

DESIGN DE ILUMINAÇÃO

António C. Costa ^{1,2}

A. Augusto Sousa ^{2,3}

F. Nunes Ferreira ^{2,3}

¹ DEI-ISEP-IPP, Rua S. Tomé s/n, 4200 Porto, Portugal

² INESC, Pr. Mompilher 22, Apt. 4433, 4007 Porto CODEX, Portugal

³ FEUP, R. dos Bragas, 4099 Porto CODEX, Portugal

Sumário

Este artigo descreve uma nova abordagem do design de iluminação. Devido à complexidade da iluminação global, os métodos empregues pelos especialistas em design de iluminação são essencialmente empíricos e não levam em conta os detalhes físicos da situação, além de não permitirem uma abordagem interactiva. Usando como motor de cálculo um programa de simulação de iluminação global, descreve-se um novo método destinado a auxiliar o processo de design de iluminação em ambientes tridimensionais, bem caracterizados do ponto de vista radiométrico. A partir de objectivos radiométricos a atingir, calcula-se a “iluminação inversa” que estes implicam, obtêm-se ajudas para a determinação das luminárias reais e/ou assinalam-se as incompatibilidades ou conflitos entre os objectivos e a cena. Este processo é semi-automático e permite alterar vários parâmetros, reaproveitando-se os cálculos efectuados.

Palavras chave: Design de Iluminação, Iluminação global, Interacção

0. Introdução

Neste trabalho, descreve-se uma nova abordagem que, de uma forma semi-automática, resolve o problema de determinar as luminárias de uma cena dados a geometria, os materiais e objectivos do design de iluminação (problema inverso), utilizando como base de trabalho um programa de simulação de iluminação global que resolve aproximadamente o problema de calcular a iluminação de uma cena dados a geometria, os materiais e as luminárias (problema directo).

A forma generalizada do problema da iluminação global é muito complexa. Uma abordagem generalizada tem de considerar como é que a luz reflectida em qualquer direcção a partir de um ponto afecta a luz reflectida em todas as direcções em todos os outros pontos da cena. É um problema multi-dimensional e de natureza integral, ie, a informação das fontes de luz é processada, nas várias dimensões do problema, por toda a cena. A abordagem inversa apresenta dificuldades acrescidas, dado que pode haver incompatibilidades entre a geometria, os materiais e os objectivos de iluminação. As incompatibilidades podem ser ultrapassadas através de modificações de geometria, materiais ou de objectivos. Esta particularidade não deve ser encarada como desvantajosa, mas pelo contrário, como um aspecto positivo, dado que, para muitas situações de design, pode evitar rapidamente a pesquisa de soluções “impossíveis” (físicas ou arquitectónicas).

Na secção 1 descreve-se a motivação que originou este trabalho. Uma descrição sucinta e algumas bases matemáticas são apresentadas na secção 2. A implementação é abordada na secção 3. A secção 4 apresenta resultados para duas situações de teste. A conclusão surge na secção 5, sendo discutidas algumas perspectivas futuras na secção 6.

1. Motivação

É cada vez mais evidente que o design de iluminação se revela como sendo um tópico de investigação e exploração muito prometedora, na medida em que as necessidades concretas existem — os arquitectos, os engenheiros e os designers precisam de ferramentas de trabalho para definir, experimentar e garantir a “iluminação” dos seus projectos — e as soluções técnicas são escassas, limitadas e pouco interactivas.

Um dos aspectos mais importantes deste problema é o seu lado aparentemente paradoxal: qualquer especialista de iluminação consegue dizer, para uma dada cena (conhecendo-se vagamente a geometria e os atributos radiométricos das superfícies) que tipo de iluminação lhe parece mais conveniente, que aspectos deve evidenciar, etc. Construir uma ferramenta computacional que, utilizando essa informação que representa objectivos a atingir, determine os pontos de iluminação (luminárias) e as suas características é uma tarefa de elevada complexidade, caso se pretenda implementar uma ferramenta razoavelmente automática e geral para resolver esse problema.

Alguns aspectos importantes a considerar nessa ferramenta são o rigor e a exactidão radiométricos, ie, a informação gerada deve ser correcta, a fim de:

- não levar o designer para soluções impossíveis do ponto de vista físico
- aumentar ou manter o grau de confiança naquilo que está a ser feito
- permitir que trabalhe nos limites da sua capacidade criativa, ie, seja levado a explorar sem restrições.

1.1 Trabalho Relacionado

Em parte devido à grande complexidade da iluminação global, os métodos tipo Monte Carlo têm sido frequentemente usados na simulação de iluminação. Alguns novos algoritmos têm surgido, baseados em métodos de elementos finitos (EF), que tentam abordar a componente especular da iluminação global (EF com *clustering* e *wavelets*) [Chr97]. Só nos anos mais recentes é que surgiram algoritmos EF capazes de tratar a iluminação global na sua totalidade, capazes de processar mais do que alguns milhares de superfícies e com tratamento da componente especular, não gastando tempos de computação muito elevados.

O tema da iluminação inversa tem sido pouco abordado. O número de trabalhos desenvolvidos sobre este tema é bastante escasso e as abordagens são muito limitadas. Schoeneman *et al* [Sch93] definiram muito bem o interesse da simulação inversa da iluminação, mas resolveram o problema apenas parcialmente, limitando-o a situações em que o posicionamento e as distribuições de energia luminosa eram pré-definidas, ficando por calcular quais as luminárias que realmente emitiam, as suas cores e intensidades. Para o cálculo da solução, empregaram funções relacionadas com a radiância da superfície, usando

um algoritmo de radiosidade modificado, de modo a garantir permanentemente a validade física da simulação e dando ênfase à componente difusa da iluminação.

Outro trabalho interessante é o realizado por Kawai *et al* [Kaw93], também usando um algoritmo de radiosidade e ignorando a componente especular da iluminação global. O cálculo da solução permite obter, para cada luminária, a sua intensidade, cor e tipo de distribuição luminosa, assim como reflectâncias de elementos discretizados da geometria da cena.

Os espaços de trabalho são os ambientes mais frequentemente estudados em design de iluminação [Leu94] [Lup96]. A importância que por isso assumem justifica que sejam usados como exemplos de teste.

2. Descrição

A partir de uma geometria simplificada do espaço físico e de uma caracterização rigorosa dos materiais usados, o designer tem ao seu dispor a possibilidade de juntar elementos de iluminação “inversa”, de vários tipos, os quais, em conjunto com a geometria e os materiais, permitem ou não obter soluções de iluminação eminentemente qualitativas, as quais podem posteriormente ser confirmadas com uma abordagem directa da simulação da iluminação, a fim de se obterem dados quantitativos (Figura 1 - em 1a mostra-se a abordagem tradicional do design de iluminação; em 1b a nova abordagem proposta neste trabalho).

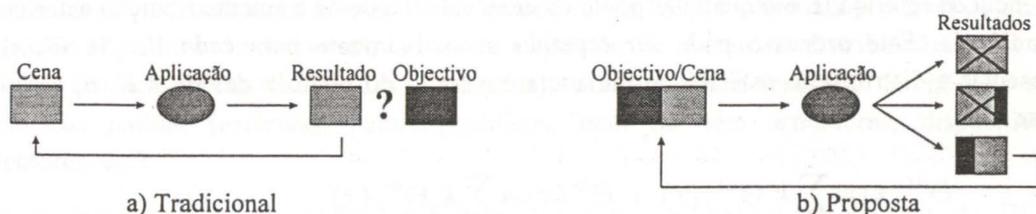


Fig. 1 - Abordagens do Design de Iluminação

Os elementos de iluminação “inversa” (as luminárias inversas — IL, por oposição às luminárias diretas convencionais — DL) são essencialmente restrições ou constringências à verdadeira iluminação do espaço físico e devem ser criteriosamente definidas e parametrizadas. No fundo, funcionam como emissores de importância no design da iluminação, mas deve ter-se em atenção que um conjunto de luminárias inversas pode fazer com que não exista nenhuma solução fisicamente correcta para uma determinada cena (definida pela sua geometria e materiais). A equação fundamental da iluminação global pode ser escrita da seguinte forma [Gla95]:

$$L(x, \vec{w}) = L^e(x, \vec{w}) + \int_{y \in S} f(\vec{w}_{xy}, x, \vec{w}) L(y, \vec{w}_{yx}) G(x, y) dy \quad (1)$$

Assume-se que se conhecem os materiais (a função $f(w_i, x, w_o)$ — BDF, função bidireccional de reflectância e transmitância) e toda a geometria da cena não relacionada com as luminárias (a função de visibilidade $G(x, y)$).

Na nossa abordagem, as incógnitas são as luminárias $L^e(x,w)$ e a radiância $L(x,w)$, começando a sua determinação através das distribuições inversas de radiância, geradas pelas IL's. O facto do princípio da sobreposição se poder aplicar aos casos mais frequentes de iluminação no mundo real permite decompor o problema em vários subproblemas inversos e tentar, a partir destes, reunir o conhecimento necessário e/ou suficiente para ajudar na procura da solução global.

A maior dificuldade reside em conhecer $L(x,w)$ sem se saber quais são as luminárias reais (as DL's). Se existir uma boa estimativa de $L(x,w)$, então determinar $L^e(x,w)$ reduz as dificuldades, e com esta informação poder-se-á tentar caracterizar as luminárias reais da cena, embora esta caracterização também envolva dificuldades consideráveis (há muitos graus de liberdade a explorar).

Sejam as distribuições esféricas de radiância designadas $\Theta(x)$. Quando essas distribuições estão associadas a IL's, designam-se $\Theta^i(x)$. Se estão associadas a DL's, são denominadas $\Theta^d(x)$.

As IL's podem ser basicamente de dois tipos:

- minorantes, se a distribuição esférica de radiância induzida no ponto x , $\Theta_n^i(x)$, representar a radiância mínima a respeitar (representada por $\Theta_n^{im}(x)$)
- majorantes, se $\Theta_n^i(x)$ representar a radiância máxima a respeitar ($\Theta_n^{iM}(x)$)

Se forem consideradas IL's a emitir radiância inversa unitária, então pode-se determinar a influência da referida IL em qualquer ponto da cena calculando-se a sua distribuição esférica de radiância. Este processo pode ser repetido sucessivamente para cada IL. Se $\Theta_n^i(x)$ representar a distribuição esférica de radiância em torno do ponto x devida à IL n , então tem-se

$$\Theta^{iM}(x) = \sum_j k_j \Theta_j^{iM}(x) \ ; \ \Theta^{im}(x) = \sum_j k_j \Theta_j^{im}(x) \quad (2)$$

em que k_j representa um factor de escala da IL j . A resultante $\Theta^{im}(x)$ é a distribuição de radiância mínima a respeitar pelas luminárias reais (DL's), a fim de se obter os níveis de radiância representados pelas IL's minorantes. $\Theta^{iM}(x)$ é a distribuição de radiância máxima a respeitar pelas DL's.

Caso se pretenda validar um determinado design de iluminação, com luminárias reais e materiais conhecidos, então determinando-se $\Theta^d(x)$ (distribuição de radiância devida às DL's) e fazendo-se a combinação de $\Theta^d(x)$ com $\Theta^i(x)$, é possível validar ou não esse design

$$\Theta_E^M(x) = \Theta^{iM}(x) - \Theta^d(x) \ ; \ \Theta_E^m(x) = \Theta^d(x) - \Theta^{im}(x) \quad (3)$$

em que $\Theta_E^m(x)$ e $\Theta_E^M(x)$ representam os erros direccionais na adequação das radiâncias real e inversa. Há uma violação das condições de design se algum desses valores for negativo. Se $\Theta_E^m(x)$ é positivo, pode significar que existe um excesso de iluminação; se $\Theta_E^M(x)$ é positivo, existe uma margem de manobra favorável na satisfação dos objectivos de iluminação.

A análise das restrições associadas às IL's pode ser feita para todas as direcções em volta do ponto x , ou considerando quaisquer ângulos sólidos $\Theta^{iM}(x, w, \theta)$ — por convenção, definimos $\Theta^{iM}(x) \equiv \Theta^{iM}(x, [1, 0, 0], 180^\circ)$. O interesse de usar ângulos sólidos é relevante para restrições eminentemente direccionais (normalmente associadas a ofuscamento, por exemplo). O efeito das IL's pode ser quantificado através da determinação das distribuições esféricas de radiância em qualquer ponto, as quais servirão como ferramenta básica para atingir os objectivos pretendidos.

Quando não se conhece $L^e(x, w)$ nem $L(x, w)$, $\Theta^d(x)$ não é imediatamente calculável, pelo que é necessário encontrar um processo alternativo aproximado (mas que possa convergir para a solução sob controlo do utilizador). Todas as distribuições de radiância são fontes de informação que podem ser usadas para extrapolar $\Theta^d(x)$, incluindo as IL's, mas poderão não ser suficientes para essa busca.

Assim, tendo em conta alguns princípios de design de iluminação e regras arquitectónicas e luminotécnicas, somente algumas regiões do espaço da cena serão relevantes para a localização de potenciais DL's. A componente difusa de $\Theta(x)$ é muito importante, dado que fornece informação sobre como a radiância se espalha pela cena, pelo que a conjugação de $\Theta^i(x)$ com luminárias pontuais de amostragem selectivas $\Theta^a(x)$, nas regiões pré-definidas de localização, poderá ajudar a definir uma posição inicial para as DL's ($\Theta^d(x)$). Algumas técnicas de investigação operacional poderão ser empregues na procura desta solução, dado que este problema pode ser considerado como a minimização de uma função multi-dimensional complexa. Depois de se ter definido a localização mais provável de DL's abstractas (tipo omnidireccionais), coloca-se a questão de definir as distribuições reais de emissão (características físicas das luminárias), eventualmente tentando categorizar em luminárias padrão (esféricas, paralelipédicas, com ou sem armaduras, dispositivos reflectores, etc).

Mas também é possível extrapolar informação sobre a melhor localização de DL's unicamente a partir de IL's. Supondo que se gera um conjunto de amostras $\Theta^i_a(x)$, a partir de IL's, numa região do espaço onde se pretendem colocar DL's, pode-se, para cada ponto x , definir uma importância "pesada"

$$IMP(x, \bar{w}, \theta, f_i) \equiv \frac{1}{K} \int_{\Omega} f_i(\bar{z} \angle \bar{w}) L'_a(x, \bar{z}) G_l(\bar{w}, \bar{z}, \theta) d\bar{z} \quad (4)$$

$$\text{com } K = \int_{\Omega} f_i(\bar{z} \angle \bar{w}) G_l(\bar{w}, \bar{z}, \theta) d\bar{z}$$

em que $f_i(\alpha)$ é uma função angular de distribuição de emissão luminosa (própria de um tipo de luminária existente, por exemplo), $L'_a(x, w)$ é a radiância inversa calculada e $G_l(w, z, \theta)$ uma função puramente geométrica (1 se z estiver dentro do ângulo sólido θ em volta de w , senão 0). O integral pode ser aproximado por

$$IMP(x, \bar{w}, \theta, f_i) \equiv \frac{1}{K} \sum_{\Omega_a} f_i(\bar{z}_a \angle \bar{w}) L'_a(x, \bar{z}_a) G_l(\bar{w}, \bar{z}_a, \theta) \quad (5)$$

A quantidade escalar $IMP(x,w,\theta,f_i)$ (um campo escalar de seis dimensões, para uma dada f_i) pode ser considerada como uma superfície de importância, fixando-se uma coordenada posicional (normalmente aquela associada à altura), a direcção e o ângulo sólido e deixando variar as restantes coordenadas posicionais. Curvas de nível desta superfície representarão pontos nesse plano (a essa altura) com a mesma importância. Se for definida uma condição limiar $IMP(x,w,\theta,f_i) > IMP_{limiar}$, então a curva de nível associada a IMP_{limiar} representa as fronteiras das regiões desse plano onde a condição é satisfeita. O facto de um ponto ter um valor de $IMP(x,w,\theta,f_i)$ superior a outro significa que é mais importante para a IL em causa. Uma condição $IMP(x,w,\theta,f_i) > IMP_{limiar}$ pode ser associada a luminárias minorantes, em que se pretende garantir um valor mínimo de radiância incidente; uma condição contrária será relevante para luminárias majorantes.

A quantidade $IMP(x,w,\theta,f_i)$ também pode ser analisada fixando-se x e θ , obtendo-se, neste caso, uma distribuição esférica de importância, dependente do modelo f_i de distribuição de emissão escolhido. Ou então, fixam-se todos excepto θ , o que permite conhecer o melhor ângulo sólido de emissão a usar, para uma certa f_i .

3. Implementação

Uma das vantagens desta abordagem é a sua independência em relação a programas computacionais de cálculo de iluminação global, excluindo-se aqueles que não cumprem requisitos fundamentais. Alguns desses requisitos são:

- inexistência de restrições de materiais (nomeadamente especulares ou translúcidos)
- cálculo de radiância em qualquer ponto e direcção
- determinação da componente difusa indirecta em qualquer ponto numa superfície

Qualquer programa que cumpra pelo menos estes requisitos pode ser usado como motor de cálculo na nossa abordagem. O software *RADIANCE* [War94] é actualmente considerado dos melhores no âmbito da simulação da iluminação global. Saliente-se que quase todos os programas de EF existentes (na maioria baseados em radiosidade) não cumprem as especificações necessárias para servir de motor de cálculo à nova abordagem, excepto aqueles que usam radiosidade e *wavelets* (porém, gastam muito tempo de processamento).

O *RADIANCE* exige que as amostragens para cálculo de iluminação sejam feitas com um número elevado de amostras, a fim de se conseguir uma variância baixa no cálculo e de se poder garantir níveis de erro aceitáveis. Verificou-se que 512 amostras geravam resultados satisfatórios. Porém, não existe ainda um método analítico para conhecer os erros de aproximação durante os cálculos de iluminação. Este é um tópico que merece mais investigação dada a sua importância.

Apesar da aplicabilidade da nova abordagem pretender ser geral, parece-nos importante concentrar a sua aplicação a espaços de trabalho convencionais tipo escritório, para os quais existem métodos empíricos que podem servir como comparação [Leu94] [Lup96].

3.1 Dados de Entrada

A entrada de dados realiza-se através da definição de luminárias inversas (IL's) na cena, o qual é feito através de um interface gráfico interactivo que mostra a geometria da cena e permite esse tipo de interacção. Assume-se na nova abordagem que a geometria da cena e os materiais são predefinidos e que não são o objectivo da simulação em si. As IL's podem ser de dois tipos básicos (pontual ou de área, Figura 2). Posteriormente, poderá ser relevante definir outro tipo de objectivos, mais relacionados com a experiência prática dos especialistas, tais como critérios de conforto visual, níveis de iluminação, normas, etc.

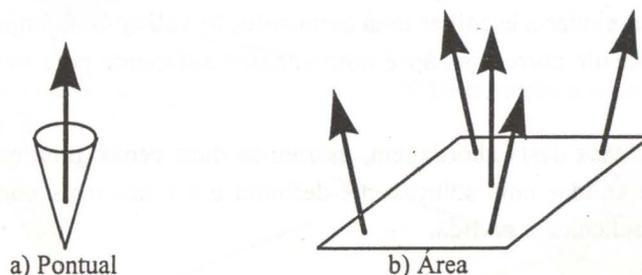


Fig. 2 - Tipos de Luminária Inversa (IL)

A existência prévia de luminárias convencionais (DL's) numa cena em estudo é também um aspecto importante a ter em conta. O simples facto de existirem inicialmente DL's influencia a satisfação dos objectivos de iluminação e pode até colidir com eles. A definição das IL's (os objectivos de iluminação pretendidos) tem de ser monitorizada no sentido de despistar imediatamente situações fisicamente impossíveis. Esta impossibilidade pode ser resolvida sugerindo a utilização de dispositivos geométricos bloqueadores ou direccionadores. Note-se que a determinação de novas luminárias da cena é altamente influenciável pelas DL's iniciais existentes.

3.2 Simulação da Iluminação Inversa

Conhecidos a geometria, materiais da cena e luminárias inversas, procede-se, nesta fase, à simulação da iluminação global inversa. O resultado é um conjunto de pontos sobre a geometria da cena que contém, para cada IL, a sua distribuição esférica de radiância, assim como informação adicional (gradientes de variação da irradiância, etc). Previamente, podem definir-se zonas de interesse e somente nessas zonas será efectuada a simulação e a geração de informação para as fases seguintes. Esta fase tem de ser calculada através de iluminação global, no caso geral, podendo ser efectuada por algoritmos simplificados tipo radiosidade para ambientes totalmente difusos.

3.3 Análise da Iluminação Inversa

Depois de calculados os efeitos das IL's sobre a cena, vários tipos de análise podem ser realizados. Se existem DL's a validar, a combinação destas com as IL's pode ajudar a validar a solução de iluminação, usando para esse efeito pontos escolhidos da cena. A análise de distribuições de radiância inversa permite a detecção de situações potenciais de

ofuscamento, sobre-iluminação, etc. A determinação de regiões mais importantes para a colocação de DL's é também um resultado interessante, sobretudo se, nessa determinação, for levada em conta a distribuição emissora característica de diferentes tipos de luminárias (reais ou não).

4. Resultados

Os resultados obtidos pela nossa abordagem têm sido encorajadores. Note-se que o objectivo não é produzir imagens computacionais de elevado realismo visual. Embora este tipo de resultado possa ajudar a escolher uma certa solução válida, um conjunto de imagens sintéticas fotometricamente correctas não é normalmente suficiente para validar um design de iluminação.

Para mostrar alguns passos desta abordagem, usaram-se duas cenas, uma mais simples que mostra como se pode validar uma solução pré-definida e a outra mais complexa, em que pouca informação é conhecida à partida.

4.1 Cena Simples

A cena é constituída por uma sala fechada (Figura 3) contendo uma mesa simplificada, sobre a qual está assente um dispositivo de visualização (VDU). Em frente da mesa há uma pessoa, representada por um conjunto de paralelepípedos, de acordo com Lupton *et al* [Lup96]. No tecto, existem quatro luminárias (DL's) alinhadas em duas filas. Todos os materiais têm superfícies perfeitamente difusas, com excepção do ecrã VDU, o qual é bastante especular.

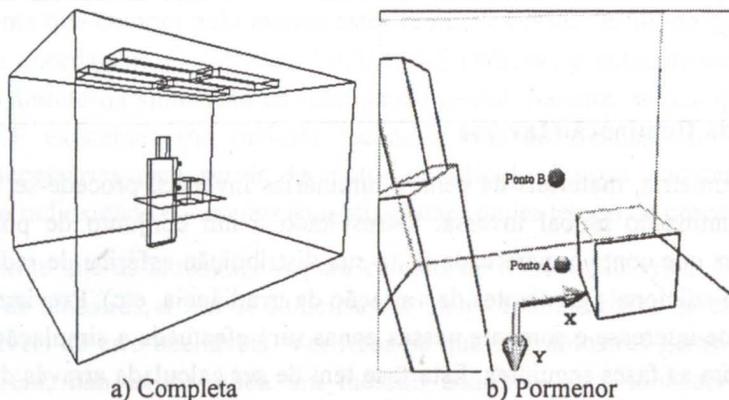


Fig. 3 - Geometria de Cena

Nesta cena consideram-se dois pontos particulares (ponto A — acima do tampo da mesa, perto do ecrã VDU; ponto B — acima do tampo, perto do rosto do corpo). A Figura 4 mostra $\Theta^d(x)$ e $\Theta_n^i(x)$ no ponto A. Para o mesmo ponto, mostram-se na Figura 5 as possibilidades de combinar as diferentes distribuições (a normal e as inversas), de modo a poder avaliar a validade radiométrica. A superfície cinzento-escuro representa a restrição minorante do tampo (radiância superior a certo valor, $\Theta_E^m(x)$), representando as superfícies

cinzenta e cinzento-clara restrições majorantes (radiância inferior a certo valor, $\Theta_E^M(x)$), respectivamente para o rosto e ecrã VDU.

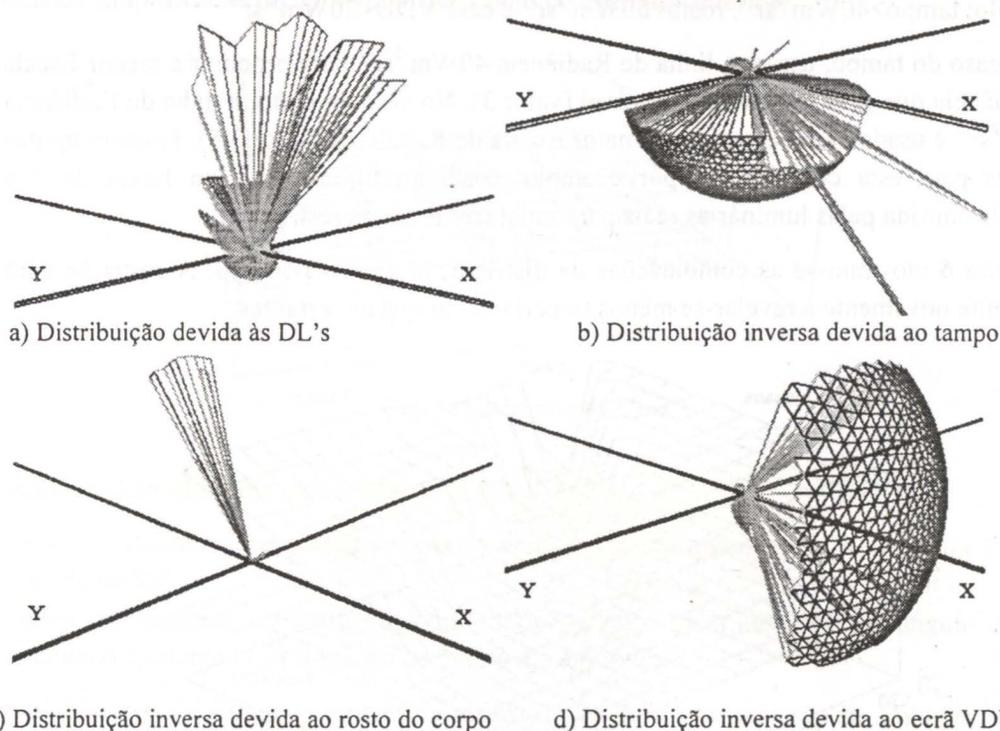


Fig. 4 - Distribuições de Radiância no ponto A

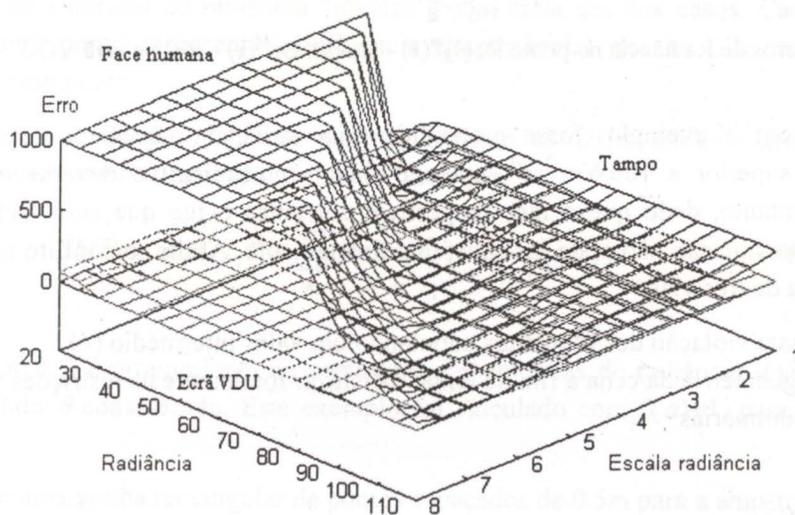


Fig. 5 - Erros de Radiância no ponto A: $\Theta_E^m(x)$ - tempo; $\Theta_E^M(x)$ - rosto e ecrã VDU

Na Figura 5, a Escala de Radiância representa o factor de escala aplicado à emissão das DL's. O Erro está expresso em per milagem e representa a fracção de direcções amostradas no ponto em análise cuja radiância real escalada das DL's não respeita a restrição. Da

análise desta figura ressalta a maior importância da restrição rosto, o qual limita claramente as hipóteses de experimentação.

Exemplo: $tampo > 40 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, $rosto < 50 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ e $ecr\grave{a} \text{ VDU} < 30 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$

Para o caso do tampo, usa-se a linha de Radiância $40 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ para procurar a menor Escala de Radiância que gera um erro desprezável (valor 3). No caso do rosto, a linha de Radiância $50 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ é usada para determinar a maior Escala de Radiância (valor 3.5). Existem muitas soluções para esta combinação; por exemplo, basta multiplicar por um factor de 3 a radiância emitida pelas luminárias reais para satisfazer todas as restrições.

Na Figura 6 mostram-se as combinações de distribuição para o ponto B. A restrição ecrã VDU volta novamente a revelar-se menos importante do que as restantes.

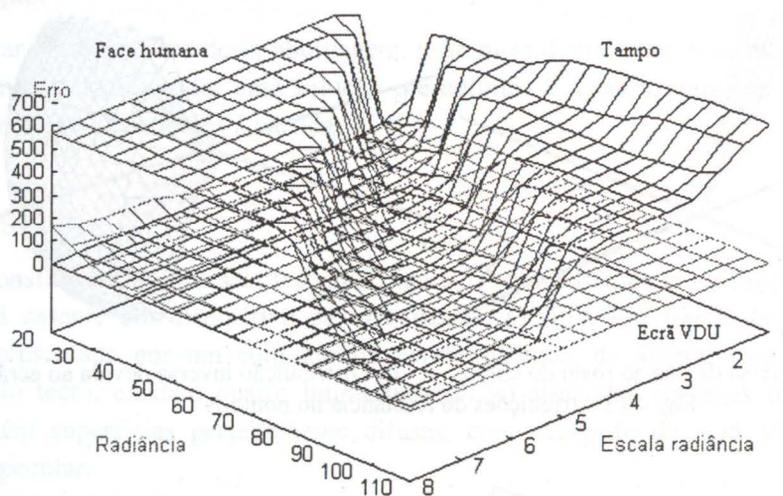


Fig. 6 - Erros de Radiância no ponto B: $\Theta_E^m(x)$ - tampo; $\Theta_E^M(x)$ - rosto e ecrã VDU

Se, de acordo com o exemplo, fosse pretendida uma radiância no tampo (superfície cinzento-escuro) superior a $100 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, então o factor multiplicativo deveria ser pelo menos 4.5. No entanto, dado que a face (superfície cinzenta) exige que esse factor não ultrapasse 3.5, esta situação não pode ser satisfeita directamente. Assim, o conflito pode ser resolvido por uma de três vias:

- admite-se alguma violação dos requisitos adoptando um valor intermédio (4)
- modifica-se a geometria da cena a fim de tentar satisfazer totalmente as restrições
- alteram-se as luminárias

4.2 Cena Complexa

Uma grande sala fechada constitui a cena (Figura 7), tendo comprimento 15m, largura 12m e altura 2.9m, que contém espaços de trabalho simplificados (secretária — altura 0.86m, armário e divisória), de acordo com Lupton *et al* [Lup96].

Todos os materiais têm superfícies essencialmente difusas. Pretende-se estudar a localização de luminárias partindo dos objectivos de iluminação. Numa das simulações foram inseridos modelos simplificados do corpo humano, como no exemplo anterior.

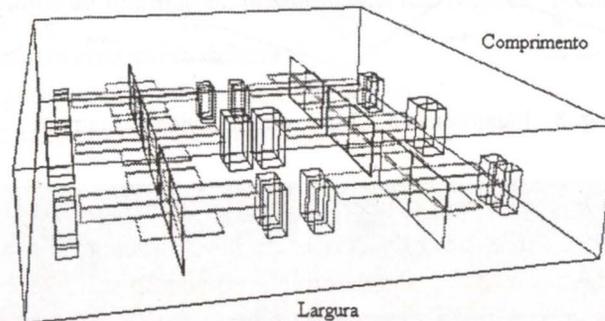


Fig. 7 - Geometria de Cena

Foram considerados dois objectivos:

- nível de radiância nos tectos superior a certo valor e homogéneo, usando um ângulo sólido de 90°
- nível de radiância no rosto humano inferior a certo valor, usando um ângulo sólido pequeno e orientado na direcção do tampo mais próximo

Cada objectivo foi simulado através da utilização de IL's, com emissão de $1 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$. Para concretizar o estudo de localização de luminárias, definiram-se grelhas rectangulares de pontos, próximas do tecto (entre 2.2 e 2.7m de altura), nas quais se determinaram distribuições esféricas de radiância "inversa", para cada um dos casos. Cada distribuição esférica num ponto representa a influência (importância) que as LI's tectos e rostos exercem nesse ponto.

Assumindo, na equação (5), que $f_l(\alpha)=1$, ie, que as DL's emitem energia luminosa independentemente da direcção de emissão, vem que

$$IMP(x, \bar{w}, \theta, f_l) \propto \sum_{\Omega_a} L'_a(x, \bar{z}_a) G_l(\bar{w}, \bar{z}_a, \theta) \quad (6)$$

ie, $IMP(x, w, \theta, f_l)$ é proporcional ao somatório das amostras de radiância inversa dentro do ângulo sólido θ considerado. Este exemplo foi calculado com $f_l(\alpha)=1$, para simplificar os cálculos.

Utilizou-se uma grelha rectangular de pontos espaçados de 0.5m para a amostragem, a várias alturas. Para cada ponto desta grelha, usaram-se vários ângulos sólidos (aberturas de 30° , 90° e 140°), direccionados para baixo, de modo a obter um valor escalar (importância) para cada ângulo sólido considerado. A Figura 8 mostra um dos resultados dessas operações.

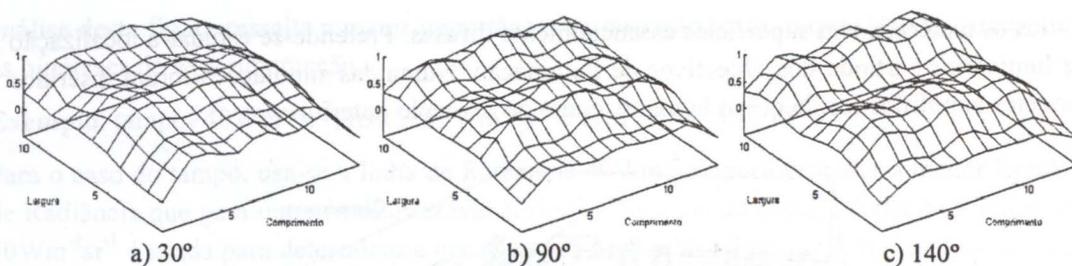


Fig. 8 - Importância a 2.5m de altura devida aos tampos

A análise combinada de duas dessas superfícies (uma associada aos tampos e outra aos rostos) permite, através da utilização de curvas de nível associadas à altura, conhecer as zonas mais influenciadas por cada IL, de acordo com o ângulo sólido escolhido. A Figura 9 (ângulo sólido 90°) mostra, a traço grosso, as regiões que satisfazem vários limiares de importância (cinzento-escuro 50%, cinzento-claro 75%), para o caso dos tampos. A traço fino mostram-se as regiões correspondentes para os rostos. Como se conclui, a região central é a mais importante. O efeito mais negativo dos rostos manifesta-se no espaço entre tampos. Na Figura 9a visualiza-se a posição das curvas de importância na geometria da cena, sendo semelhante para as restantes figuras com curvas de importância.

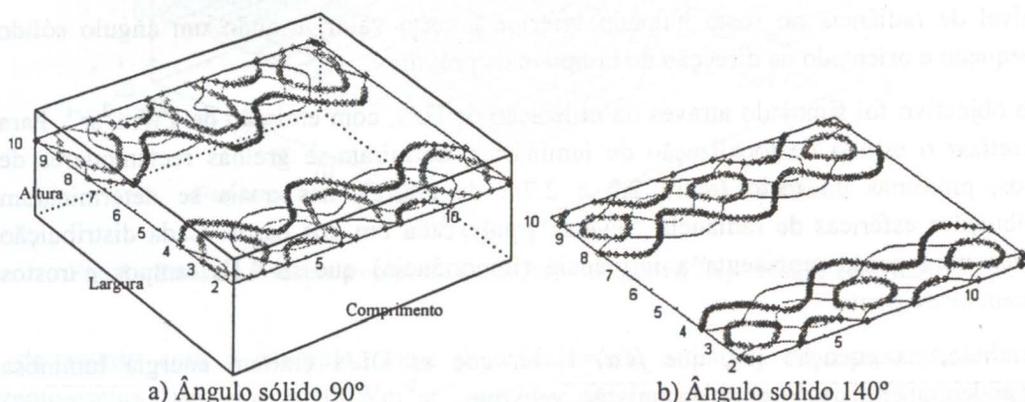


Fig. 9 - Curvas de Nível de Importância tampo/rosto a 2.2m de altura

A Figura 10 mostra as regiões de importância para um ângulo sólido de 90°, a 2.2 e 2.7m de altura. Note-se que a 2.7m a localização de DL's está restringida a uma região menor, mas a importância dos rostos é ligeiramente maior.

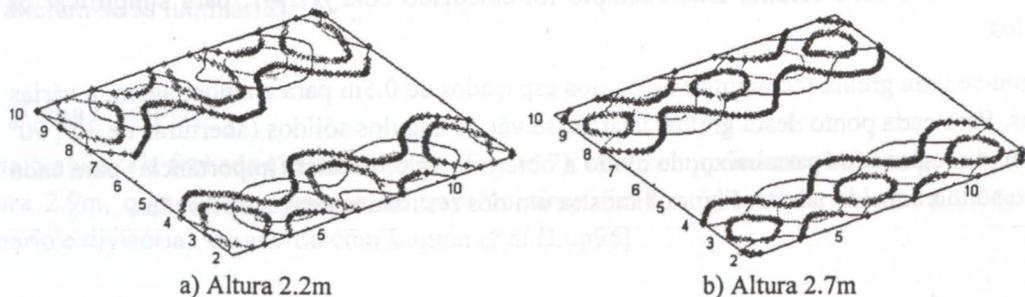
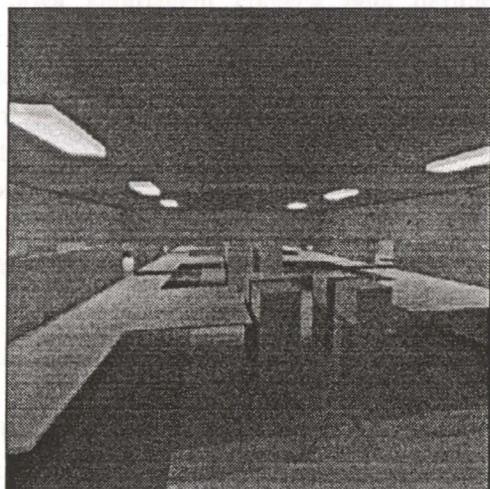


Fig. 10 - Curvas de Nível de Importância tampo/rosto para 90°

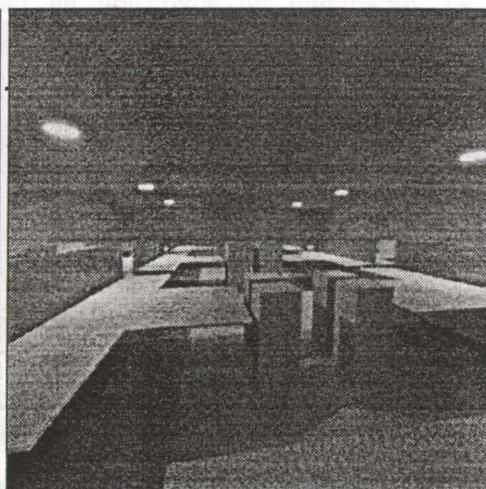
Destes gráficos resulta que o local “apropriado” para colocação de DL’s parece ser perto do tecto, directamente por cima dos grupos de tampos, em grelha 3x2.

Na Figura 11 mostram-se imagens fotometricamente realistas, em que para as DL’s se experimentaram três tipos de luminárias, posicionadas nas regiões “recomendadas”:

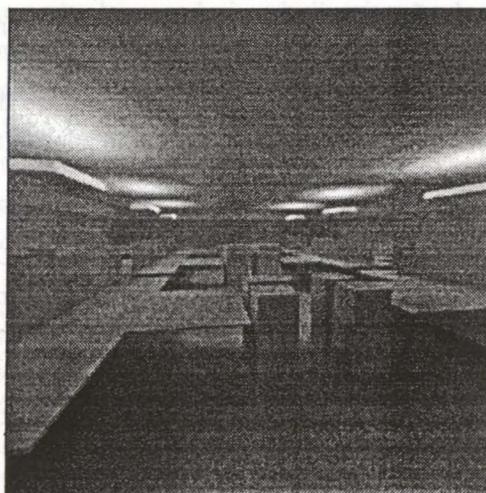
- lâmpadas fluorescentes com caixa difusora
- lâmpadas de halogéneo com projector semicilíndrico
- lâmpadas fluorescentes em montagem *uplighting*



a) Fluorescentes com difusor



b) Halogéneo com projector



c) Fluorescentes em *uplighting*

Fig. 11 - Exemplos de Luminárias “reais” que satisfazem o Design de Iluminação proposto

As imagens parecem concordar com os objectivos definidos *a priori*, ie, a distribuição luminosa nos tampos (plano de trabalho) parece ser homogénea e sem grandes zonas de sombra ou penumbra.

4.2.1 Validação

A validação das soluções encontradas foi efectuada através da análise quantitativa de dados produzidos pelo *RADIANCE* sob a forma de imagens de medida e de simulações directas de iluminação global. As imagens apresentadas na Figura 12 mostram que a iluminância nos tectos não tem variações bruscas (as curvas nessas imagens representam curvas de nível de iluminância numa escala linear). Um aspecto positivo importante é a inexistência de efeitos de sombreamento provocados pelos painéis verticais acima dos tectos, os quais existiriam se a colocação de luminárias fosse diferente e não levasse em conta a posição dos tectos.

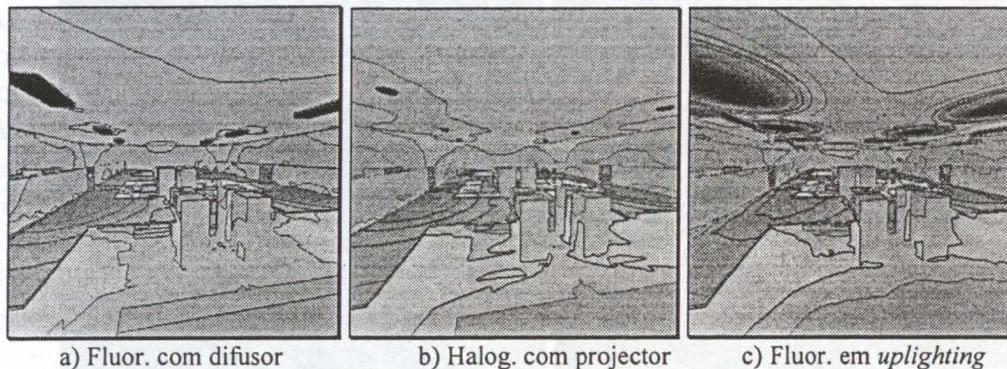


Fig. 12 - Imagens de medida com Curvas de Nível de Iluminância

As luminárias simuladas são modelos de luminárias comerciais, respectivamente IES32, IES12 e IES32 para as imagens das Figuras 11 e 12.

Fôram realizadas simulações directas de iluminação global para verificar se a radiancia reflectida pelos tectos possuía variações significativas. Assim, um plano imaginário foi colocado 2cm acima dos tectos (altura 0.88cm) e determinaram-se distribuições esféricas de radiancia e curvas de nível de importância numa grelha rectangular de pontos nesse plano.

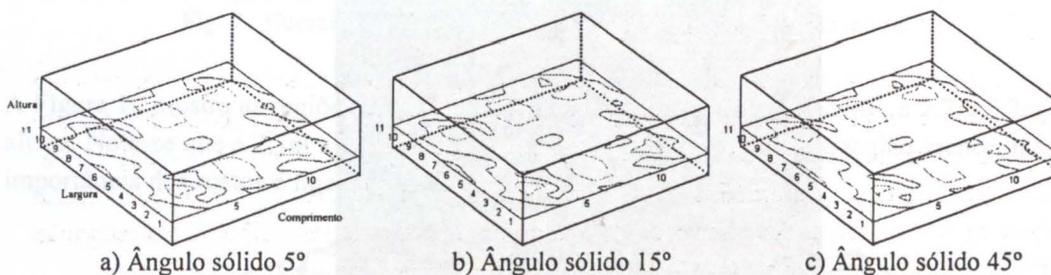


Fig. 13 - Curvas de Nível de Radiancia a 0.88cm (Halogéneo com projector)

Da análise da Figura 13 (as curvas de nível exteriores representam 40% e as interiores 70%) evidencia-se que: a radiancia vinda de baixo do plano imaginário, integrada segundo a equação (6) e usando diferentes ângulos sólidos, tem uma distribuição regular; as zonas mais iluminadas situam-se nos centros dos tectos; não existem fontes inesperadas de radiancia debaixo desse plano.

Uma conclusão mais qualitativa é que o arranjo de luminárias reais em grelha 3x2 é adequado para a geometria da cena e para os objectivos de iluminação especificados. Em termos de conforto visual, é importante salientar que, em posição normal de trabalho e olhando para o tampo da mesa respectiva, não são detectadas zonas de contraste elevado no plano de trabalho causadas por penumbras, sombras ou reflexões especulares.

5. Conclusão

A nova abordagem começa pela definição de objectivos de iluminação, os quais correspondem a IL's. Em seguida, fazem-se simulações de iluminação global inversa e determinam-se distribuições de radiância inversa (importância) em pontos da cena. Caso se conheçam as DL's pretendidas, faz-se a simulação da iluminação global directa e pode-se testar directamente a validade das luminárias. Senão, extrapola-se a localização mais provável das DL's e seu tipo de emissão luminosa a partir de curvas de nível de importância em regiões da cena, podendo depois, após simulação da iluminação global directa, testar-se a validade das DL's com as IL's.

Os resultados obtidos permitem, para uma cena geometricamente definida e com materiais escolhidos, testar e validar hipóteses de iluminação (através de IL's), procurar as melhores regiões da cena para localização de DL's, saber qualitativamente que tipo de DL se adequa melhor e determinar os níveis de emissão luminosa necessários para atingir os objectivos do design de iluminação, entre outros.

O trabalho desenvolvido permite concluir que já existem ferramentas suficientemente testadas e válidas para se poder levar o design de iluminação de um certo estado de "magia negra" para uma utilização generalizada por parte dos especialistas da iluminação, sem terem de ser peritos em áreas informáticas tais como computação gráfica, sistemas operativos, etc. O que falta fazer, essencialmente, é desenvolver, por cima das referidas ferramentas, um ambiente de exploração apropriado ao contexto de trabalho em iluminação, incorporando nesse ambiente as ferramentas do mundo real que são usadas pelos especialistas e criando novos "utensílios".

Existem ainda muitos problemas técnicos por resolver até se poder ter uma ferramenta computacional completa disponível, mas a abordagem proposta parece apontar claramente na direcção correcta. Os tempos de cálculo são um dos maiores obstáculos a vencer, dado que a experimentação interactiva é um atributo desejável. Note-se que a validade radiométrica (fotométrica) deve ser considerada como um dogma neste tipo de investigação e abordagem, sem a qual todo o trabalho realizado cai pela base completamente.

6. Trabalho Futuro

A principal linha de trabalho futuro é desenvolver novos métodos de encontrar boas soluções de iluminação, essencialmente. Isto inclui a localização automática de luminárias, capacidade de prever o uso de entidades geométricas para obviar/evitar problemas de iluminação, entre muitos outros tópicos interessantes.

O resultado final pretendido consiste em integrar, num único programa computacional, todos os programas desenvolvidos separadamente, e acelerar a produção de informação para taxas interactivas. Outro aspecto importante a considerar é disponibilizar resultados de formas tão diversas quanto possível e incorporar uma interacção intuitiva. Prevê-se igualmente integrar funcionalidades que ainda não se encontram disponíveis em ferramentas deste tipo:

- fotómetro “virtual” com abertura angular variável, capaz de medir radiância ou irradiância
- cálculo de mapas de irradiância em superfícies da cena
- verificação de critérios de conforto visual
- validação de normas de iluminação

e outras.

Referências

- [Chr97] CHRISTENSEN, P.H.; LISCHINSKI, D.; STOLLNITZ, E.J.; SALESIN, D.H.; Clustering for Glossy Global Illumination; *acmTransactions on Graphics*, V. 16, N. 1, págs. 3-33; ACM 1997.
- [Sch93] SCHOENEMAN, C; DORSEY, J.; SMITS, B.; ARVO, J.; GREENBERG, D.; Painting with Light; *COMPUTER GRAPHICS Proceedings*, págs. 143-146; SIGGRAPH 1993.
- [Kaw93] KAWAI, J.K.; PAINTER, J.S.; COHEN, M.F.; Radioptimization — Goal Based Rendering; *COMPUTER GRAPHICS Proceedings*, págs. 147-154; SIGGRAPH 1993.
- [Gla95] GLASSNER, A.; Principles of Digital Image Synthesis (volumes 1 e 2); Morgan Kaufmann Publishers 1995.
- [Lup96] LUPTON, M.J.; LEUNG, A.S.M.; CARTER, D.J.; Advances in Lighting Design Methods for Non-Empty Interiors: A Review; *Lighting Research Technology*, V. 28, N. 1, págs. 29-41; CIBSE 1996.
- [Leu94] LEUNG, A.S.M.; LUPTON, M.J.; CARTER, D.J.; Standard Obstructions for Lighting Calculations; *Lighting Research Technology*, V. 26, N. 3, págs. 161-165; CIBSE 1994.
- [War94] WARD, G.J.; The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System; *COMPUTER GRAPHICS Proceedings*, págs. 459-472; SIGGRAPH 1994.