

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
NÚCLEO DE PESQUISA EM CONSTRUÇÃO  
LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES**

**CONSTRUÇÃO, CONFORTO AMBIENTAL  
E USO RACIONAL DE ENERGIA E ÁGUA  
PROJETO INTEGRADO CNPq**

**USO DO PROGRAMA RADIANCE COMO FERRAMENTA DE  
ANÁLISE DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO**

**Bolsista: MICHELE MATOS  
Orientador: ROBERTO LAMBERTS**

**Florianópolis, agosto de 2003.**

**SUMÁRIO**

<b>RESUMO</b> .....	<b>2</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>3</b>
<b>2. JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>3</b>
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
<b>4.1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>4</b>
4.1.1. <i>A Iluminação Natural</i> .....	4
4.1.2. <i>A Iluminação Artificial</i> .....	4
<b>4.2. A UTILIZAÇÃO DE PROGRAMAS PARA ANÁLISE DE AMBIENTES</b>	<b>5</b>
<b>4.3. CONCEITOS</b> .....	<b>5</b>
4.3.1. <i>Iluminância (E)</i> .....	5
4.3.2. <i>Luminância (L)</i> .....	5
4.3.3. <i>Intensidade Luminosa</i> .....	5
4.3.4. <i>Curva Fotométrica</i> .....	5
4.3.5. <i>Refletância</i> .....	6
4.3.6. <i>Especularidade</i> .....	6
<b>5. METODOLOGIA</b> .....	<b>7</b>
<b>5.1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
<b>5.2. CRIAÇÃO DO MODELO NO RADIANCE</b> .....	<b>7</b>
<b>5.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO</b> .....	<b>9</b>
5.3.1. <i>Iluminação Natural</i> .....	9
5.3.2. <i>Sistema de Iluminação Artificial</i> .....	10
<b>6. RESULTADOS</b> .....	<b>11</b>
<b>6.1. DESCRIÇÃO DO AMBIENTE</b> .....	<b>11</b>
<b>6.2. SISTEMA DE ILUMINAÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>6.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO</b> .....	<b>12</b>
6.3.1. <i>Iluminação Natural</i> .....	13
6.3.2. <i>Sistema de Iluminação Artificial</i> .....	18
<b>6.4. MODELAGEM DA LUMINÁRIA</b> .....	<b>23</b>
<b>7. CONCLUSÕES</b> .....	<b>25</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>26</b>

## RESUMO

Esse relatório apresenta as atividades desenvolvidas durante a bolsa de iniciação científica, entre agosto/2002 e julho/2003. Nesse período ocorreu o estudo sobre o uso do programa *Desktop Radiance* como ferramenta de análise de sistemas de iluminação. Como resultado desse estudo duas salas de aula do Centro Tecnológico foram simuladas; uma em situação de iluminação natural e outra em situação de iluminação artificial. As condições de iluminação natural foram simuladas em diferentes horários para três dias do mês de janeiro e três dias do mês de junho. Para cada dia e horário específico simulou-se o céu em três condições distintas (claro, parcialmente encoberto e encoberto). Como forma de avaliar a eficiência dos brises instalados no CTC, duas situações foram simuladas para a sala de aula 208, que possui orientação oeste. Na primeira, o ambiente não conta com a utilização das proteções solares e na segunda situação o programa simula a sala de aula com as proteções existentes no local. A sala de aula 106 foi simulada nas condições reais e modificando-se a refletância das paredes, ou seja, considerando-as com pintura na cor branca ao invés de serem de tijolo aparente. A fim de comparar-se os resultados obtidos com o *Desktop Radiance*, estes foram verificados através de medições in-loco com luxímetros portáteis. A média dos valores simulados para a iluminação artificial, superou em 12% a média dos valores medidos, com diferença máxima de 37%. Alterando – se a refletância das paredes, a iluminância média obtida para o ambiente foi 29% superior, gerando economia com a retirada de lâmpadas desnecessárias. As proteções solares utilizadas protegem o ambiente da radiação solar direta nos horários mais críticos, mas impedem a entrada da luz natural nos outros horários que não apresentam essa radiação. Um novo projeto prevendo a instalação de prateleiras de luz, a fim de redirecionar a luz natural, e novos circuitos de forma a desligar as luminárias situadas próximas às janelas levaria a uma economia de energia elétrica com melhoria do sistema de iluminação das salas. No caso específico, a ausência de luminárias equivalentes na base de dados e a impossibilidade de inserir um modelo personalizado constituiu-se no principal fator limitante da simulação no *Desktop Radiance*, versão 1.02 beta. No término da bolsa teve-se acesso a uma nova versão do programa, na qual é possível a construção de uma luminária específica utilizando seu desenho e respectivo arquivo IES.

PALAVRAS-CHAVE : simulação - iluminação - eficiência energética

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a procura pelas melhores soluções arquitetônicas e elétricas para edificações é muitas vezes viabilizada através do uso de programas computacionais que permitem a simulação de diversas situações. A escolha de um sistema condicionador de ar eficiente, de lâmpadas e luminárias de alto rendimento; o projeto de proteções solares e até mesmo a análise das contas de energia elétrica de uma edificação torna-se muito mais fácil e eficaz através do uso de programas computacionais.

O Radiance, desenvolvido para rodar em plataforma UNIX, é um pacote de ferramentas para auxiliar na análise e visualização de projetos de sistemas de iluminação, sejam eles naturais ou artificiais. A partir da descrição geométrica do ambiente, dos materiais, luminárias e lâmpadas e da definição da data e hora do dia, o programa simula as condições de luz natural e artificial no ambiente. O Desktop Radiance é uma interface gráfica do Radiance para Windows, que se utiliza de menus na própria barra de ferramentas do programa AutoCAD para incluir luminárias, lâmpadas, materiais nas superfícies e diversos objetos no ambiente desenhado em 3 dimensões.

## 2. JUSTIFICATIVA

No desenvolvimento de suas pesquisas, o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) utiliza diversas ferramentas computacionais, algumas delas elaboradas no próprio laboratório.

Visando aprimorar suas pesquisas na área de iluminação, o LabEEE pretende iniciar o uso do software Desktop Radiance, versão 1.02, desenvolvido no Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), na Califórnia, e distribuído gratuitamente pela internet (<http://radsite.lbl.gov/deskrad/>).

O uso do programa auxiliará nos estudos para melhoria na eficiência energética do sistema de iluminação do campus universitário, dentro do PRUEN (Programa de Racionalização do Uso da Energia na UFSC).

## 3. OBJETIVOS

O objetivo principal deste projeto de pesquisa é utilizar o programa Desktop Radiance para simular a iluminação em ambientes, visando-se adquirir experiência suficiente para futuras pesquisas com esta ferramenta de simulação. Dentre os objetivos específicos, pretende-se aprimorar o uso de simulações gráficas em 3 dimensões e verificar a qualidade lumínica das alternativas de *retrofit* propostas pelo LabEEE para edificações do campus da UFSC.

---

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. INTRODUÇÃO

A arquitetura moderna promoveu uma revolução na iluminação. Até então, os ambientes eram pouco iluminados, com cantos escuros e sombrios, e a claridade era controlada por pesadas cortinas.

Com a atual crise energética e escassez dos recursos naturais é cada vez mais fundamental buscar alternativas eficientes do ponto de vista energético. As simulações computacionais são excelentes ferramentas de projeto, que aliadas à utilização de equipamentos eficientes garantem, não apenas a economia de energia, mas também, o conforto do usuário. Segundo LAMBERTS et al. (1997) um bom projeto de iluminação deve garantir às pessoas a possibilidade de executar atividades visuais com o máximo de precisão e segurança e com o menor esforço.

#### 4.1.1. A Iluminação Natural

O problema mais crítico no que se refere à iluminação natural é a utilização dos edifícios modernos, quando se prevê a presença de grande número de pessoas realizando tarefas visuais de diferentes exigências ao mesmo tempo.

Tamanho, forma, posição e proteção das aberturas, profundidade do local, altura do forro e decoração das superfícies internas estão intimamente relacionadas com a qualidade de iluminação. São também significativas as proporções do ambiente, a disposição interna dos ambientes do edifício (em relação aos espaços abertos e de circulação) e o uso que se faz do espaço disponível no terreno. Aberturas iluminantes corretamente dimensionadas, protegidas da radiação solar direta e mantidas em boas condições de uso, são fontes de luz eficientes e econômicas.

As tarefas com maiores exigências visuais devem se localizar em regiões próximas das janelas, onde a iluminação natural é maior, o que trará uma otimização do uso da luz natural, que deve ser complementada com o controle da luminância da janela e da incidência da radiação solar direta. Esta estratégia pode significar uma redução de até 50% no consumo de energia elétrica. (ABILUX,1992)

#### 4.1.2. A Iluminação Artificial

Quando os níveis de iluminação natural não atingem os valores exigidos para a atividade exercida deve-se utilizar a iluminação artificial, considerando-se conceitos de eficiência energética, para que sejam utilizados os componentes adequados, em quantidade e qualidade satisfatórias. A iluminação artificial deve ser apenas complementar à natural durante o dia, o que sugere a separação dos circuitos de acendimento das luminárias paralelas às janelas.

A utilização de iluminação de tarefa, ou seja, níveis de iluminação diferenciados para uma região específica do ambiente, é obtida através de uma análise da distribuição das tarefas visuais no local, identificando-se a necessidade de prover uma iluminação alta em toda a superfície de trabalho ou em algumas partes do ambiente.

## 4.2. A UTILIZAÇÃO DE PROGRAMAS PARA ANÁLISE DE AMBIENTES

A realidade criada por computadores e programas específicos facilita amplamente os complicados cálculos de iluminação. Além de proporcionar a obtenção de uma iluminação correta para o desempenho de tarefas, utiliza a luz para a criação de ambientes, valorizando a arquitetura e o bem-estar das pessoas.

Atualmente existem vários programas no mercado. O *Lightscape* desenvolvido pela Graphics Software (Toronto, Canadá) é comumente utilizado, sendo um dos primeiros programas comerciais baseado na teoria da transferência do fluxo luminoso, com imagens de grande realismo. O Desktop Radiance, utilizado nessa pesquisa, desenvolvido no Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), (Califórnia, Estados Unidos) destina-se a computar iluminância horizontal através de uma malha de pontos arbitrariamente orientada, ou gerar uma imagem renderizada de um espaço que possa ser examinado quanto à iluminância ou luminância de qualquer superfície na perspectiva renderizada do espaço em questão. (LBNL, 2002)

## 4.3. CONCEITOS

A seguir serão descritas algumas grandezas fotométricas e termos pertinentes ao trabalho de pesquisa desenvolvido.

### 4.3.1. Iluminância (E)

O termo *iluminância*, também conhecido como *nível de iluminação*, indica a quantidade de luz (lumens - lm) por unidade de área ( $m^2$ ) que chega em um determinado ponto. O nível de iluminação pode ser medido, porém não visto. O que é percebido são as diferenças na reflexão da luz incidente. Sua unidade é o lux, ou  $lm/m^2$ . (PHILIPS, 1996)

### 4.3.2. Luminância (L)

*Luminância*, ou brilho, denota a intensidade por metro quadrado de área aparente da fonte de luz ou de uma superfície iluminada ( $cd/m^2$ ). Quando as superfícies são iluminadas, a *luminância* é dependente tanto do nível de iluminação quanto das características de reflexão da própria superfície. (PHILIPS, 1996)

### 4.3.3. Intensidade Luminosa

Refere-se ao montante de luz que uma fonte de luz emite por unidade de ângulo sólido (lúmen/esferorradiano) em uma direção específica. Diagramas fornecem uma impressão direta da distribuição de luz de uma luminária. O valor da intensidade luminosa depende da direção e é expresso em candelas (cd) ou candelas/1000lumens ( $cd/klm$ ). (PHILIPS, 1996)

### 4.3.4. Curva Fotométrica

O controle da fonte de luz proporcionado pela luminária é representado em forma de diagramas, mostrando a intensidade luminosa em todas as direções através de medições em laboratório. Estes diagramas são obtidos traçando-se retas radiais, a partir de uma fonte luminosa, com a mesma distância angular entre elas. Utiliza-se de vetores para representar a intensidade luminosa em cada uma das direções traçadas. Através da união da extremidade de cada vetor, é construída a curva de distribuição de intensidade

luminosa da luminária, também conhecida como curva fotométrica (ou polar). (PEREIRA et al., 2001)

#### **4.3.5. Refletância**

A refletância de uma superfície pode ser definida como a razão entre a quantidade de luz emitida por essa superfície e a quantidade de luz incidente sobre a mesma.

#### **4.3.6. Especularidade**

É um termo que qualifica a distribuição espacial da energia radiante refletida ou transmitida por uma superfície. A luz especular vem de uma direção particular e tende a refletir na superfície em uma direção determinada. Pode-se pensar em especularidade como brilho. O coeficiente de especularidade indica quão polida é a superfície. O espelho ideal tem coeficiente de especularidade infinito.

---

## 5. METODOLOGIA

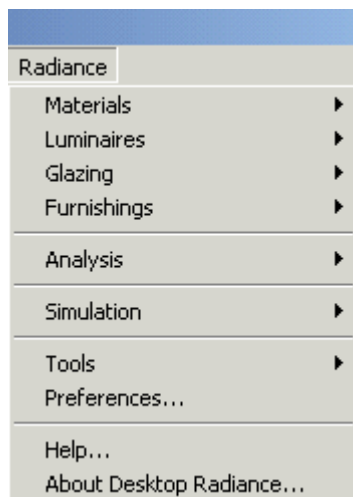
### 5.1. INTRODUÇÃO

Conhecer a ferramenta com a qual se irá trabalhar é fundamental para tomar conhecimento de suas limitações e aproveitar da melhor maneira o que o programa tem a oferecer. Desta forma, a primeira etapa da pesquisa consistiu-se na busca por toda a documentação relevante sobre o programa *Desktop Radiance*. O estudo do manual de utilização foi acompanhado de revisão bibliográfica averiguando-se os trabalhos já publicados sobre o programa.

Ambientes simples foram simulados à medida que o estudo sobre o programa avançava. A fim de comparar os resultados obtidos com *Desktop Radiance*, as situações de iluminação artificial e natural de duas salas de aula do CTC foram simuladas, verificando-se os resultados apresentados pelo programa através de medições in-loco com luxímetros portáteis, que posteriormente serão comparados com os resultados apresentados por MARINOSKI (2002) na utilização de um algoritmo de cálculo através do método ponto-a-ponto.

Os próximos ambientes simulados deverão ser salas escolhidas no novo prédio do departamento de engenharia civil da UFSC.

### 5.2. CRIAÇÃO DO MODELO NO RADIANCE



**Figura 1. Menu de ferramentas do Desktop Radiance inserido no AutoCAD.**

O *Desktop Radiance* é uma interface gráfica do *Radiance* para Windows, através da incorporação de ferramentas (*plug-ins*) no programa gráfico AutoCAD. A criação do modelo desenvolve-se no ambiente do programa AutoCAD (Figura 1), no formato 3D.

A partir de menus na própria barra de ferramentas do AutoCAD pode-se incluir luminárias, lâmpadas, materiais nas superfícies 3D e diversos móveis no ambiente desenhado. O processo de renderização apresenta graficamente a simulação do sistema de iluminação naquele ambiente.

A Figura 2 apresenta o fluxograma de criação do modelo no *Desktop Radiance*. O primeiro passo é definir as unidades que serão usadas no desenho, depois disso pode-se iniciar a montagem do modelo, utilizando sempre elementos sólidos para que o programa possa agregar as características de cada superfície.



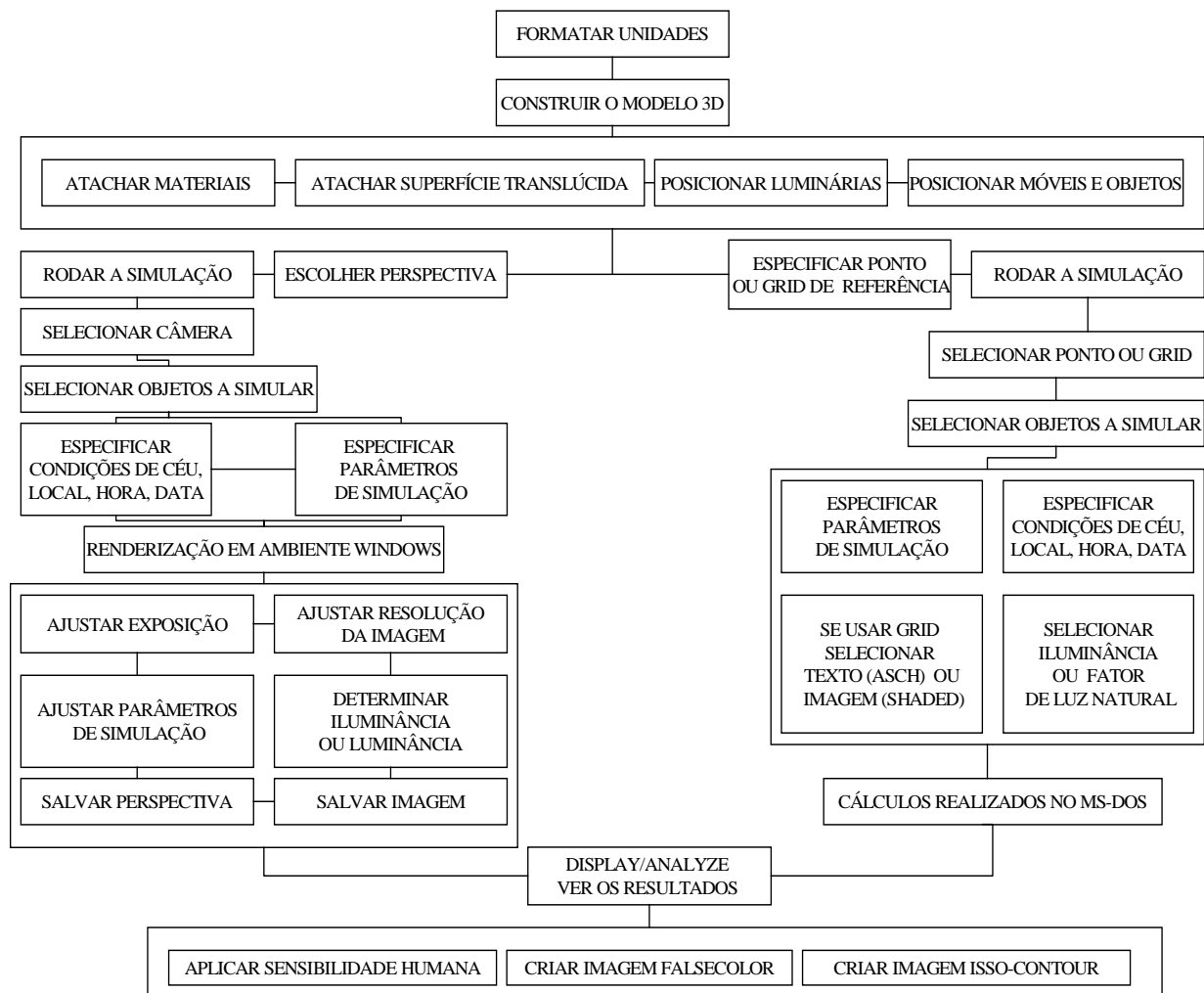


Figura 2. Fluxograma de criação do modelo.

Depois do modelo pronto é necessário anexar os materiais às superfícies, tendo o cuidado de não esquecer algum objeto, o que poderia comprometer a simulação. Nesse ponto o programa apresenta um comando muito útil, a *Material Map*, que anexa um determinado material a um *layer* (camada) ou cor específica de linha traçada. Na sequência, os vidros são escolhidos e posicionados, bem como luminárias, móveis e objetos.

O programa possibilita a escolha de câmeras com perspectivas determinadas pelo usuário, ou a especificação de um ponto de referência ou uma malha de pontos (*grid*), que terão os valores de iluminância ou luminância estimados pelo programa. A escolha da câmera possibilita a visualização das isolíneas, formadas por pontos de mesma iluminância ou luminância.

Para realizar a simulação é necessário optar entre a câmera ou a malha de pontos. Nesse ponto do processo é escolhido um cenário para a simulação com os objetos selecionados. As condições de céu, o local e a hora, assim como os parâmetros de simulação também são definidos. No caso de optar por uma malha de pontos, o usuário necessita escolher entre Iluminância ou Fator de Luz Natural e ainda selecionar Texto (ASCII) ou Imagem (SHADED), como opção de simulação.

Os valores de iluminância no plano de trabalho são obtidos através da locação de uma malha de pontos, apresentada na Figura 3. Na opção "grid" os cálculos são realizados no MS-DOS e no *Simulation Manager* os resultados são obtidos através de uma planilha com as coordenadas dos pontos (Figura 4). A desvantagem é que esta planilha não pode ser editada no programa. Ela apresenta os valores em coordenadas relativas ao UCS utilizado para a locação da malha.

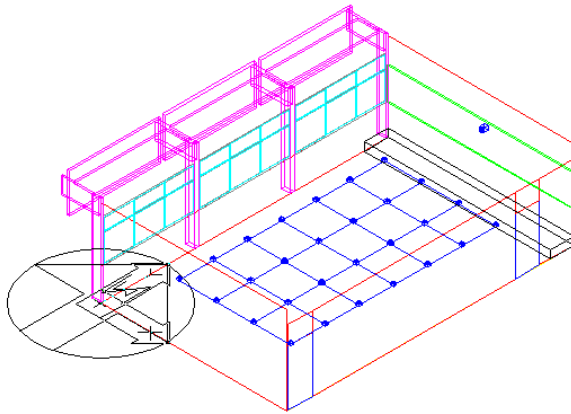


Figura 3. Malha de pontos situada no plano de trabalho.

X-Position	Y-Position	Z-Position	Value
1.400000	9.260000	0.700100	272
2.800000	9.260000	0.700100	231
4.200000	9.260000	0.700100	202
5.600000	9.260000	0.700100	158
1.400000	7.973333	0.700100	299
2.800000	7.973333	0.700100	257
4.200000	7.973333	0.700100	228
5.600000	7.973333	0.700100	177

Figura 4. Planilha dos resultados de iluminância obtidos através da malha de pontos.

A opção "câmera" gera uma renderização no ambiente Windows. Nessa janela pode-se especificar novos parâmetros, aumentar a resolução da imagem e escolher novas perspectivas, que poderão ser salvas em formato \*.jpg, \*.bmp ou \*.pic. Este último formato é reconhecido pelo *Image Analyzer* e permite a análise da imagem, onde é possível aplicar um filtro que simula a sensibilidade humana à imagem, bem como obter as isolíneas.

### 5.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO

Os resultados obtidos através da simulação no Desktop Radiance são comparados com valores medidos *in loco* através de luxímetros portáteis, marca Minipa, modelo MLM 1332.

#### 5.3.1. Iluminação Natural

A simulação de iluminação natural propicia a visualização dos efeitos da entrada de luz difusa e direta em ambientes internos ao longo do ano em um processo relativamente rápido, que permite a verificação da adequação do dimensionamento e localização de aberturas, os efeitos do uso de materiais, texturas e cores na iluminância e na distribuição de luz nos ambientes. (SOUZA et al., 2001)

A sala de aula CTC 208 foi simulada para três dias de dois diferentes meses do ano: janeiro e junho, representando o inverno e o verão, respectivamente. Em cinco horários distintos: 8h, 10h, 12h, 14h e 16h. Para cada dia e horário específico simulou-se o céu em três condições distintas: céu limpo, parcialmente encoberto e encoberto.

Os resultados obtidos pelo programa para a sala de aula com brises são comparados com as medições realizadas por GHISI (1997) no verão e no inverno. As medições dos níveis de iluminação natural no verão ocorreram durante os dias 15,16 e 17 de janeiro. E no inverno foram realizadas em três dias 7,14 e 21 de junho.

Duas situações são simuladas para a sala de aula 208: na primeira situação o ambiente conta com a utilização das proteções solares; a segunda simulação não utiliza essas proteções, existentes no local. O objetivo de simular as duas alternativas para o ambiente é avaliar a eficiência das proteções solares.

### ***5.3.2. Sistema de Iluminação Artificial***

Os resultados apresentados são da simulação de um único tipo de luminária, que mais se aproxima da luminária utilizada no ambiente.

Os valores obtidos de iluminância na sala de aula 106 são comparados àqueles medidos por MATOS (2001). A medição dos níveis de iluminação artificial foram realizadas no ambiente logo após a instalação do sistema. Foi realizada uma malha de 25 pontos com afastamento de 1,43m da janela e 1,00m da lousa. As medidas são obtidas em um único dia de setembro, às 21 horas a 80 cm do piso (plano de trabalho). O equipamento utilizado é um luxímetro digital portátil.

---

## 6. RESULTADOS

### 6.1. DESCRIÇÃO DO AMBIENTE

Os ambientes simulados são as salas de aula números 106 e 208 localizadas no bloco B do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Estes ambientes foram escolhidos devido às medições *in loco* disponíveis.

As características físicas da sala 208 são descritas abaixo:

- comprimento = 10,80 metros;
- largura = 7,00 metros;
- pé-direito = 2,80 metros;
- altura do plano de trabalho = 0,80 metros;
- altura de suspensão das luminárias = nula (luminária fixada diretamente no teto);
- orientação da parede com aberturas: oeste;
- refletâncias: teto = 54%, parede = 38% e piso = 59%.

Características físicas da sala 106:

- comprimento = 7,15 metros;
- largura = 7,15 metros;
- pé-direito = 3,05 metros;
- altura do plano de trabalho = 0,80 metros;
- altura de suspensão das luminárias = nula (luminária fixada diretamente no teto);
- orientação da parede com aberturas: oeste;
- refletâncias: teto = 80%, parede = 20% e piso = 72%.

### 6.2. SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

A sala de aula 208 possui luminárias modelo TMS 500 da Philips utilizadas no retrofit proposto pelo LabEEE, que não estão disponíveis na 1ª versão atual do programa. Esta sala de aula foi utilizada na validação do algoritmo desenvolvido por MARINOSKI (2002) devido às diferentes medições *in loco* disponíveis. A nova versão do programa *Desktop Radiance* permite a modelagem de luminárias. A partir do momento em que a luminária estiver pronta, este ambiente também deverá ser simulado em situação de iluminação artificial, comparando-se com os resultados obtidos por MARINOSKI (2002).

A simulação desse ambiente levou em consideração os brises existentes a fim de comparar-se os resultados obtidos com aqueles apresentados por GHISI (1997) em sua dissertação de mestrado. Para verificar a eficiência das proteções solares, o ambiente também foi simulado na ausência dos brises.

A sala 106, ao contrário da sala 208, possui um tipo de luminária compatível com a encontrada no banco de dados do programa. Neste ambiente foram realizadas medições em situação de iluminação artificial. A Figura 5 apresenta a distribuição das luminárias na sala de aula 106. O sistema de iluminação é composto por 9 luminárias sem refletor e sem aletas e 2 lâmpadas de 32W T8 (modelo TLO 64RS32W). O acionamento do sistema não leva em consideração a iluminação natural.

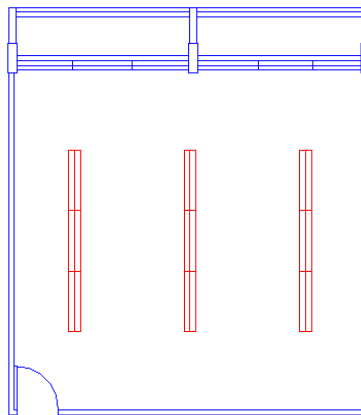


Figura 5. Posicionamento das luminárias na sala de aula 106 do Centro Tecnológico.

As Figuras 6 e 7 apresentam os modelos criados no programa AutoCAD. A primeira figura apresenta a sala de aula 106, que foi simulada na situação de iluminação artificial. A Figura 7 apresenta a sala de aula 208 com a presença das proteções solares e corretamente orientada. Neste ambiente foi simulada a situação de iluminação natural.

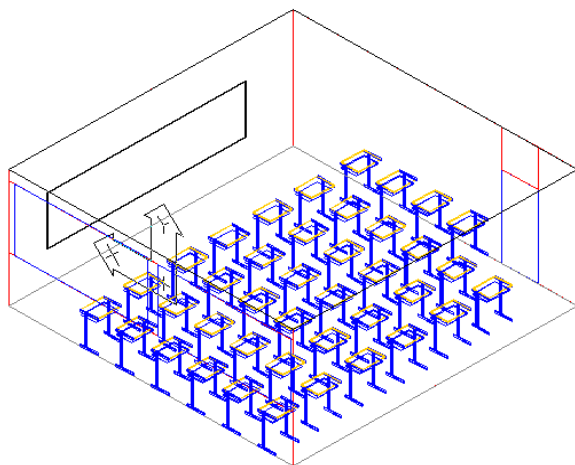


Figura 6. Modelo 3D da sala de aula 106.

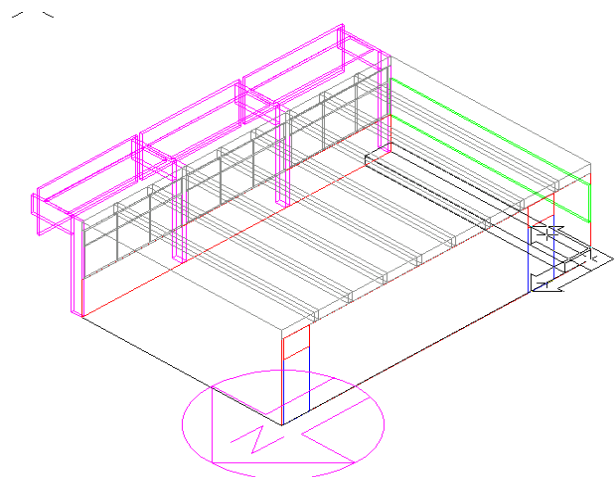


Figura 7. Modelo 3D da sala de aula 208.

### 6.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO

A Tabela 1 apresenta o tipo e as características físicas dos materiais que compõem as superfícies das salas de aula e apresenta os valores de refletância utilizados na simulação. Os valores de refletância média para as superfícies do ambiente foram obtidos por GHISI (1997) e MATOS (2003), através da utilização do método do papel branco.

Tabela 1. Características das superfícies dos ambientes.

Superfície	Material	Cor	Refletância (%)		Transmitância (%)	Especularidade (%)	Rugosidade (%)	
			Média	Simulada				
Sala 208	teto	concreto	natural	54.0	54.1	0.0	0.00	0.00
	parede	tijolo aparente	natural	38.0	37.8	0.0	0.00	0.00
	piso	concreto	pintura clara	59.0	58.4	0.0	0.00	0.00
	lousa	concreto	verde escuro	23.9	24.7	0.0	0.00	0.00
	janela	alumínio	cinza	-	79.0	0.0	50.00	10.00
	vidro	5.71mm	transparente	-	8.0	88.3	0.00	0.00
	porta	madeira	azul escuro	-	13.0	0.0	6.70	20.00
Sala 106	teto	concreto	branco	80.0	85.8	0.0	0.0	0.0
	parede	tijolo aparente	natural	20.1	20.1	0.0	33.3	15.0
	piso	cerâmica	cinza claro	72.0	72.4	0.0	75.0	10.0
	lousa	fórmica	branco	80.0	80.0	0.0	10.0	0.5
	janela	alumínio	cinza	72.0	72.0	0.0	50.0	10.0
	vidro	5.71mm	-	-	8.0	88.3	0.0	0.0
	porta	madeira	azul escuro	13.0	13.0	0.0	6.7	20.0
carteiras	fórmica	bege	65.8	65.8	0.0	10.0	0.0	

### 6.3.1. Iluminação Natural

Para simular a iluminação natural do ambiente o programa utiliza os dados do local onde este se encontra. Os dados utilizados para Florianópolis foram:

- Latitude: 27°40' Sul;
- Longitude: 48°33' Oeste;
- Hora Local: -3.00;
- Fuso Horário: -48°;

A Figura 8 apresenta a localização da sala de aula no bloco B do CTC. O ambiente possui orientação oeste e para evitar a radiação direta nas fachadas que recebem insolação direta o prédio foi projetado com elementos de controle e redirecionamento da luz solar.

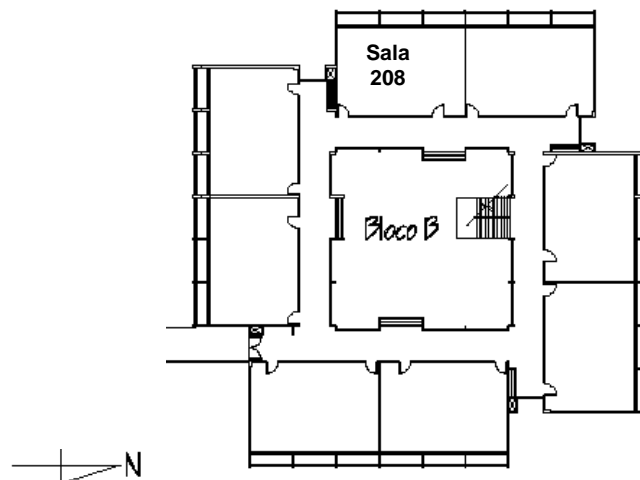


Figura 8. Localização da sala de aula 208, no bloco B do Centro Tecnológico.  
(Fonte: GHISI,1997)

A Figura 9 apresenta a vista externa da sala de aula CTC 208. Quando foram realizadas as medições dos níveis de iluminação no ambiente, as árvores não se apresentavam como fatores de obstrução para a passagem de luz natural. A sala de aula também não possuía cortinas. A cor do teto era cinza e não branca, como pode-se observar na Figura 10, que apresenta uma perspectiva da sala de aula.



Figura 9. Vista externa da sala de aula CTC 208.



Figura 10. Vista interna da sala de aula CTC 208.

Durante as medições de GHISI (1997) o céu mostrou-se bastante variável com momentos de sol encoberto, momentos de muitas nuvens e sol aparente e momentos de céu claro. Analisando-se os dados encontrados nas simulações optou-se por escolher o tipo de céu claro para a validação do modelo. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 11.

Nos dias de verão (janeiro) percebe-se que a tendência da curva simulada é decrescer com o passar do tempo, enquanto que os valores medidos aumentam. As diferenças mais críticas são observadas a partir das 14 horas. A tendência de diminuição da luminosidade com relação ao afastamento da janela foi bem representada pelo programa.

Os valores de iluminância encontrados pelo programa para os dias de junho são muito próximos àqueles apresentados por GHISI (1997). Às 14 horas ocorre uma diferença de 243% entre os valores medidos e simulados para o afastamento de 1,40m e 99% para 2,80m. Essas são as únicas diferenças significativas encontradas durante a simulação no inverno (junho).

Os níveis de iluminação vão reduzindo gradativamente à medida em que ocorre o afastamento da janela. Esta redução chega a 115% no mês de janeiro e 250% no mês de junho, se comparados os pontos limites da malha em questão. Estas diferenças poderiam ser minimizadas se tivesse sido instalado no ambiente *light shelves*, ou prateleiras de luz, a exemplo do prédio da Engenharia Civil que foi construído com conceitos de eficiência energética. Estes elementos proporcionam ao ambiente iluminação uniforme, tornando-o mais agradável.



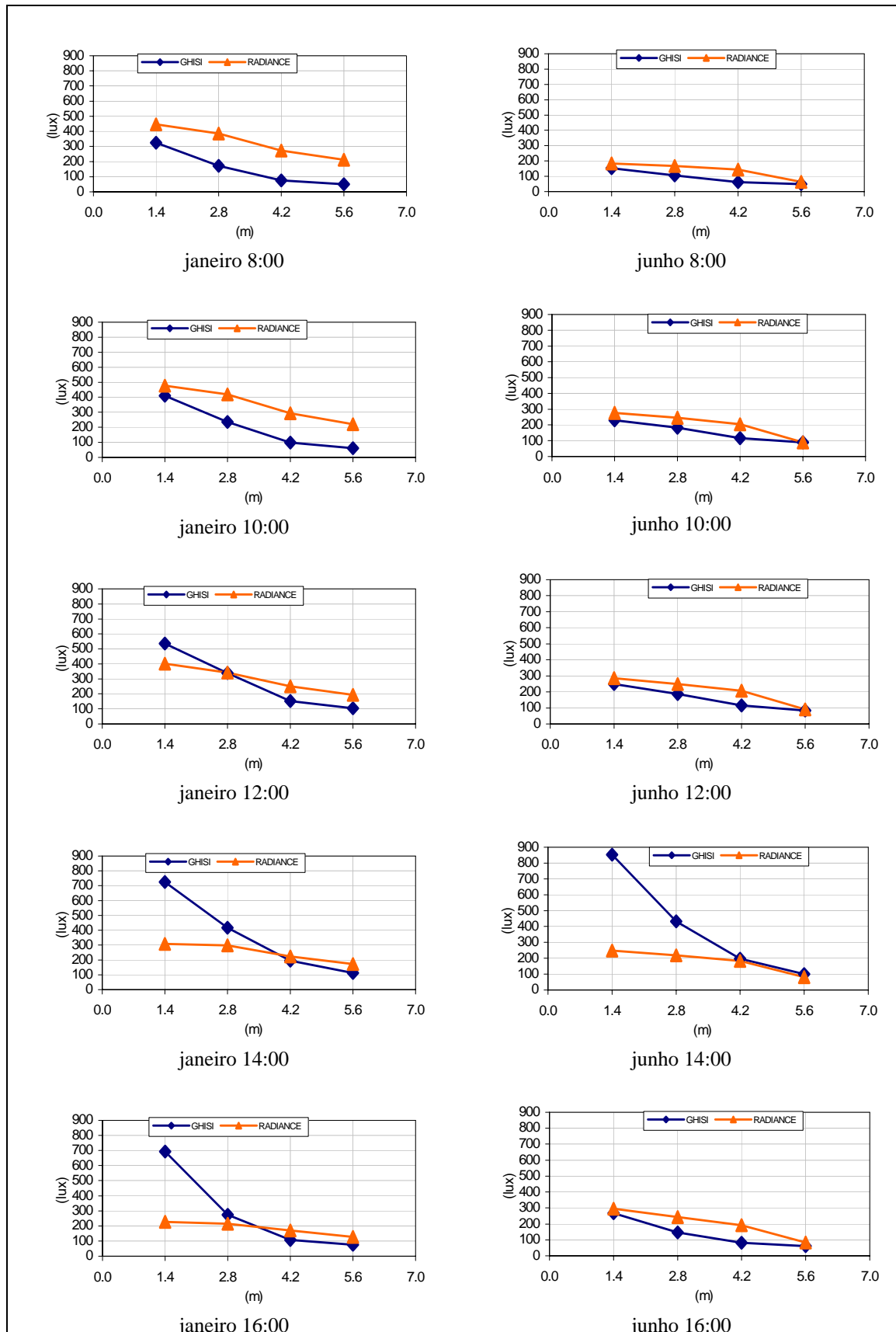


Figura 11. Gráficos comparativos entre os valores medidos e simulados.



Foram escolhidas duas imagens para mostrar o aspecto do ambiente simulado pelo programa. Elas são apresentadas na Figura 12. Uma imagem é do dia 15 de janeiro e outra do dia 14 de junho, ambas simuladas às 8 horas. As imagens relativas aos outros horários podem ser vistas acessando o endereço [www.labeee.ufsc.br](http://www.labeee.ufsc.br).

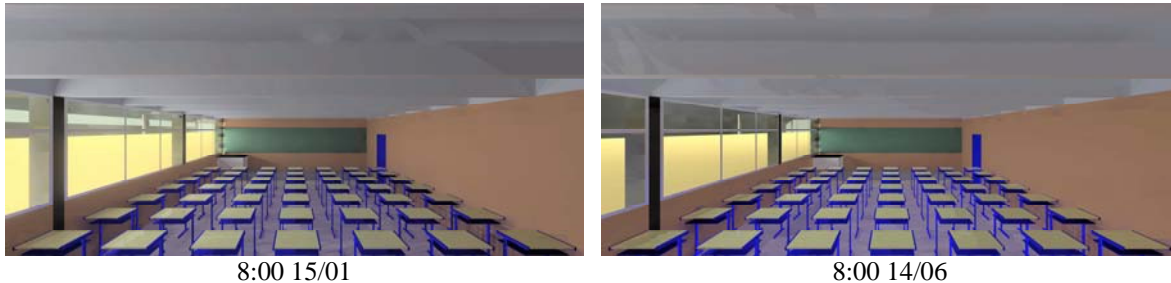


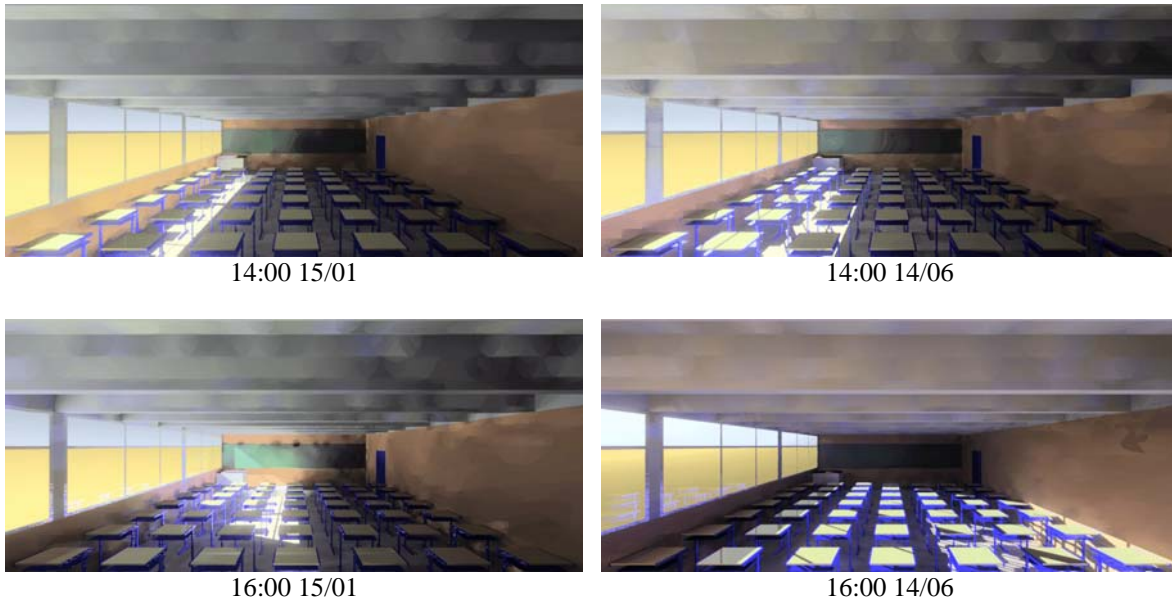
Figura 12. Simulações da sala de aula 208 para janeiro e junho.

Com o objetivo de avaliar a eficiência das proteções solares a sala de aula 208 foi simulada sem a utilização de brises. Os resultados obtidos pelo programa para as duas alternativas propostas, sem brises e com brises, são apresentados na Figura 13 e na Figura 15.

Sem brises						Com brises					
X	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	X	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00
1.4	967	860	497	754	10883	1.4	525	497	371	327	288
2.8	728	672	410	567	527	2.8	431	432	338	303	248
4.2	480	454	297	392	398	4.2	297	302	248	223	182
5.6	349	334	225	263	271	5.6	228	229	193	173	143
14/01						14/01					
X	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	X	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00
1.4	799	610	603	941	11078	1.4	464	465	419	300	196
2.8	675	512	427	610	643	2.8	402	413	344	292	197
4.2	462	365	292	422	461	4.2	284	290	251	222	165
5.6	339	271	221	275	316	5.6	220	217	194	173	120
15/01						15/01					
X	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	X	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00
1.4	790	865	495	850	16124	1.4	348	469	417	300	197
2.8	656	674	413	567	585	2.8	322	415	343	302	197
4.2	451	455	296	408	413	4.2	240	290	252	223	165
5.6	331	335	226	263	269	5.6	187	218	194	174	121
16/01						16/01					
X	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	X	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00
1.4	852	778	532	848	12695	1.4	446	477	402	309	227
2.8	687	620	417	582	585	2.8	385	420	342	299	214
4.2	464	424	295	407	424	4.2	274	294	250	223	171
5.6	340	313	224	267	285	5.6	212	221	193	173	128
Média						Média					

Figura 13. Valores de iluminação simulados para o ambiente no verão sem brises (esquerda) e com brises (direita).

Durante o verão os valores de iluminância média no ambiente sem brise são relativamente moderados, apresentando radiação solar direta apenas às 14 horas nos locais próximos à janela sem brises e às 16 horas em algumas partes da sala, como pode ser observado na Figura 14. O valor máximo encontrado é de 16.000 lux. Com a utilização das proteções solares não foi detectada em nenhum horário a incidência de radiação solar direta.



**Figura 14. Simulações da sala de aula 208 sem brises para janeiro e junho.**

Nas simulações do ambiente sem brises para o mês de junho, os horários que apresentaram radiação solar direta foram: às 14 horas próximo à janela, com iluminância média máxima de 28.000 lux e às 16 horas em toda a sala de aula. Quando são utilizadas as proteções solares, apenas às 16 horas, a 2,80m da janela, ocorre a incidência de radiação solar direta no plano de trabalho.

Sem brises						Com brises					
X	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	X	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00
1.4	520	650	749	28339	1078	1.4	276	364	370	352	418
2.8	424	521	550	836	5828	2.8	249	328	314	312	6026
4.2	294	359	368	524	5619	4.2	178	228	224	223	224
5.6	217	262	266	338	5386	5.6	140	176	174	172	172
7/06						7/06					
X	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	X	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00
1.4	680	727	623	27827	1038	1.4	224	392	442	329	394
2.8	488	556	486	790	7653	2.8	209	359	374	282	7010
4.2	320	375	333	496	4564	4.2	156	251	260	201	1169
5.6	233	272	245	323	5301	5.6	126	192	196	153	160
14/06						14/06					
X	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	X	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00
1.4	525	769	871	27778	1089	1.4	204	346	365	342	433
2.8	426	586	584	836	7855	2.8	188	302	310	264	7193
4.2	293	394	379	528	5638	4.2	144	215	222	194	1200
5.6	215	284	267	348	4450	5.6	116	167	171	153	168
21/06						21/06					
X	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00		8:00	10:00	12:00	14:00	16:00
1.4	575	715	748	27981	1069	1.4	184	277	285	248	2047
2.8	446	554	540	821	7112	2.8	167	246	250	217	2591
4.2	302	376	360	516	5274	4.2	143	205	208	183	515
5.6	222	273	259	336	5046	5.6	64	89	90	80	84
Média						Média					

Figura 15. Valores de iluminância simulados para o ambiente no inverno sem brises (esquerda) e com brises (direita).

Em alguns pontos a iluminância obtida com a iluminação natural é muito próxima aos valores de iluminância recomendados pela ABNT que devem ser adotados nos projetos luminotécnicos para as salas de aula UFSC, 300 lux ao final do período de manutenção de 24 meses. A setorização dos circuitos elétricos permitiria o aproveitamento da iluminação natural, desligando-se as lâmpadas próximas às janelas.

As proteções solares utilizadas no CTC protegem o ambiente da radiação solar direta nos horários mais críticos, 14 e 16 horas, mas impedem a entrada da luz natural nos outros horários que não apresentam essa radiação. Outro tipo de proteção solar, como as prateleiras de luz, poderia ser instalado de forma a redirecionar a luz natural para o interior das salas. Um novo projeto de sistema de iluminação com novos circuitos de forma a desligar as luminárias situadas próximas às janelas possibilitaria uma redução no consumo de energia elétrica.

### 6.3.2. Sistema de Iluminação Artificial

A versão 1.02beta do *Desktop Radiance*, restringe as luminárias que podem ser adicionadas ao modelo, àquelas listadas na biblioteca do programa. Para simular o ambiente nas condições de iluminação artificial foi utilizada a luminária que mais se aproximava da realidade.

A Figura 16 apresenta o tipo de luminária instalada no ambiente. A luminária utilizada na simulação é mostrada na Figura 17, ambas sem refletor e sem aletas, com 2 lâmpadas de 32W.

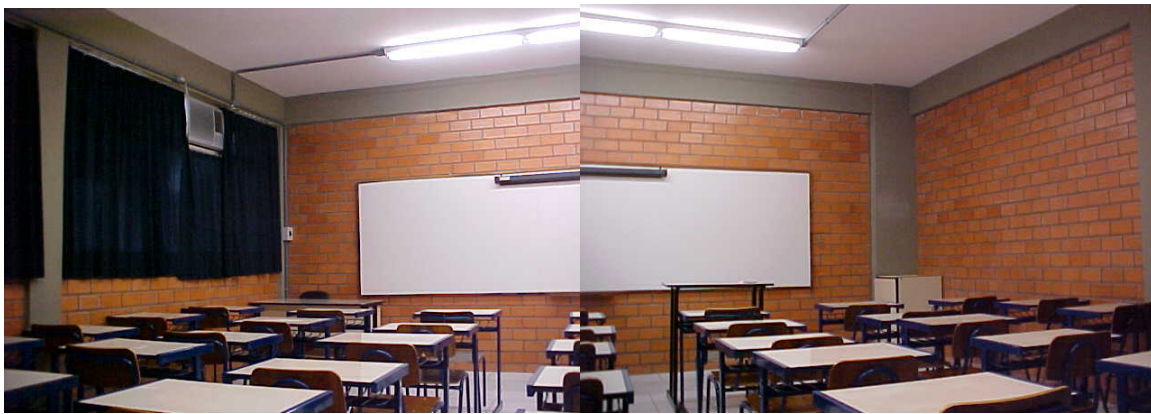


**Figura 16.** Luminária instalada no ambiente.



**Figura 17.** Luminária utilizada na simulação.

O ambiente analisado é mostrado na Figura 18. Quando ocorreram as medições na sala de aula, em 2001, esta não apresentava cortinas nem condicionadores de ar. A Figura 19 apresenta o aspecto da sala de aula simulada no *Desktop Radiance*, com aplicação de filtros que representam a sensibilidade humana à iluminância.



**Figura 18.** Sala de aula 106 do bloco B do CTC.



Figura 19. Aspecto da sala de aula simulada após a utilização do filtro *Human Sensitivity*.

Para simular e calcular a iluminância no modelo, o programa tem uma função chamada *Irradiance*. Quando selecionado este comando, a refletância dos materiais não é levada em conta. O total de luz que chega a cada superfície no modelo é medido e mostrado. A aparência do ambiente gerada dessa forma é mostrada na Figura 20.



Figura 20. Aparência do ambiente para simulação da iluminância em cada superfície.

A Figura 21 apresenta os valores de iluminância obtidos em cada ponto da malha através da medição. O valor da iluminância média sobre o plano de trabalho foi de 391 lux. O resultado obtido na simulação está representado na Figura 22. O valor de iluminância média estimado para esse ambiente foi de 438lux.

		Lousa				
Janelas	Y	208	396	470	411	184
		256	466	549	465	250
		223	516	645	535	262
		250	487	626	494	238
		236	428	530	439	207
		X				

Figura 21. Valores de iluminância (lux) obtidos através de medição.

		Lousa				
Janelas	Y	239	498	611	495	247
		271	517	640	522	287
		306	607	755	609	317
		264	499	618	506	276
		223	436	543	440	232
		X				

Figura 22. Valores de iluminância (lux) obtidos através de simulação.



O sistema de iluminação está mal dimensionado, propiciando níveis de iluminação altos na região central da sala e valores de iluminância abaixo dos 300 lux, propostos pelo LabEEE (2002) no documento: Recomendações para projetos de sistemas de iluminação de ambientes internos da UFSC, ao final do período de manutenção de 24 meses.

A média dos valores simulados para a iluminação artificial superou em 12% a média dos valores medidos, com diferença máxima de 37% em um dos pontos. Analisando-se a Figura 23, percebe-se que as maiores diferenças ocorrem na parte da sala de aula mais próxima da lousa.

		Lousa				
Janelas	Y	15%	26%	30%	20%	34%
		6%	11%	17%	12%	15%
		37%	18%	17%	14%	21%
		6%	2%	1%	2%	16%
		6%	2%	2%	0%	12%
		X				

Figura 23. Diferenças percentuais entre os valores medidos e simulados.

A partir dos valores de iluminância média podem ser criadas curvas com pontos de mesma intensidade luminosa, chamadas isolux. As curvas isolux para o ambiente estão apresentadas na Figura 24.

Como foi citado anteriormente, as diferenças significativas nos níveis de iluminância ocorrem na região próxima ao quadro. Esta diferença pode ser atribuída a um superdimensionamento da specularidade do material, visto que esta grandeza foi estimada. A lousa pode ter sido considerada um elemento muito menos difuso do que é na realidade. A semelhança nas outras partes do gráfico, demonstra que as paredes foram bem representadas, em se tratando de uma superfície não homogênea. Os elementos que constituem a parede de tijolo à vista apresentam colorações variadas. Além disso, o rejunte entre eles também dificulta a obtenção da refletância desta superfície.

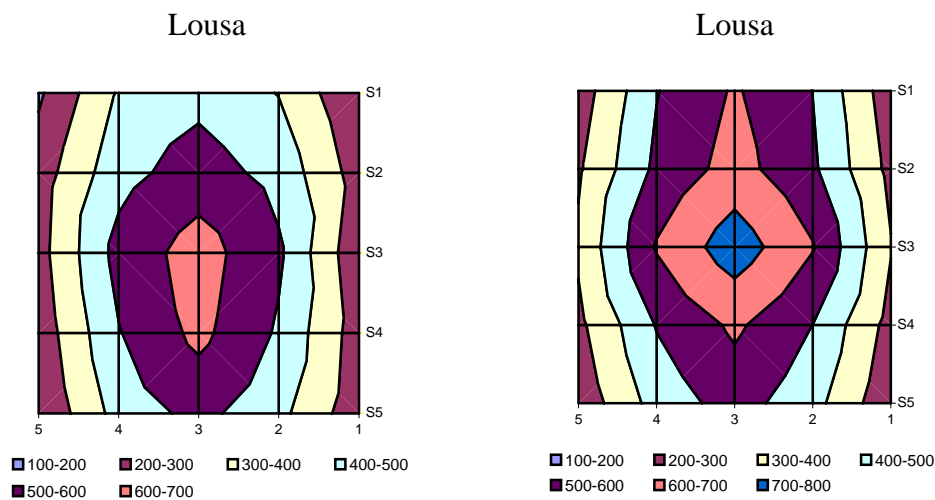


Figura 24. Curvas isolux para o ambiente. Valores medidos (esquerda) e simulados (direita).

As curvas isolux apresentadas pelo programa são mostradas na Figura 25. Na maior parte do plano de trabalho os valores encontram-se entre 350 e 650 lux. O valor máximo calculado é de 817 lux e o mínimo de 124 lux.

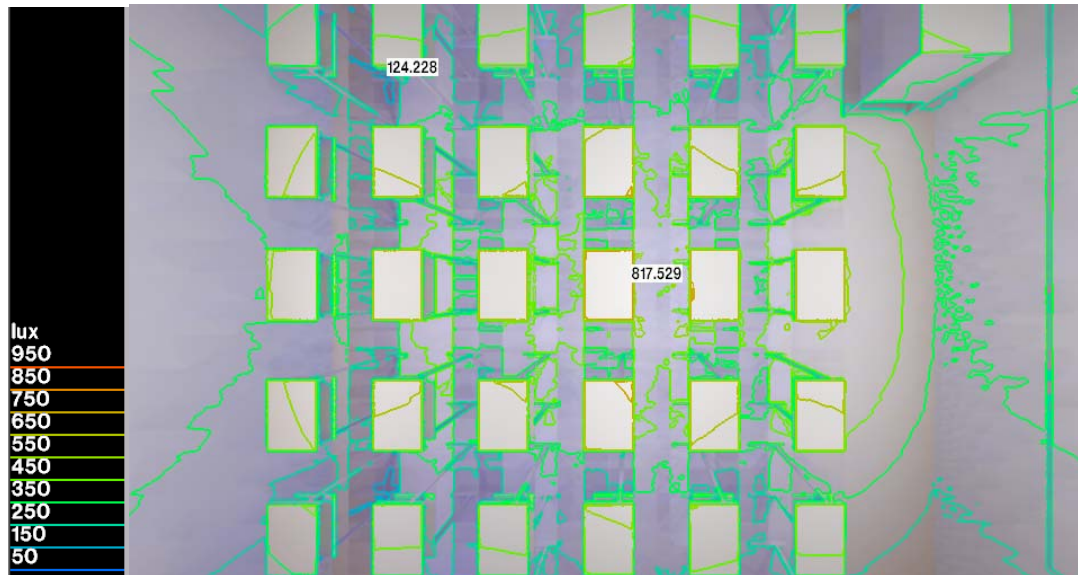


Figura 25. Curvas Isolux.

Uma alternativa para melhorar o desempenho do sistema de iluminação da sala de aula seria modificar a refletância das paredes, ou seja, considerando-as com pintura na cor branca ao invés de serem de tijolo aparente. Esta é uma solução prática e viável para o ambiente pois não acarretaria em mudanças no sistema de iluminação.

A Figura 26 apresenta os valores de iluminância, calculados pelo *Radiance*, para a sala de aula 106 considerando-se as paredes com uma refletância de 85,77% (cor branca). Na Figura 27 observa-se a diferença percentual entre cada valor de iluminância simulado para o caso base e considerando as paredes brancas. As maiores diferenças concentram-se na área próxima à parede direita. O lado oposto não apresenta diferenças tão gritantes pois ali encontram-se as janelas, que ocupam uma grande área da parede. E com relação a parede na qual se encontra a lousa, o aumento na iluminância na realidade poderia ser maior, mas devido ao superdimensionamento da specularidade do material, o resultado ficou comprometido.

		Lousa				
Janelas	Y	336	595	720	618	422
		356	610	747	651	454
		397	700	851	737	485
		353	607	738	640	433
		339	592	721	620	403
					X	

Figura 26. Valores de iluminância para a sala de aula com paredes brancas.

		Lousa				
Janelas	Y	40%	19%	18%	25%	71%
		31%	18%	17%	25%	58%
		30%	15%	13%	21%	53%
		34%	22%	19%	27%	57%
		52%	36%	33%	41%	74%
					X	

Figura 27. Aumento percentual entre o caso base e o simulado com paredes brancas.

A Tabela 2 apresenta os valores de iluminância média, mínima e máxima das duas alternativas simuladas no *Desktop Radiance*, bem como os valores medidos *in loco*. Alterando – se a refletância das paredes de 20,10% para 85,8%, a iluminância média obtida para o ambiente foi 29% superior, possibilitando uma economia com a retirada de lâmpadas desnecessárias e mantendo-se níveis de iluminação adequados.

Tabela 2. Valores de iluminância média, mínima e máxima simulados e medidos.

Iluminância	(lux)			Variação da média (%)
	Média	Mínima	Máxima	
MEDIÇÃO 2001	391	184	645	-
CASO BASE	438	223	755	12
PAREDES BRANCAS	565	336	851	29

A diferença entre os resultados obtidos através da simulação e os valores medidos *in loco* pode ser atribuída a três fatores:

1. A refletância e a especularidade de algumas superfícies podem estar mal representadas.
2. Imprecisões ocorridas durante as medições dos níveis de iluminação.
3. O fluxo luminoso real da lâmpada pode não corresponder ao nominal.

Obter a refletância e especularidade dos materiais, por métodos precisos minimiza as imprecisões da simulação. Além disso, é necessário possuir os arquivos fotométricos digitais das luminárias reais. Comparando-os com as oferecidas pelo programa.

#### 6.4. MODELAGEM DA LUMINÁRIA

Em 2001 foi instaurado no campus universitário o PRUEN, Programa de Racionalização do Uso de Energia Elétrica na UFSC, que tem por objetivo a redução do consumo e gastos com energia elétrica na universidade, buscando alternativas e soluções viáveis.

As especificações técnicas do sistema de iluminação proposto pelo LabEEE para o *retrofit* e contratação de novos projetos prevê a utilização de luminárias com refletores de alumínio de alta pureza, 2 lâmpadas de 32 W (Figura 29) e reator com alto fator de potência; setorização dos circuitos elétricos permitindo o aproveitamento da iluminação natural; e a adequação dos níveis de iluminação para 300lux nas salas de aula e 400lux



nas salas administrativas e de professores, ao final do período de manutenção de 24 meses.

Segundo MATOS et al (2003) a substituição do sistema ineficiente atualmente instalado nas salas de aula, administrativas e de professores da UFSC, pelo sistema proposto proporcionaria uma redução de 10,2% no consumo e 14,8% na conta de energia elétrica do campus universitário. Se todo o sistema de iluminação da UFSC fosse assim atualizado tecnologicamente, a redução de 10,2% sobre os 63% consumidos com iluminação proporcionaria uma economia anual de 29,9% no consumo de energia elétrica da Cidade Universitária.

A luminária utilizada para verificar a qualidade lumínica das alternativas de *retrofit* propostas pelo LabEEE para edificações do campus da UFSC não se encontra disponível na atual versão do *Desktop Radiance*. Mas a versão 2.0beta permite a modelagem de luminárias, a partir de um desenho em 3 dimensões e do arquivo fotométrico digital no formato IES.

O desenho da luminária está concluído, como pode ser visto na Figura 28 e já foram iniciadas as pesquisas para a obtenção de curvas fotométricas, em arquivo digital, no formato IES.

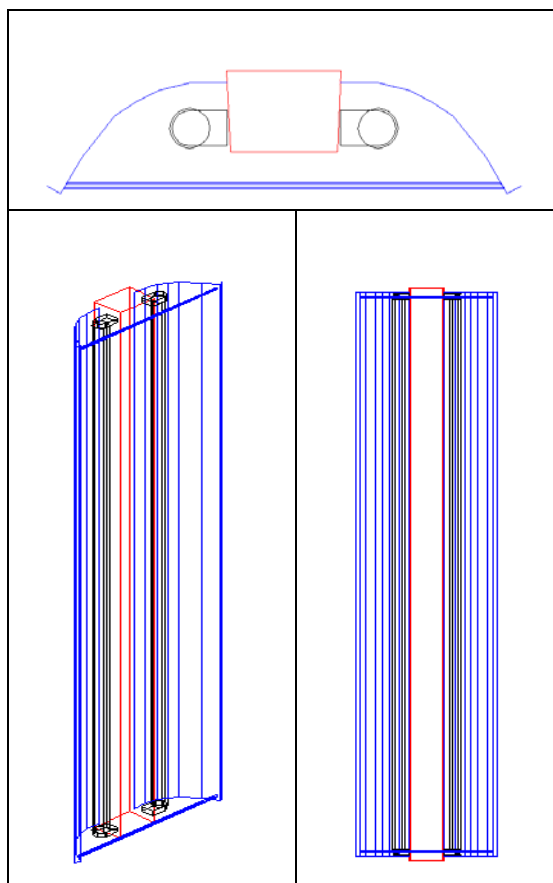


Figura 28. Desenho da luminária TMS 500.

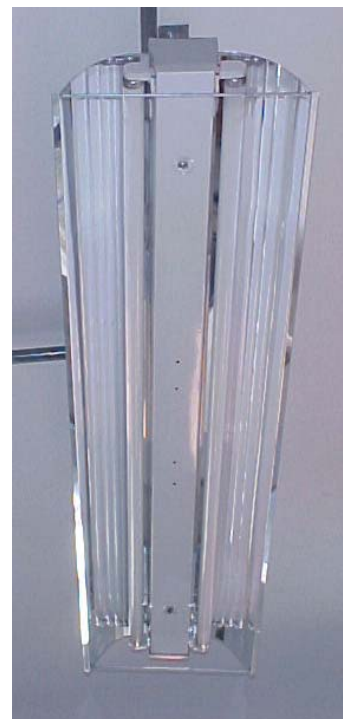


Figura 29. Luminária TMS 500 e lâmpadas de 32W.

## 7. CONCLUSÕES

A realidade criada por computadores e programas específicos facilita amplamente os complicados cálculos de iluminação. Os custos pertinentes a uma simulação são ínfimos se comparados aos benefícios advindos da sua utilização.

As simulações computacionais são uma excelente ferramenta de projeto, porém é válido lembrar que ter o conhecimento e controle do programa é fundamental para o sucesso dos resultados.

No caso específico, a ausência de luminárias e impossibilidade de inserir um modelo personalizado se constitui no principal fator limitante da simulação no *Desktop Radiance* (versão 1.02 beta).

A versão 2.0 beta permite a criação de luminárias desde que se tenha em mãos a curva fotométrica digital e o modelo em 3 dimensões da mesma. Esta versão será explorada para que se possa simular as salas nas quais foram executadas as alternativas de *retrofit* propostas pelo LabEEE para edificações do campus da UFSC.

A dificuldade em encontrar artigos que dissertassem sobre a utilização do *Desktop Radiance* tornou o estudo sobre o programa mais demorado, visto que o manual é pouco didático, destinando-se apenas a apresentar os comandos. Outra dificuldade detectada é que o *Desktop Radiance* não gera relatórios com os resultados obtidos. Ao invés disso gera planilhas que não podem ser editadas no próprio programa.

A média dos valores simulados para a iluminação artificial superou em 12% a média dos valores medidos, com diferença máxima de 37% em um dos pontos. Alterando – se a refletância das paredes, de 20,10% para 85,77% (pintura branca), a iluminância média obtida para o ambiente foi 29% superior, possibilitando economia com a retirada de lâmpadas desnecessárias.

A diferença entre os valores simulados e medidos para a iluminação artificial é aceitável, comprovando a eficiência do software, mostrando-se confiável para uso em futuros estudos.

As proteções solares utilizadas na sala analisada protegem o ambiente da radiação solar direta nos horários mais críticos, mas impedem a entrada da luz natural nos outros horários que não apresentam essa radiação e poderiam apresentar níveis de iluminamento mais altos.

Recomenda-se um novo projeto prevendo a instalação de prateleiras de luz, a fim de redirecionar a luz natural, e novos circuitos de forma a desligar as luminárias situadas próximas às janelas, o que levaria a uma economia de energia elétrica. As novas proteções solares podem ser simuladas para o ambiente através do *Desktop Radiance*, avaliando a eficiência e economia proporcionadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABILUX (1992). **Uso Racional de Energia Elétrica em Edificação - Iluminação**. São Paulo, 1992.

GHISI, E. (1997). **Desenvolvimento de uma metodologia para retrofit em sistemas de iluminação: estudo de caso na Universidade Federal de Santa Catarina**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, agosto/97, 246 p.

GRAZIANO, JR.; SIGFRIDO, F. C. G. (2001). **Simulação computacional da iluminação natural em grandes edifícios**. In: VI ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, São Pedro, SP. *Anais*.

LABEEE (2002) **ANEXO D – Recomendações para projetos de sistemas de iluminação de ambientes internos da UFSC**. Florianópolis, 2002.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. (1997). **Eficiência Energética na Arquitetura**. São Paulo, 1997. Ed. PW. 188 p.

LBNL (2000). **Desktop Radiance: Quick-start Tutorial**. Lawrence Berkeley National Laboratory, Environmental Energy Technologies Division, Building Technologies Department.

LBNL (2002). **Desktop Radiance: User Manual**. Lawrence Berkeley National Laboratory, Environmental Energy Technologies Division, Building Technologies Department. Disponível em: <<http://radsite.lbl.gov/deskrad/intro.html>>

MARINOSKI, D. L. (2002). **Desenvolvimento de um algoritmo de cálculo luminotécnico para ambientes internos através do método ponto-a-ponto**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

MATOS, M. (2001). **Dados de medições de iluminância**. Arquivos do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

MATOS, M. (2003). **Estudo de melhoria no sistema de iluminação artificial da UFSC**. In: VII ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Curitiba, PR. *Anais*.

SOUZA, R. V. G.; KREMER, A.; MACÊDO, C. C.; CLARO, A. (2001). **Simulação de iluminação natural utilizando o lightscape: uma análise do desempenho frente a diferentes características de superfícies**. In: VI ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, São Pedro, SP. *Anais*.

SOUZA, A. C.; ROHLER, E.; SPECK, H. J.; SILVA, J. C.; GÓMEZ, L. A. (2002). **AUTOCAD 2000 Guia prático para desenhos em 3D**. Florianópolis, 2002. Ed. da UFSC. 341 p.

---

*Michele Matos*

PEREIRA, F. O. R.; SOUZA, M. B. (2001). **Conforto Ambiental - Iluminação**. Apostila do Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2001. 114p.

PHILIPS (1996). **Luminárias**. São Paulo

PHILIPS (1986). **Manual de Iluminação**. 3ª edição. Holanda

---