaçamento de 1 metro entre si, afastados 50 cm das paredes e janela (Figura 2). A altura da malha é a altura do plano de trabalho.

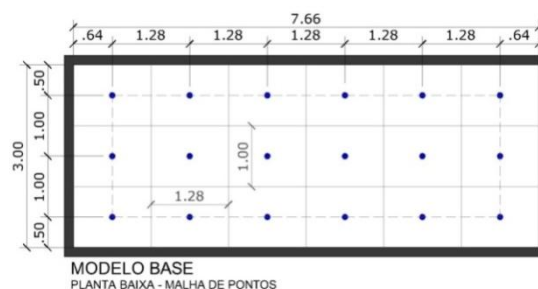


Figura 2 - Malha de pontos de medição dos modelos

3.1.1. Desenvolvimento dos Modelos

Além das características físicas do modelo, para avaliação do comportamento da luz natural, foram definidas outras três variáveis de simulação:

- horário de ocupação: que define horário em que a simulação computará os valores de luz natural;
- a iluminância de projeto, que é a exigência da iluminância mínima a ser atendida apenas com luz natural;
- o percentual de autonomia da iluminação natural (DaylightAutonomy - DA), que verifica a porcentagem de horas em que o nível de iluminância de projeto é atendido (REINHART, MARDALJEVIC E ROGERS, 2006)

Para analisar o comportamento da luz natural diante da primeira variável – Horário de Ocupação - foram simulados três horários diferentes.

O primeiro horário de ocupação simulado foi de 6 às 18h, considerado um período de ocupação possível em um ambiente residencial.

O segundo o horário simulado foi uma adequação do primeiro às horas de sol reais de cada localidade simulada. Para isso, por meio da análise da carta solar, determinou-se que as horas de sol a serem consideradas para a simulação seriam 1 hora após do nascer do sol até 1 hora antes do pôr do sol, durante o solstício de inverno, ou seja, foi considerado o período mais curto de sol para cada cidade, conforme a Tabela 2 - Segundo Horário de Ocupação utilizado nas simulações de luz natural.

Tabela 2 - Segundo Horário de Ocupação utilizado nas simulações de luz natural.

CIDADE	LATITUDE	Solstício inverno		Horário utilizado nas simulações	
		nasce às:	se põe às:	a partir:	até:
São Luis	03°21'	06:00	18:00	07:00	17:00
Natal	05 ° 47'	06:00	18:00	07:00	17:00
Maceió	09°21'	06:15	17:45	07:15	16:45
Salvador	12°58'	06:15	17:45	07:15	16:45
Brasília	15°55'	06:30	17:30	07:30	16:30
Belo Horizonte	19°55'	06:45	17:15	07:45	16:15
Rio de Janeiro	22°54'	06:45	17:15	07:45	16:15
São Paulo	23°32'	06:45	17:15	07:45	16:15
Curitiba	25°25'	06:45	17:15	07:45	16:15
Florianópolis	27°10'	07:00	17:00	08:00	16:00
Porto Alegre	30°01'	07:00	17:00	08:00	16:00

O terceiro horário de ocupação utilizado foi das 8 às 16h, que corresponde ao menor horário de ocupação utilizado no horário variável.

A segunda variável utilizada foi a iluminância de projeto, que é o nível de iluminância fornecido apenas pela Luz Natural e considerado como critério para avaliação da Autonomia de Luz Natural (DA). Inicialmente foi exigida a iluminância de 100 lux, que se trata do valor mínimo de Iluminância de luz natural útil (Useful Daylight Illuminances – UDI) segundo estabelece Reinhart (2005). Em um segundo momento, foi exigido nas simulações o nível de iluminância de 60 lux, que está de acordo com a NBR 15.575 (ABNT, 2008). Esta especifica o nível iluminância de 60 lux apenas com luz natural para salas, dormitórios, cozinhas, banheiros e área de serviço.

A terceira variável de simulação utilizada foi o Percentual de Autonomia da Iluminação Natural (Daylight Autonomy – DA). Foram realizadas simulações exigindo 80% e 70% das horas do ano com o nível de iluminância de 60 lux.

Tabela 3 - Resumo das variáveis utilizadas nas simulações

1. Horário de ocupação	6 às 18 hs
	Variável conforme a latitude
	8 às 16hs
2. Nível de iluminância desejado	100 lux (UDI)
	60 lux (NBR 15.575)
3. Percentual de autonomia da iluminação natural durante o ano (DA)	80%
	70%

Assim, para avaliar o comportamento da luz natural e verificar a profundidade de penetração da luz natural no ambiente interno, foi necessário verificar em diversas combinações das variáveis. Portanto, a partir do modelo base, as variáveis horário de ocupação, iluminância de projeto e autonomia de luz natural foram combinadas em 5 diferentes situações, gerando 5 modelos apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Combinação das variáveis, gerando modelos 1,2, 3, 4 e 5

Modelos	Combinações de variáveis	Modelos	Combinações de variáveis
Modelo 1	Horário de ocupação das 6h às 18 h Iluminância de projeto 100 lux 80% de autonomia de luz natural	Modelo 4	Horário de ocupação das 8h às 16 h Iluminância de projeto 60 lux 70% de autonomia de luz natural
Modelo 2	Horário de ocupação variável Iluminância de projeto 100 lux 80% de autonomia de luz natural	Modelo 5	Horário de ocupação variável Iluminância de projeto 60 lux 70% de autonomia de luz natural
Modelo 3	Horário de ocupação variável Iluminância de projeto 60 lux 80% de autonomia de luz natural		

3.2. Simulação

Para iniciar as simulações é necessário importar para o Software Daysim, em formato 3Ds, os modelos tridimensionais construídos e caracterizados no programa Sketchup, além da malha de pontos de medição do ambiente. Em seguida são configurados os parâmetros da simulação, que guiam o programa como realizar esta simulação (REINHART, 2010).

Após cada simulação o Daysim produz um relatório com valores em métricas para análise da luz natural para cada ponto da malha de medição. As métricas fornecidas são as seguintes: Fator de Luz Natural (DF), Autonomia de Luz Natural (Daylight Autonomy - DA), Autonomia de Luz Natural Contínua (DAcon), Autonomia de Luz Natural Máxima (DAmáx), Iluminância Natural Útil (UDI), DSP e a exposição anual de luz. Neste trabalho a métrica utilizada foi a Autonomia de Luz Natural (Daylight Autonomy - DA), que indica em porcentagem as horas do ano em que determinada iluminância (iluminância de projeto) é atendida apenas com a Luz Natural.

O Daysim importa dois tipos de formato de arquivos climáticos que contém o TRY, os arquivos .epw e .wea, e extrai as informações necessárias para a simulação (REINHART, 2010). Neste trabalho, foram utilizados os arquivos climáticos de brasileiras disponibilizados no site do o Departamento de Energia dos EUA (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm), que fornece dados climáticos de mais de 660 localidades do mundo.

3.2.1. Cidades simuladas

A escolha das cidades para serem simuladas priorizou as capitais brasileiras de acordo com a diferença de latitudes e diversidade de Zonas Bioclimáticas, de modo a representar o melhor possível o país como um todo e permitir a verificação da influência latitude e do tipo de céu no comportamento da luz natural. Assim, foram escolhidas 11 capitais brasileiras para as simulações: São Luís (2°58' Sul), Natal (5,91' Sul), Maceió (9°51' Sul), Salvador (12°9' Sul), Brasília (15°86' Sul), Belo Horizonte (19°6' Sul), Rio de Janeiro (22°83' Sul), São Paulo (23°61' Sul), Curitiba (25°51' Sul), Florianópolis (27°66' Sul) e Porto Alegre (30° Sul).

Os Modelos 1,3,4 e 5 foram simulados para as 11 cidades nas orientações Norte, Sul, Leste e Oeste. Já o Modelo 2 teve o objetivo de verificar o comportamento da luz natural diante da mudança de latitude e orientação, sendo suficiente a simulação para apenas 5 cidades dentre as 11 cidades descritas – São Luís (2°58' Sul), Maceió (9°51' Sul), Brasília (15°86' Sul), Curitiba (25°51' Sul) e Florianópolis (30°), nas quatro orientações (Norte, Sul, Leste e Oeste).

Assim, foram realizadas nessa pesquisa 196 simulações no total.

3.2.2. Processamento e análise dos dados

Para a análise da profundidade alcançada pela luz natural no ambiente foi utilizada parte da metodologia desenvolvida por Didoné (2009), que utilizou diferentes métodos gráficos integrados para análise dos dados resultantes das simulações. Os métodos integrados permitem uma avaliação visual do comportamento da luz natural e numérica de acordo com os dados obtidos.

Após as simulações o relatório gerado pelo Daysim fornece os valores de Autonomia de Luz Natural (DA) em cada ponto da malha de medição. Esses dados foram inseridos no programa WinSurf, que converte tabela de dados em curvas de cores falsas com mesmo DA (ISO-DA) (Figura 3). Com o gráfico gerado é possível analisar o comportamento da luz natural na malha de pontos, visualizando as diferentes faixas de valores de DA distribuídos pelo plano de trabalho. Em seguida, os gráficos gerados no Winsurf são exportados na extensão .jpg e inseridos no AutoCAD 2009, sobreposto à planta baixa do ambiente, com sua respectiva malha de pontos. Dessa forma é possível analisar o comportamento da luz natural em conjunto com os limites do ambiente e a medição da profundidade atingida por determinada curva de ISO-DA.

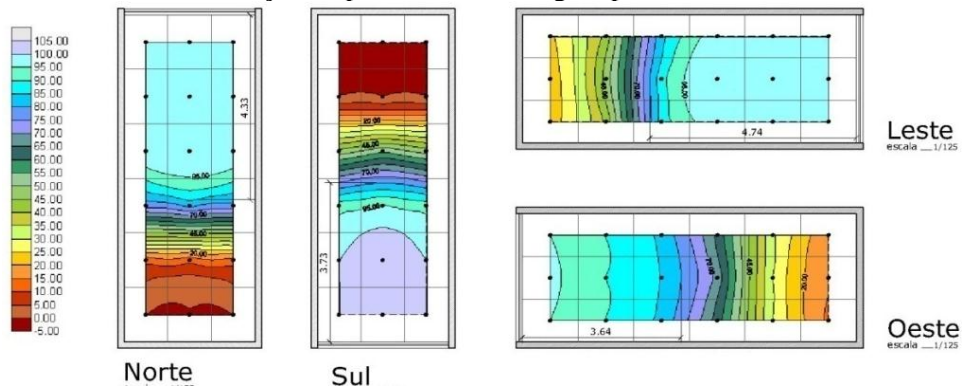


Figura 3-Exemplo de gráficos de ISO-DA integrados à planta baixa do ambiente, para análise do comportamento da luz natural. As faixas de cores de ISO-DA representam em porcentagem de horas do ano, com determinado horário de ocupação, que atendem à iluminância de projeto.

No estudo aqui apresentado, a profundidade alcançada pela luz natural (P_{LN} - em metros) foi relacionada à altura da verga da janela. Assim, as medições da profundidade foram feitas na planta do arquivo CAD e divididas por 2,27m (altura da verga da janela de todos os modelos). Ou seja, a relação de profundidade (P) é igual a profundidade atingida pela luz natural mantendo a iluminância de projeto previamente definida, dividida pela altura da verga da janela, conforme a Equação 1 abaixo:

$$P = P_{LN} / H \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

P= Relação da Profundidade da luz natural com a Altura da verga da janela (adimensional)

P_{LN} = Profundidade alcançada no ambiente pela luz natural com a Iluminância de Projeto e Autonomia de Luz Natural (DA) definidas (em metros)

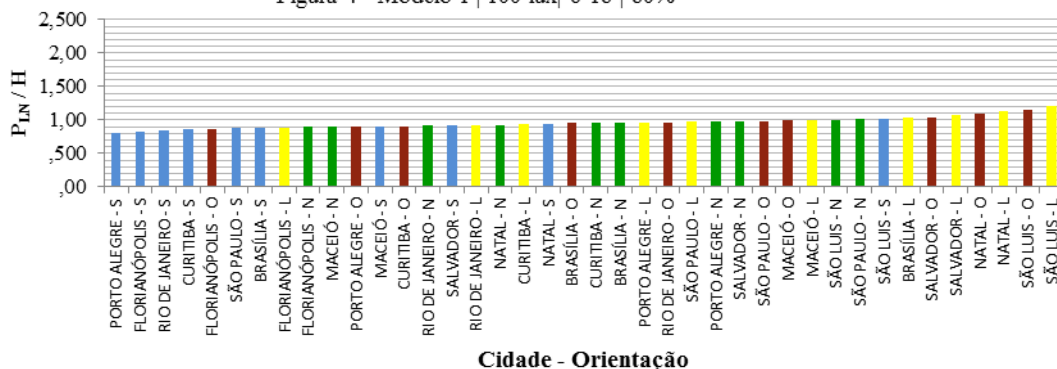
H = Altura da verga da janela(igual a 2,27m em todos os modelos)

A profundidade alcançada pela luz natural em cada modelo simulado, de cada cidade e em cada orientação, é medida e os dados são sintetizados em formato de gráficos, gerados pelo Microsoft Excel. A partir dos gráficos gerados é possível a comparação dos resultados entre várias latitudes e orientações.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O Modelo 1 obteve valores da profundidade alcançada pela luz natural entre 0,8 a 1,2 vezes a altura da verga da janela e houve pouca diferença em relação às latitudes e orientação. Dentro dessa faixa de profundidade, houve uma tendência de menor valor de profundidade para a orientação Sul nas cidades com maior latitude. Já os resultados de maior profundidade alcançada pela Luz Natural, tiveram como tendência a orientação Leste e Oeste para as cidades com menor latitude. A orientação Norte obteve valores intermediários, como pode ser observado pela Figura 4.

Figura 4 - Modelo 1 | 100 lux | 6-18 | 80%



O comportamento apresentado nos resultados desse modelo foi decorrente ao horário de ocupação utilizado na simulação. As cidades de menor latitude possuem um horário de sol praticamente constante ao longo do ano, com o nascer próximo das 6h e com o por do sol próximo das 18h, que é compatível com o horário de ocupação definido para a simulação. Já as cidades com maior latitude no período de inverno, as horas de sol é bem menor que o período estipulado para a simulação, sendo computado nos resultados horas que ainda não há luz natural. E no verão, quando o período de sol é maior, as horas “a mais” de luz natural não são computadas tendo em vista a ocupação ter sido delimitado até às 18h.

No modelo 2 (Figura 5) verifica-se que o padrão dos maiores valores de profundidade passou ser a orientação Norte para as maiores latitudes. As orientações Leste e Oeste passaram a ser os valores intermediários, e a orientação Sul para as cidades de maior latitude obtiveram os menores valores.

Esse comportamento da luz natural responde à maior incidência de luz solar direta na fachada Norte durante o período de um dia, tendo em vista que nessa fachada a luz solar direta é constante tanto no período da manhã quanto à tarde, principalmente nas maiores latitudes, enquanto as orientações Leste e Oeste recebem luz direta apenas em um período do dia (pela manhã ou a tarde). A fachada com orientação Sul é a que recebe menos luz direta, principalmente nas maiores latitudes, por isso os menores valores de profundidade.

Observa-se também que, para garantir 100 lux durante 80% das horas, apesar de considerar o horário de ocupação variável para cada cidade, os valores para profundidade teriam que ser muito baixos, entre 1 e 1,44 vezes a altura da verga da janela, enquanto o que a literatura indica como “ideal” para profundidade máxima é em média de 1,5 a 2,5 vezes a altura da verga da janela (REINHART, 2005).

O modelo 3 (Figura 6) apresentou o mesmo comportamento da profundidade alcançada pela luz natural no ambiente que o Modelo 2 – o padrão dos maiores valores de profundidade foi a orientação Norte para as cidade de maior latitude, as orientações Leste e Oeste mantiveram a tendência dos valores intermediários e a orientação Sul obteve os menores valores, principalmente para as menores latitudes.

Figura 5 - Modelo 2 | 100 lux | variável | 80%

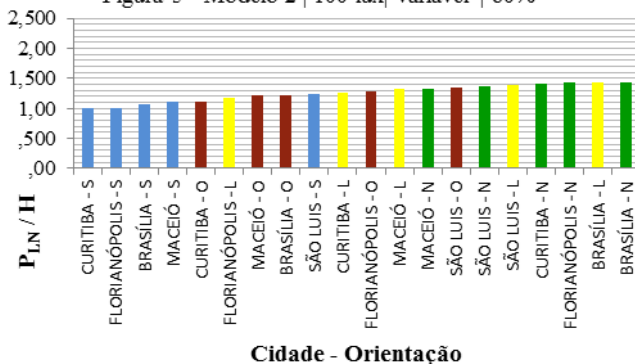
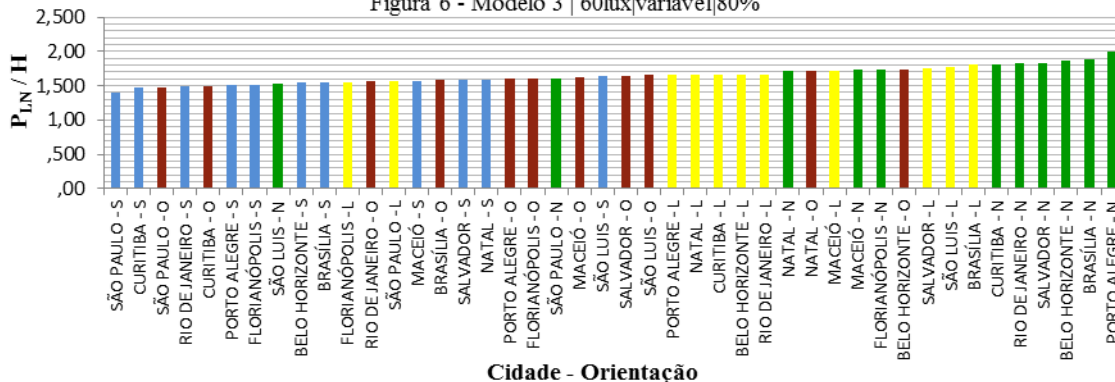


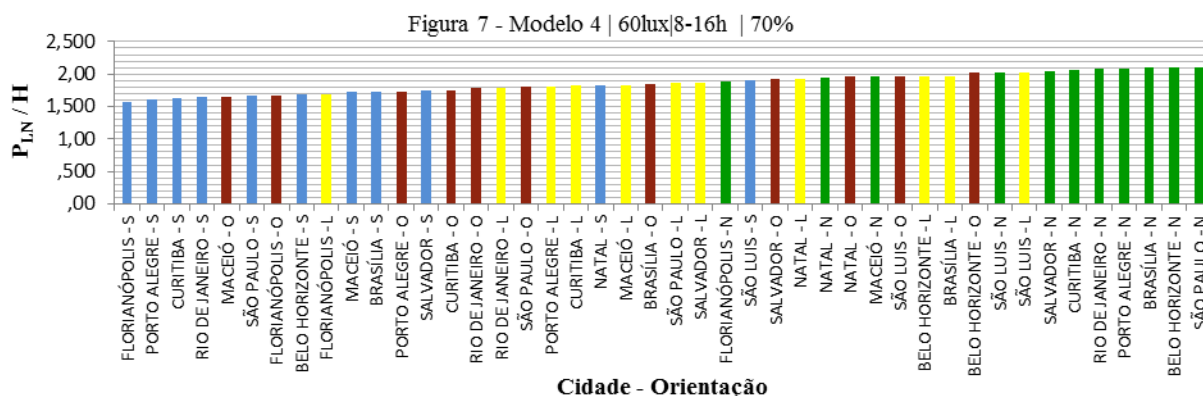
Figura 6 - Modelo 3 | 60lux|variável|80%



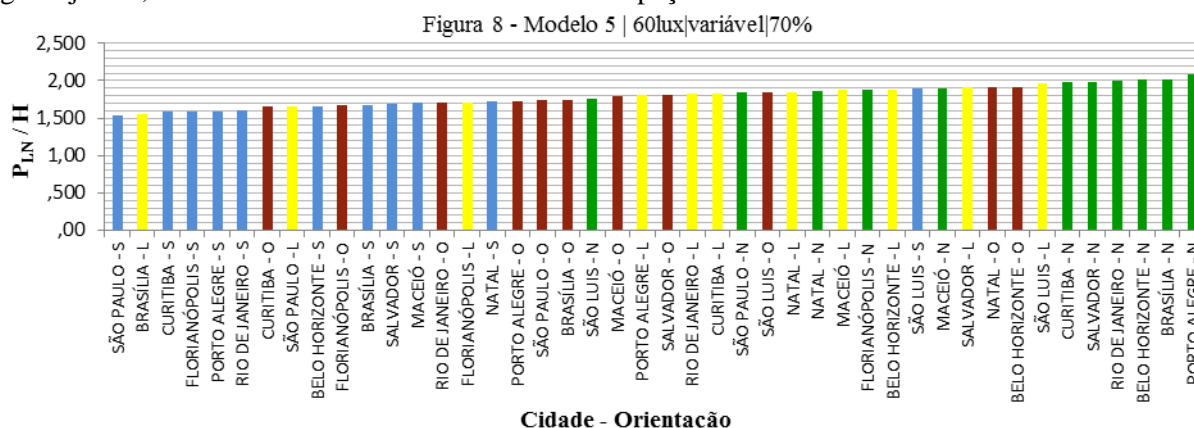
A menor profundidade alcançada pela luz natural foi para a orientação Sul na cidade de São Paulo, com o valor de 1,41 vezes a altura da verga da janela, e o maior valor foi para a orientação Norte em Porto Alegre, com 2 vezes a altura da verga da janela, tendo assim a amplitude de 0,51. A média da profundidade

atingida foi de 1,65 vezes a altura da verga da janela. Este resultado indica que ao aplicar a média da profundidade alcançada pela luz natural, 1,65 vezes a altura da verga da janela, em ambientes similar ao utilizado no modelo (sem proteção solar, a área de abertura com 1/6 da área de piso, altura da verga da janela de 2,27 e com refletâncias similares) resulta que até 3,75 metros de profundidade a partir da abertura, são garantidos 60 lux de luz natural, em 80% das horas, considerando o horário de ocupação variável, em um ano.

O modelo 4 (Figura 7) obteve o mesmo comportamento da profundidade alcançada pela luz natural que ocorreu nos modelos 2 e 3. Isso ocorreu, pois foi considerado o menor horário de ocupação, que garantiu nas simulações apenas horas em que há disponibilidade de luz natural em todas as cidades. A principal diferença entre os resultados dos Modelos 3 e 4 foi o aumento da profundidade alcançada pela luz natural, tendo em vista a menor exigência do DA e menor horário de ocupação. Nesse modelo a menor profundidade alcançada pela luz natural foi na orientação Sul na cidade de Florianópolis, com o valor de 1,58 vezes a altura da verga da janela, e o maior valor foi para a orientação Norte em São Paulo, com 2,11 vezes a altura da verga da janela, e a média da profundidade atingida pela luz natural foi de 1,85 vezes a altura da verga da janela.

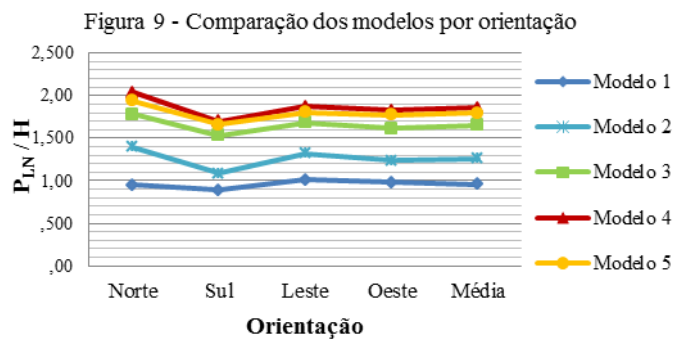


Por fim, o modelo 5 (Figura 8) mostra que o comportamento da luz natural seguiu o padrão dos modelos anteriores (exceto o modelo 1), com os maiores valores de profundidade na orientação Norte, principalmente para as cidades de maior latitude. As orientações Leste e Oeste continuaram com a tendência de valores intermediários e a orientação Sul obteve os menores valores, principalmente para as cidades de menor latitude. Verifica-se que a menor profundidade alcançada pela luz natural foi na orientação Sul na cidade de São Paulo, com o valor de 1,53 vezes a altura da verga da janela, e o maior valor foi para a orientação Norte em Porto Alegre, com 2,09 vezes a altura da verga da janela, sendo que a profundidade média alcançada no Modelo 5 diminuiu em relação ao modelo anterior, passou para 1,80 vezes a altura da verga da janela, devido o uso de um maior horário de ocupação.



Este resultado indica que ao aplicar a média da profundidade alcançada pela luz natural, 1,80 vezes a altura da verga da janela, em ambientes similares ao utilizado no Modelo (sem proteção solar, a área de abertura com 1/6 da área de piso, altura da verga da janela de 2,27 e com refletâncias similares) resulta que até 4,08 metros de profundidade a partir da abertura, são garantidos 60 lux de luz natural, em 70% das horas, considerando o horário de ocupação variável durante o ano.

Ao analisar a Figura 9 observa-se que os modelos 2, 3, 4 e 5 obtiveram um comportamento similar da profundidade alcançada pela luz natural no ambiente interno. Nesses modelos houve uma tendência dos menores valores da profundidade alcançada serem na orientação Sul, principalmente nas cidades de maior latitude. Já os maiores resultados, tiveram como tendência a orientação Leste e Oeste para as cidades com menor latitude. Enquanto a orientação Norte obteve os valores intermediários. Apenas o Modelo 1, que utilizou o horário de 6 as 18h, obteve um comportamento diferente da luz natural em relação as demais situações, neste caso as orientações Leste e Oeste tiveram os maiores resultados ao invés da orientação Norte.



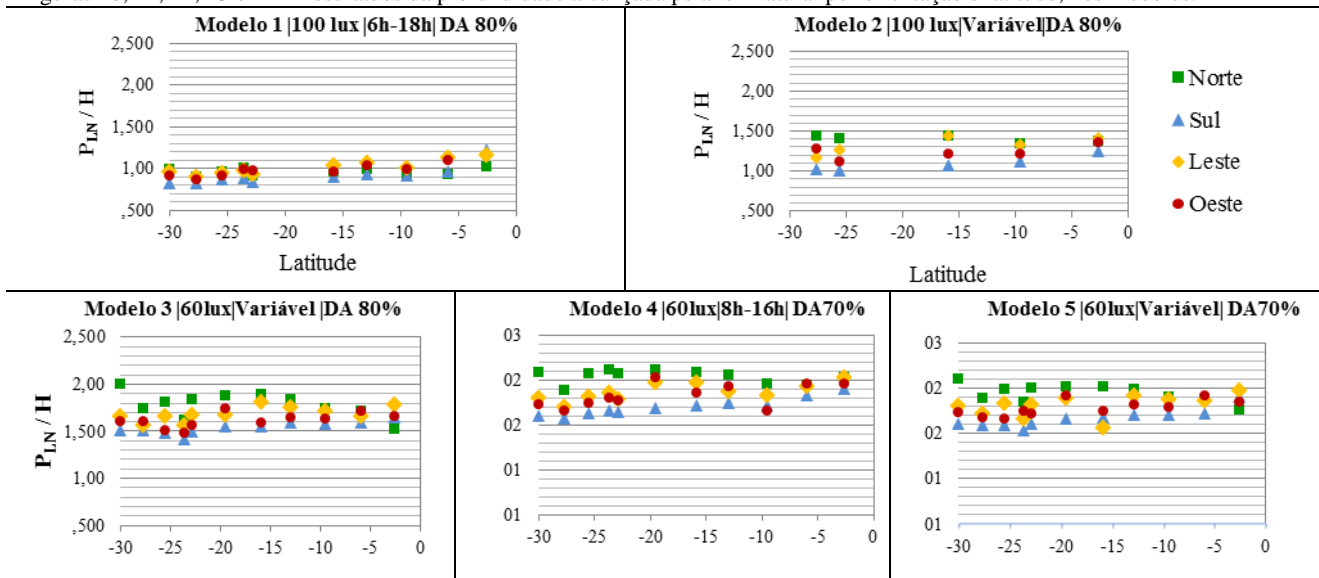
Este resultado é justificado pela utilização de longo período para o horário de ocupação (a partir das 6h até as 18h), o qual computa nos resultados, principalmente para as cidades de maior latitude, horas que não há luz natural (por volta das 6h até as 7h) e exclui dos resultados horas que ainda há luz natural (depois das 18h), prejudicando assim os resultados.

Observa-se ainda que a utilização do menor horário de ocupação, no Modelo 4, influenciou na obtenção dos maiores resultados de profundidade, por ser um horário pequeno de ocupação, o qual garante computar nos resultados apenas as horas de sol. No entanto, o horário variável para cada latitude foi o mais coerente, tendo em vista que resultados refletem as características de horas de sol de cada cidade, sem prejudicar ou beneficiar os resultados para cidades de latitudes diferentes.

Observou-se que a orientação também interfere significativamente nos resultados alcançados, principalmente nas cidades de maior latitude. A orientação Norte obteve os maiores resultados na profundidade, exceto no Modelo 1, e chegou a 2,11 vezes a altura da verga da janela no Modelo 4. Enquanto o valor máximo atingido pela orientação Sul foi de 1,58 vezes a altura da verga da janela, no Modelo 4. As orientações Leste e Oeste obtiveram, na maioria dos casos, valores intermediários, sendo que em todos os modelos, a média da orientação Leste obteve os resultados um pouco maiores em relação à orientação Oeste.

Em relação à latitude, verifica-se que quanto maior a latitude, maiores são os resultados para orientação Norte e menores são os resultados para orientação Sul (Figura 10, 11, 12, 13 e 14). Esse comportamento de resultados é verificado nos modelos 3, 4 e 5, os quais indicam que a partir da latitude -10°, a diferença da profundidade alcançada pela luz natural entre as orientações é mais significativa.

Figuras 10, 11, 12, 13 e 14 - Resultados da profundidade alcançada pela luz natural por orientação e latitude, nos modelos.



Quanto às análises da autonomia de luz natural (DA), observou-se que a exigência da iluminância de projeto de 100 lux em 80% das horas é muito alta, tendo em vista que a profundidade alcançada foi na faixa de 1 vez a altura da verga da janela, como o indicado nos resultados do Modelo 1. Este resultado fica longe do indicado pela literatura – que é em entre 1,5 e 2,5 vezes a altura da verga da janela (REINHART, 2005), e mostra-se pouco aplicável na realidade das edificações brasileiras, tendo em vista que nesse caso a profundidade limite do ambiente, respeitando as características estabelecidas no modelo, seria de 2,27 metros (que é a altura da verga da janela).

Ao utilizar o recomendado na NBR 15.575 (2008), 60 lux de iluminação natural em 70% das horas, de acordo com o horário de sol de cada cidade (Modelo 5), os resultados obtidos na profundidade da luz natural foram em média 1,80 vezes a altura da verga da janela. Este resultado ficou mais próximo dos valores verificados na literatura, que são entre 1,53 e 2,09 vezes a altura da verga da janela (REINHART, 2005).

A profundidade limite resultante do Modelo 5 representa, de maneira geral, que ambientes de edificações localizadas no Brasil, que possuam a área de abertura em torno de 1/6 da área de piso, sem proteção solar e com refletâncias internas no padrão utilizado na arquitetura (tetos 84%, paredes 58% e piso 30%), devem ter uma profundidade limite de 1,8 vezes a altura da verga da janela para garantir 60 lux em todo o ambiente, em 70% das horas do ano, de acordo com o horário de sol de cada localidade.

5. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados nesta pesquisa e as análises efetuadas sobre as simulações computacionais realizadas mostram-se eficientes, demonstrando que é possível encontrar valores que relacionam a profundidade limite do ambiente com a altura da abertura, de um determinado padrão de ambiente, de forma a garantir condições específicas de iluminação natural dentro do contexto climático brasileiro, lembrando que os resultados de iluminância interna apresentados desconsideram a possível influência do entorno.

O programa Daysim, principal ferramenta utilizada nesta pesquisa, mostra-se adequado para a simulação de iluminação natural dinâmica. O *software* de apoio (WinSurf) mostra-se ferramenta eficiente na geração de mapas de representação dos resultados simulados, uma vez que utiliza paleta de cores RGB, as quais que são facilmente identificáveis.

É necessário aprofundar as pesquisas no sentido de preencher a carência de conhecimentos com relação ao desempenho da luz natural em ambientes internos, possibilitando obter valores para cada especificidade arquitetônica e climática. Será possível desta maneira a criação de regras aplicáveis a projeto que garantam condições conhecidas de iluminação natural, podendo ser implementadas em Regulamentos (especificamente no RTQ-R), normas, códigos de obras, etc, contribuindo para a melhor qualidade e possivelmente maior eficiência energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORIM, C. N. D. Diagrama Morfológico parte I: instrumento de análise e projeto ambiental com uso de luz natural. **Paranoá – Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, n° 3. Programa de Pesquisa e Pós Graduação, Universidade de Brasília. Brasília: 2007
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 5461**: Iluminação. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 15.575 -Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos. Parte 4: Sistemas de vedações verticais externas e internas**. Rio de Janeiro: 2008.
- _____. **NBR 15215-2**: Iluminação natural - Parte 2: Procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural. Rio de Janeiro, 2005 a.
- _____. **NBR 5413**: Iluminância de interiores. Rio de Janeiro, 1992.
- DIDONÉ, Evelise L. **A influência da Luz Natural na avaliação da eficiência energética de edifícios contemporâneos de escritórios em Florianópolis**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFSC, Florianópolis, 2009.
- DIDONÉ, Evelise L.; PEREIRA, Fernando O. R. **Introdução à simulação integrada com os programas Daysim e EnergyPlus**. Laboratório de Conforto Ambiental . Departamento de Arquitetura e Urbanismo – CTC/ARQ/UFSC. Florianópolis, 2009.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Plano Decenal de Energia – PDE 2019**. Rio de Janeiro: EPE, 2010. Disponível em: http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20100504_2.pdf . Acesso em 10 de julho de 2010.
- GHSI, EneDir; TINKER, John A.; IBRAHIM, Siti H. **Área de janela e dimensões para iluminação natural e eficiência energética: literatura versus simulação computacional**. In.: Ambiente Construído. V.5, n.4, p. 81-93. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. INSS: 1415-8876. Porto Alegre: 2005
- PEREIRA, Fernando O. R. **Luz solar direta: tecnologia para melhoria do ambiente lumínico e economia de energia na edificação**. In: 2º Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, ANAIS. Florianópolis: ANTAC, ABERGO, SOBRAC, 1993. CD-ROM 1990-2009.
- REINHART, C. F. **A simulation-based review of the ubiquitous window-head-height to daylit zone depth rule-of-thumb**. In: Internacional Building Simulations Conference 9, Montreal, Canada, 2005. Proceedings... Montreal: IBPSA.
- REINHART, C. F. **Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design**. Harvard University Graduate School of Design, Cambridge, USA. 2010.
- REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. **Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design**. NRCC-48669. 2006
- SOUZA, M. B. **Potencialidade de aproveitamento da luz natural através da utilização de sistemas automáticos de controle para economia de energia elétrica**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: 2003.

Agradecimentos: AO CNPQ PELA CONCESSÃO DE BOLSAS NO EDITAL CT-ENERG 2008.
À FAP-DF PELO APOIO À PARTICIPAÇÃO NO EVENTO.