Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

DESIGN DE ILUMINAÇÃO EM AMBIENTES VIRTUAIS

António Manuel Cardoso da Costa

PORTO
2000

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

DESIGN DE ILUMINAÇÃO EM AMBIENTES VIRTUAIS

Por

António Manuel Cardoso da Costa

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Faculdade de Engenharia
BIBLIOTECA
Nº
Cota

Março 2000

Orientadores: Prof. Fernando Nunes Ferreira / Prof. António Augusto Sousa

RESUMO

Até há poucos anos, chamava-se "síntese de imagem realista" ao conjunto de processos cujo objectivo final era criar uma ilusão da realidade a partir de representações geométricas de objectos tridimensionais. A ilusão obtém-se através de efeitos ópticos tais como perspectiva, sombras, reflexões, etc. Para obter esses efeitos, as técnicas de síntese de imagem recorrem frequentemente a processos empíricos. Pelo contrário, a simulação de iluminação pretende simular todos os fenómenos luminosos, baseando-se em modelos ópticos verosímeis e formulações matemáticas rigorosas.

O design de iluminação tem por objectivo analisar, validar ou prever os efeitos de iluminação num espaço tridimensional. Os métodos convencionais de design de iluminação, desenvolvidos no âmbito da luminotecnia, baseiam-se em processos empíricos e aplicam-se apenas a espaços padronizados, com características geométricas especiais. Nos anos mais recentes, a evolução da arquitectura e da iluminação comercial trouxe dificuldades ao design de iluminação convencional, dado que tornou evidente as suas limitações. A comunidade dos designers de iluminação começou então a perceber a necessidade de novas ferramentas de simulação da iluminação, baseadas em melhores modelos físicos e enquadramentos matemáticos mais rigorosos.

O processo de design através de estratégias do tipo tentativa e erro raramente é o mais adequado, porque a simulação de iluminação baseada na simulação do transporte da luz ainda não é interactiva e porque o design de iluminação é muito complexo. Os melhores algoritmos de simulação do transporte da luz são capazes de simular todos os fenómenos necessários ao design de iluminação. No entanto, os graus de liberdade e os objectivos do design de iluminação relacionam-se de um modo muito complexo com o comportamento da luz, pelo que se torna necessário descobrir novos processos de design nos quais os objectivos do designer de iluminação desempenhem um papel mais importante.

O tema principal desta tese é investigar novas abordagens ao design de iluminação, com ênfase na simulação rigorosa da iluminação e em processos de design centrados no utilizador e orientados para a satisfação dos seus objectivos de iluminação.

Nesta tese analisam-se as metodologias usadas em design de iluminação e propõe-se uma nova metodologia de design de iluminação baseada num processo de design inverso (design guiado por objectivos) e com recurso a algoritmos de simulação do transporte da luz adaptados para manipular a grandeza física "importância", dual da grandeza física associada ao fotão (a "radiância"). Nesta metodologia transformam-se os graus de liberdade e o contexto do design em parâmetros de um espaço de configuração multi-dimensional e numa função custo, os quais podem ser processados por métodos de optimização global a fim de se encontrar a melhor solução de design de iluminação.

O uso dos objectivos de iluminação como dados de entrada, do design inverso como processo de design e da "importância" como entidade fundamental da simulação de iluminação originou um novo algoritmo de design de iluminação, o qual foi implementado através de um protótipo experimental que inclui ferramentas computacionais reputadas de optimização global e de simulação do transporte da luz. O protótipo incorpora também técnicas de aceleração de desempenho que reduzem consideravelmente os tempos de processamento.

Palavras-chave: design de iluminação, transporte da luz, optimização global, design inverso.

ABSTRACT

Until recently, the expression "realistic image synthesis" was applied to a set of procedures whose goal was to create illusions of reality from geometric descriptions of three-dimensional objects. Optical effects like perspective, shadows, reflections, etc, achieve this illusion. To obtain those effects, image synthesis techniques frequently use empirical methods. By the contrary, lighting simulation aims at the simulation of all lighting phenomena based on veritable optical models and mathematically correct formulations.

The goal of lighting design is the analysis, validation and preview of lighting effects in any three-dimensional space. The traditional lighting design methods, developed by lighting experts, are based on empirical methods and apply only to standard spaces, with special geometrical attributes. In the last years, the evolution of architecture and commercial lighting complicated the use of traditional lighting design, because that evolution exposed its many limitations. Lighting designers finally understood the need for new lighting simulation tools, based on better optical models and more accurate mathematical frameworks.

The trial-and-error design process seldom is the most adequate, because interactive lighting simulation based on light transport simulations is not yet possible and lighting design is inherently complex. The best lighting simulation algorithms can simulate all the optical phenomena required by lighting design. Nevertheless, the degrees of freedom in the design and the lighting objectives are related with light behaviour in a very complex way, and this requires new design approaches in which the designer objectives play a more important role.

The main subject of this thesis is to research new approaches to lighting design, emphasising on the correctness of lighting simulations and user-centred design methods, while trying to achieve the best attainment of lighting design goals.

In this thesis, the author analyses the most commonly used lighting design methodologies and proposes a new one based on inverse design methods (goal based design) and "importance" transport simulation algorithms (the "importance" is the dual entity of the "radiance", the simplified photon representation used in lighting). In this new methodology, the degrees of freedom and the lighting context are transformed into several multi-dimensional configuration space parameters and a cost function, which are then processed by global optimisation methods so that the best lighting design solution can be found.

The use of lighting design objectives as input data, inverse design as design method and "importance" as lighting simulation quantity led to the development a new lighting design algorithm, which was subsequently implemented as an experimental prototype. This prototype uses well-known and reputed lighting and global optimisation computational tools, but also includes new acceleration techniques that significantly reduce processing times.

Keywords: lighting design, light transport, global optimisation, inverse design.

RESUMEÉ

Il y a bien peu de temps, on appelait de synthèse d'image réaliste à l'ensemble de procédés qui permettait la production d'une illusion de la realité à partir d'une représentation géométrique d'objects tridimensionnels. L'illusion est créée par des effects comme la perspective, les ombres, etc. Pour obtenir ces effects, les techniques de synthèse d'images reposent généralement sur des formules empiriques. Contrairement aux techniques de synthèse d'images réalistes, la simulation d'éclairage consiste à simuler tous les phénomènes lumineux, en s'appuyant sur des théories optiques véritables et sur des formulations mathématiques rigoureuses.

Le but du design d'éclairage est la validation, l'analyse et la prévision des effects d'éclairage dans un environnement tridimensionnel. Les techniques conventionnels de design d'éclairage sont basées sur des procédés empiriques et sont seulement applicables dans les environnements standardisés. L'évolution de l'architecture et de l'éclairage commercial a ammenée des difficultés suplémmentaires au design d'éclairage. Les designers ont compris qu'ils avait besoin de nouveaux outils de simulation d'éclairage, basés sur des théories optiques physiquement véritables et sur des formulations mathématiques rigoureuses.

Le procéssus de design tentatif et érreur n'est pas applicable, en génèrale, parce que la simulation d'éclairage n'est pas intéractive et parce que le design d'éclairage est complèxe. Les meilleurs algorithmes pour la simulation d'éclairage sont capables de simuler tous les phénomènes nécessaires aux design d'éclairage. Par contre, la relation entre les degrés de liberté et les objectifs du design avec le comportement de la lumière est très complèxe, donc il faut découvrir des nouveaux procédés de design, dans lesquels les objectifs du designer jouent un role plus important.

Le principal objectif de ce travail est la recherche de nouveaux approches pour le design d'éclairage, ayant comme double motivation: faire la simulation rigourese d'éclairage et employer des procédés de design orientés vers l'utilisateur et ses objectifs.

Les principales méthodologies de design d'éclairage sont analysées et on propose une nouvelle méthodologie, basée sur un procéssus de design invers (design orienté par des objectifs) et qui utilize des algorithmes rigoreux de simulation d'éclairage, dans lesquels les calculs sont fait avec la grandeur importance, qui est la grandeur de dualité de la radiance (la quantité physique transporté par les photons). Dans cette méthodologie, les degrés de liberté du design sont transformés en paramèttres d'un éspace multi-dimensionnel et dans une fonction de côut, qui sont, en suite, procéssés par des méthodes de optimisation globale, avec le but de trouver la meilleur solution pour le problème d'éclairage.

L'utilization des objectifs d'éclairage comme données d'entrée, d'un procéssus invers de design et de l'importance comme grandeur principale dans les calculs de simulation d'éclairage a permi le dévelopment d'un nouveau algorithme pour le design d'éclairage. Pour analyser cet algorithme, un prototype a été implementé avec des outils de optimisation globale et de simulation d'éclairage. Dans la mise en oeuvre de ce prototype, on a ajouté des techniques d'accélération des calculs qui produisent des réductions considérables aux temps de calcul.

Mots-clés: design d'éclairage, simulation d'illumination, optimisation globale, design invers.

À Dulce, à Rita e ao João.

Aos meus Pais.

AGRADECIMENTOS

Para começar, quero expressar o meu mais sincero agradecimento aos meus co-orientadores.

Ao Prof. Fernando Nunes Ferreira e ao António Augusto de Sousa pela amizade que tem manifestado para comigo desde o início das minhas actividades, em 1985. Os seus encorajamentos, as críticas construtivas, as sugestões, em suma, as suas personalidades bem-humoradas muito me ajudaram a completar este trabalho.

Em seguida, quero agradecer o convívio, apoio e encorajamento de muitas das pessoas do Instituto Nacional de Engenharia e Sistemas de Computadores (INESC Porto), sobretudo os conhecidos de longa data, em particular os membros da Unidade de Software (João Paulo Pereira, Aurélio Pires, José Manuel Moreira, Miguel Leitão, Miguel Losa, Alexandre Carvalho e muitos outros).

Expresso também agradecimentos ao Instituto Politécnico do Porto (IPP) e ao seu Instituto Superior de Engenharia (ISEP) por todo o apoio concedido, nas pessoas do Prof. Luís Soares (Presidente do IPP), de Vítor Santos (Presidente da Comissão Directiva do ISEP), de Jorge Mendes (Presidente do Departamento de Engenharia Informática do ISEP) e de João Rocha (Orientador do Grupo de Disciplinas de Informática Industrial). O apoio e encorajamento dos colegas, funcionários e alunos do Departamento de Engenharia Informática do ISEP foi também muito importante.

Agradeço aos responsáveis do Programa PRODEP/MCT (Ministério da Ciência e Tecnologia) o apoio prestado, ao abrigo do qual me foi concedida uma Bolsa de Doutoramento que permitiu a realização deste trabalho.

Finalmente, quero agradecer à minha família e amigos, pelo seu apoio e compreensão.

Porto, 29 de Março de 2000.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA 2
1.2. OBJECTIVOS DE INVESTIGAÇÃO 3
1.3. ESTRATÉGIAS DE INVESTIGAÇÃO 4
1.4. TRABALHOS RELACIONADOS 5
1.5. ORGANIZAÇÃO DA TESE 7
1.6. CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS 8
1.6.1. DESIGN 9
1.6.2. ILUMINAÇÃO 9
1.6.3. OPTIMIZAÇÃO 9
1.6.4. IMPLEMENTAÇÃO 9

2. FUNDAMENTOS 11

2.1. TRANSPORTE DA LUZ 11
2.1.1. MODELOS DA LUZ 12
2.1.1.1. Óptica Geométrica 13
2.1.1.2. Óptica Ondulatória 13
2.1.1.3. Óptica Quântica 14
2.1.2. PROBLEMAS RELACIONADOS 16
2.1.2.1. Transporte de Neutrões 16
2.1.2.2. Transporte do Calor 16
2.1.2.3. Propagação do Som 17
2.1.3. RADIOMETRIA E TRANSPORTE DA LUZ 17
2.1.3.1. Grandezas Radiométricas 17
2.1.3.2. Funções de Radiância 19
2.1.3.3. Transporte da Radiância e da Importância 21
2.1.4. FORMULAÇÕES OPERACIONAIS DO TRANSPORTE DA LUZ 22
2.1.5. ALGORITMOS DE SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DA LUZ 23
2.1.5.1. Abordagem Determinística versus Estocástica 24
2.1.5.2. Dependência da Tomada de Vista 25
2.2. VISÃO E LUMINOTECNIA 25
2.2.1. NATUREZA DA LUZ 26
2.2.1.1. A Cor 26
2.2.2. VISÃO E PERCEPÇÃO HUMANA 27
2.2.2.1. Fotometria 30
2.2.3. CONCEITOS BÁSICOS DE LUMINOTECNIA 31
2.2.3.1. Quantidade da Iluminação 31
2.2.3.2. Qualidade da Iluminação 31
2.2.3.3. Fontes de Luz 32
2.2.3.4. Luminárias 33
2.2.3.5. Tipos de Iluminação 35
2.3. ILUMINAÇÃO 36
2.3.1. GEOMETRIA 36
2.3.2. MATERIAIS DE SUPERFÍCIE 37
2.3.2.1. Propriedades Ópticas de uma Superfície 37
2.3.2.2. Reflectância de uma Superfície 38
2.3.2.3. Cor de uma Superfície 38
2.3.2.4. Especularidade de uma Superfície 39
2.3.2.5. Transmitância de uma Superfície 39
2.3.3. LUMINÁRIAS 39
2.3.3.1. Dados Experimentais de Luminárias 40
2.3.3.2. Iluminação Natural 40
2.4. OPTIMIZAÇÃO 41

2.4.1. PRINCÍPIOS DE OPTIMIZAÇÃO 42
2.4.2. MÉTODOS DE OPTIMIZAÇÃO 42
2.4.2.1. Métodos de Intervalos 42
2.4.2.2. Métodos de *Clustering* 43
2.4.2.3. Métodos de *Simulated Annealing* 43
2.4.2.4. Métodos de *Tabu Search* 43
2.4.2.5. Métodos de Algoritmos Evolucionários 43
2.4.2.6. Métodos Estatísticos 44
2.4.2.7. Métodos Híbridos 44
2.5. SUMÁRIO 45

3. METODOLOGIAS DE DESIGN E PROJECTO DE ILUMINAÇÃO 47
3.1. METODOLOGIAS DE DESIGN 49
3.1.1. DESIGN DE ILUMINAÇÃO IDEAL 51
3.1.2. METODOLOGIAS BASEADAS EM OBJECTIVOS 52
3.2. MÉTODOS DE PROJECTO DE ILUMINAÇÃO 54
3.2.1. MÉTODOS ANALÓGICOS 54
3.2.2. MÉTODOS EMPÍRICOS 55
3.2.3. MÉTODOS COMPUTACIONAIS 56
3.3. ESTADO DA ARTE DO DESIGN DE ILUMINAÇÃO 56
3.4. SUMÁRIO 59

4. DESIGN DE ILUMINAÇÃO BASEADO EM OBJECTIVOS 61
4.1. GRANDEZAS USADAS EM DESIGN DE ILUMINAÇÃO 63
4.2. OBJECTIVOS DO DESIGN DE ILUMINAÇÃO 63
4.2.1. OBJECTIVOS RADIOMÉTRICOS 64
4.2.1.1. Critérios Visuais 64
4.2.2. OBJECTIVOS NÃO-RADIOMÉTRICOS 65
4.2.2.1. Objectivos Geométricos 65
4.2.2.2. Objectivos Estéticos 66
4.3. PAPEL DA GRANDEZA RADIÂNCIA 66
4.4. PAPEL DA GRANDEZA IMPORTÂNCIA 67
4.4.1. TRANSPORTE DA IMPORTÂNCIA 68
4.4.2. DESIGN DE ILUMINAÇÃO COM RECURSO À IMPORTÂNCIA 68
4.5. OPTIMIZAÇÃO EM DESIGN DE ILUMINAÇÃO 71
4.5.1. RELEVÂNCIA DOS OBJECTIVOS 72
4.5.2. OBJECTIVOS COMO FONTES DE IMPORTÂNCIA 72
4.5.2.1. Iluminação Prévia 73
4.5.3. PARÂMETROS DO DESIGN DE ILUMINAÇÃO 77
4.5.3.1. Espaço de Configuração dos Parâmetros 77
4.5.3.2. Escolha do Espaço de Configuração 78
4.5.3.3. Discretização do Espaço de Configuração 80
4.5.4. PESQUISA DE SOLUÇÕES DO DESIGN DE ILUMINAÇÃO 81
4.5.4.1. Funções Custo versus Soluções 81
4.5.4.2. Características de Funções Custo 84
4.5.4.3. Funções Custo Algorítmicas 84
4.5.4.4. Optimização de Funções Custo Algorítmicas 85
4.5.4.5. Métodos de Pesquisa Aplicáveis 85
4.6. FUNÇÃO CUSTO NO DESIGN DE ILUMINAÇÃO 86
4.6.1. OBJECTIVOS RADIOMÉTRICOS 86
4.6.1.1. Fontes de Importância 86
4.6.2. OBJECTIVOS NÃO-RADIOMÉTRICOS 87
4.6.2.1. Inclusão na Função Custo 87
4.6.2.2. Descrição da Função Custo 87
4.6.3. LINGUAGEM DE DEFINIÇÃO DE FUNÇÕES CUSTO 88
4.6.3.1. Descrição 88
4.6.3.2. Implementação 88

4.7. SUMÁRIO 89

5. ALGORITMO PROPOSTO PARA DESIGN DE ILUMINAÇÃO 91

5.1. ALGORITMO PROPOSTO 91
5.1.1. DESCRIÇÃO GERAL DO ALGORITMO 93
5.1.1.1. Preparação de Dados 93
5.1.1.2. Ciclo de Pesquisa 94
5.1.1.3. Exploração de Resultados 95
5.1.1.4. Decisão Final 95
5.1.2. DADOS DE ENTRADA 95
5.1.3. DADOS DE SAÍDA 97
5.2. RECURSOS COMPUTACIONAIS 98
5.2.1. DADOS DE ENTRADA 98
5.2.2. DADOS DE SAÍDA 99
5.2.3. ANÁLISE DE COMPLEXIDADE 99
5.2.3.1. Complexidade Espacial 99
5.2.3.2. Complexidade Temporal 100
5.3. UMA IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO 100
5.3.1. INTERACÇÃO E INTERFACE 101
5.3.2. TRANSPORTE DA LUZ 101
5.3.2.1. Pacote de Simulação *RADIANCE* 101
5.3.3. OPTIMIZAÇÃO 103
5.3.3.1. Análise de Métodos de Optimização 103
5.3.3.2. Métodos de *Branch and Bound* 104
5.3.3.3. Métodos de *Simulated Annealing* 104
5.3.3.4. Métodos de *Tabu Search* 104
5.3.3.5. Métodos de Algoritmos Evolucionários 105
5.3.3.6. Escolha do Método de Optimização 105
5.3.3.7. Pacote de Optimização *ASA* 105
5.3.4. DADOS DE ENTRADA 106
5.3.5. PESQUISA DE SOLUÇÕES 106
5.3.5.1. Ciclo de Pesquisa 107
5.3.5.2. Computação da Função Custo 107
5.3.6. DADOS DE SAÍDA 108
5.3.7. COMPLEXIDADE E DESEMPENHO 109
5.3.7.1. Dados Intermédios 110
5.3.8. ACELERAÇÃO DA PESQUISA 112
5.3.9. EXPLORAÇÃO DE COERÊNCIA 112
5.3.10. PARALELIZAÇÃO DO CÁLCULO RADIOMÉTRICO 116
5.4. SUMÁRIO 118

6. AVALIAÇÃO DE RESULTADOS 119

6.1. ASPECTOS TÉCNICOS DA IMPLEMENTAÇÃO 119
6.2. APRESENTAÇÃO DE CASOS 120
6.2.1. CASO 1 121
6.2.2. CASO 2 123
6.2.3. CASO 3 126
6.2.4. CASO 4 129
6.2.5. CASO 5 142
6.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS 145
6.3.1. DESEMPENHO 146
6.3.2. VALIDAÇÃO 147
6.3.3. LIMITAÇÕES 147
6.4. SUMÁRIO 148

7. CONCLUSÕES 149
7.1. REVISÃO DOS OBJECTIVOS DE INVESTIGAÇÃO 149
7.2. CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS 151
7.3. TRABALHO FUTURO 152
REFERÊNCIAS
PUBLICAÇÕES DO AUTOR RELACIONADAS COM A TESE
ANEXOS

LISTA DE TABELAS

Tab. 1 – Grandezas radiométricas e fotométricas 31
Tab. 2 – Categorias de iluminância em função das tarefas visuais 55
Tab. 3 – Índices de reaproveitamento da técnica de *cache* de importância 115
Tab. 4 – Tabela de ensaios 122
Tab. 5 – Tabela de simulação de desempenhos 123
Tab. 6 – Desempenho médio 125
Tab. 7 – Desempenho médio sem aceleração 134
Tab. 8 – Desempenho médio com aceleração via *cache* de importância 135
Tab. 9 – Desempenho médio com aceleração via *cache* de importância e *quenching* 135
Tab. 10 – Tabela de desempenhos (IRC-NRC) 135
Tab. 11 – Comparação de desempenhos médios dos cenários 2 e 3 140
Tab. 12 – Comparação de soluções dos cenários 2 e 3 141

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 – Reflexão num espelho (óptica geométrica) 15
Fig. 2 – Reflexão num espelho (óptica quântica) 15
Fig. 3 – Rede de difracção (óptica quântica) 15
Fig. 4 – Funcionamento do olho humano 27
Fig. 5 – Curva de sensibilidade relativa $V(\lambda)$ 29
Fig. 6 – Curvas da Lei de Bodmann 29
Fig. 7 – Espectros emissivos: lâmpadas de incandescência e fluorescência 33
Fig. 8 – Espectros emissivos: lâmpadas de sódio (baixa e alta pressão) 33
Fig. 9 – Espectros emissivos: lâmpadas de mercúrio (alta pressão) e vapores metálicos 33
Fig. 10 – Iluminação natural 41
Fig. 11 – Pseudo-código de um problema NLP 42
Fig. 12 – Design de iluminação tradicional 49
Fig. 13 – Design de iluminação inverso 50
Fig. 14 – Design de iluminação baseado em *Design Gallery*™ 50
Fig. 15 – Design como optimização global 52
Fig. 16 – Design de iluminação evolucionário 53
Fig. 17 – Geometria do espaço usado 57
Fig. 18 – Soluções de design de iluminação para avaliação por peritos 58
Fig. 19 – Papel dos objectivos no design inverso baseado em objectivos 62
Fig. 20 – Imagens real e de "importância" 67
Fig. 21 – Papel da importância no design de iluminação baseado em objectivos 69
Fig. 22 – Célula de trabalho 69
Fig. 23 – Célula de trabalho e ofuscamentos 70
Fig. 24 – Fontes de importância para análise de iluminação 70
Fig. 25 – Geometria com iluminação prévia 73
Fig. 26 – Distribuição de radiância no tampo da mesa (quatro pontos) 74
Fig. 27 – Distribuições num ponto do tampo da mesa 75
Fig. 28 – Distribuições de importância a utilizar 75
Fig. 29 – Distribuições de importância a utilizar 76
Fig. 30 – Fontes de importância a utilizar (fonte original subdividida em quatro) 76
Fig. 31 – 5 parâmetros (x,y,z,d_x,d_y; $d_z^2=1-d_x^2-d_y^2$) 78
Fig. 32 – 5 parâmetros (α,r,z,d_x,d_y; $d_z^2=1-d_x^2-d_y^2$) 79
Fig. 33 – 6 parâmetros (x,y,z,v_x,v_y,v_z) 79
Fig. 34 – Função custo tridimensional 82
Fig. 35 – Função custo "discretizada" 83
Fig. 36 – Função custo de problema de design de iluminação 83
Fig. 37 – O papel da função custo 87
Fig. 38 – Exemplo de um programa custo 88
Fig. 39 – Algoritmo proposto 92
Fig. 40 – Cadeia de cálculos por iteração de pesquisa 107
Fig. 41 – Cena e soluções em representação "malha de arame" 108
Fig. 42 – Cena e solução final aplicada 109
Fig. 43 – Cena com solução final e elementos quantitativos (curvas de iso-iluminância) 109
Fig. 44 – Distribuições de pontos sobre a superfície da esfera unitária (4096 pontos) 111
Fig. 45 – Aceleração da pesquisa através de *simulated quenching* 112
Fig. 46 – Amostras de irradiância indirecta por nível de reflexão 113
Fig. 47 – Cálculos por iteração de pesquisa (*cache* de importância integral indirecta) 113
Fig. 48 – Cálculos por iteração de pesquisa (*cache* de importância individual) 114
Fig. 49 – Coerência de distribuições de importância 114
Fig. 50 – Cálculos por iteração de pesquisa (*cache* de distribuições de importância) 115
Fig. 51 – Pseudo-código de cálculo de distribuições de importância 116
Fig. 52 – Motor radiométrico de simulação do transporte da luz 116

Fig. 53 – Motor radiométrico "distribuído" 117
Fig. 54 – Gráficos de ensaios 122
Fig. 55 – Soluções de localização de luminárias do tipo foco 123
Fig. 56 – Programa custo associado à Fig. 55a 124
Fig. 57 – Programa custo associado à Fig. 55b 124
Fig. 58 – Programa custo associado à Fig. 55c 125
Fig. 59 – Geometria da cena e luminária prévia 126
Fig. 60 – Distribuições de radiância prévia e importância final 126
Fig. 61 – Pesquisa de parâmetros de uma luminária do tipo foco. 127
Fig. 62 – Resultados do cenário 1 128
Fig. 63 – Resultados do cenário 1 com parede adicional 128
Fig. 64 – Resultados do Cenário 2 129
Fig. 65 – Geometria de uma célula de trabalho 130
Fig. 66 – Fotografia da sala de trabalho IRC-NRC 130
Fig. 67 – Solução empírica de iluminação 131
Fig. 68 – Curvas de iso-iluminância para arranjo empírico de luminárias 131
Fig. 69 – Objectivos de iluminação e fontes de importância 132
Fig. 70 – "Imagem" gerada pelas fontes de importância tampos 132
Fig. 71 – Relações entre parâmetros de pesquisa do cenário 1 133
Fig. 72 – Solução de iluminação baseada em luminárias omnidireccionais 133
Fig. 73 – Relações entre parâmetros de pesquisa do cenário 2 134
Fig. 74 – Evolução do valor máximo da função custo por iteração 136
Fig. 75 – Evolução dos valores "óptimos" dos parâmetros por iteração 136
Fig. 76 – Evolução do nº médio de pontos vizinhos usados no cálculo de importância 137
Fig. 77 – Evolução do nº médio de cálculos de importância elementar 137
Fig. 78 – Solução optimizada de iluminação (*downlighting*) 138
Fig. 79 – Curvas de iso-iluminância para arranjo de luminárias em *downlighting* 138
Fig. 80 – Solução optimizada de iluminação (*uplighting*) 138
Fig. 81 – Curvas de iso-iluminância para arranjo de luminárias em *uplighting* 139
Fig. 82 – Composição de soluções optimizadas 139
Fig. 83 – Relações entre parâmetros de pesquisa do cenário 3 140
Fig. 84 – Relações entre parâmetros de pesquisa do cenário 4 141
Fig. 85 – Solução optimizada de iluminação (fila única) 141
Fig. 86 – Curvas de iso-iluminância para arranjo de luminárias em fila única 142
Fig. 87 – Geometria de *hall* 143
Fig. 88 – Evolução de soluções (plataforma grande e parede esquerda) 144
Fig. 89 – Evolução de soluções (plataforma pequena e parede direita) 144
Fig. 90 – Luminárias optimizadas em *uplighting* 145

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo descreve-se sucintamente o tema deste trabalho e trabalhos relacionados de outros autores. Enfatizam-se as contribuições originais, finalizando-se com uma descrição da estrutura desta dissertação.

A luminotecnia é uma área tecnológica que tem registado notáveis progressos nos anos mais recentes. A enorme variedade de tipos de luminárias disponíveis comercialmente e o uso cada vez mais generalizado da iluminação natural são exemplos desses progressos. Por outro lado, os aspectos ecológicos da iluminação começam também a ganhar uma importância crescente e muito significativa.

O papel tradicional do luminotécnico, que se resumia no passado a efectuar alguns cálculos rudimentares baseados em modelos empíricos, tem vindo a evoluir no sentido de incorporar na sua actividade elementos de luminotecnia (princípios, normas, regulamentos, etc), arquitectura (iluminação versus geometria e materiais) e design (aspectos artísticos, estéticos, decorativos, de conforto, etc). As actuações isoladas do arquitecto, do luminotécnico e do decorador são cada vez menos justificadas devido à complexidade dos projectos actuais, particularmente nos casos em que a iluminação natural desempenha um papel importante ou em que a geometria é sofisticada ou inovadora, e à atitude mais exigente e participativa do cliente.

Assim, não faz sentido relegar o luminotécnico para um papel secundário, em que tenha a responsabilidade de projectar a iluminação depois da arquitectura estar completamente definida, pois tal atitude pode conduzir a situações muito difíceis de resolver do seu ponto de vista. De igual modo, também não faz sentido que o luminotécnico desempenhe a sua função antes de conhecer a geometria em geral, os objectos que vão preencher o espaço e os seus materiais de superfície.

Por outro lado, a importância do design de iluminação tem vindo a aumentar. Antes do aparecimento do designer de iluminação como especialista, a iluminação era calculada pelo arquitecto ou pelo luminotécnico – o arquitecto preocupava-se essencialmente com a superfície e o volume, ao passo que o luminotécnico concentrava-se em fórmulas e equações. Frequentemente, ambos não davam a importância necessária à iluminação, sendo esta relegada para a fase final de um projecto, com a qualidade muitas vezes condicionada pelo orçamento disponível. Com o passar dos anos, o papel do designer de iluminação foi ganhando importância; o arquitecto e o luminotécnico começaram a compreender os problemas técnicos da medição da iluminação e os modos complexos como esta se relaciona com a estética do espaço. Muitos luminotécnicos ainda ignoram ou desconhecem o impacto psicológico que a luz tem no espaço, orientando o seu trabalho para a satisfação puramente quantitativa de níveis de iluminação; tendem a espalhar a luz uniformemente pelo espaço, numa interpretação simplista dos regulamentos e normas, como se a luz fosse uma carpete que deve cobrir todo o chão da mesma forma.

Além disso, a diminuição dos custos energéticos assumiu-se como uma preocupação crescente das sociedades modernas, o que retira uma margem de manobra apreciável ao designer de iluminação, que assim deixa de poder contar com a mera quantidade de iluminação como processo de resolver os problemas. A nova postura da sociedade em relação ao consumo de energia obriga o designer a ser mais flexível e criativo, por forma a encontrar soluções de iluminação que resolvam o problema com o desperdício energético mínimo, mas tendo em conta, entre outros, os aspectos psicológicos, estéticos e normativos.

A importância do design de iluminação tem também aumentado devido ao facto dos designers procurarem cada vez mais soluções arrojadas, envolvendo compromissos entre a forma e o aspecto do espaço. Os métodos tradicionais, empíricos, de apoio ao design de iluminação não fornecem quaisquer garantias de viabilidade (ao designer), dado terem sido desenvolvidos para quantificar espaços padronizados muito simples e com condições muito específicas. Por outro lado, a tendência de encarar o design de iluminação apenas como sendo uma manifestação de arte, sem qualquer relação com a ciência, é uma forma de fugir ao problema e não pode ser totalmente levada a sério.

O design de iluminação depende da geometria do espaço e dos seus objectos, dos materiais de superfície existentes, da presença de iluminação prévia e dos objectivos que se pretendem atingir, pelo que as distinções rígidas entre os domínios da arquitectura, da engenharia da iluminação e do design tenderão provavelmente a esbater-se. Para ajudar a tal propósito, seria desejável que existissem ferramentas computacionais de apoio ao design de iluminação capazes de modelar e representar com exactidão a complexidade dos fenómenos ópticos, de modo a permitir a experimentação virtual de soluções e a ajudar na procura dessas soluções.

Este trabalho descreve uma nova abordagem do design de iluminação. Os seus objectivos são facilitar a aplicação de ferramentas computacionais ao design de iluminação e garantir ao designer a validade física dos resultados obtidos. Esta abordagem é aplicável aos problemas comuns de design de iluminação em espaços interiores, sobretudo naqueles em que a iluminação indirecta desempenha um papel relevante. Além disso, se existir iluminação prévia (luminárias e/ou iluminação natural) e esta for descrita quantitativamente, esta abordagem é capaz de levar em consideração os seus efeitos, o que a distingue de abordagens prévias. A maior parte das abordagens prévias não incorpora os objectivos de iluminação nos dados de entrada, aplica-se apenas a espaços padronizados, não trata problemas com iluminação indirecta e não possui mecanismos de classificar as diferentes soluções obtidas, dependendo unicamente do designer para a escolha da solução final.

O título desta dissertação é "Design de Iluminação em Ambientes Virtuais" porque neste trabalho se descreve uma metodologia de design de iluminação aplicável a ambientes construídos ou por construir, sendo estes dois tipos de ambientes reunidos numa designação mais abrangente de ambientes virtuais. Em termos deste trabalho, a designação ambiente virtual pressupõe a existência de um modelo computacional do ambiente, com ou sem correspondência real, no qual estão caracterizados os elementos geométricos, de superfície e de iluminação mais relevantes, capazes de permitirem diversos tipos de tratamento quantitativo.

1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O design de iluminação tem por objectivo a definição das características de iluminação de um espaço parcial ou totalmente especificado. Na maior parte dos casos, o contexto do design de iluminação é o seguinte:

- O espaço é apenas parcialmente especificado (chão, tecto, paredes principais, portas, etc); os objectos não-arquitectónicos são desconhecidos.
- Os materiais de superfície são desconhecidos, embora a prática comum permita supor que as paredes sejam revestidas de um material de superfície essencialmente difuso, etc.
- Desconhece-se a influência da iluminação natural nesse espaço, ie, não se conhecem as características e os efeitos das luminárias prévias, caso existam.
- Os fins a que se destina o espaço são vagamente conhecidos (escritório, *hall*, sala de reuniões, etc).

A primeira impressão que surge da análise de um contexto tão incompleto é que a tarefa do designer de iluminação é deveras complicada. É por esta razão que os métodos empíricos ainda hoje vigentes tendem a parametrizar o design de iluminação em função de características da cena muito simples: as dimensões ortogonais da cena, as reflectâncias médias dos objectos com maior área, factores de correcção dependentes do uso do espaço, etc. Esta aproximação simplista é muito atraente pela sua abstracção, mas uma propriedade elementar da iluminação invalida muitas vezes os resultados obtidos: a natureza global da iluminação. No caso geral, a iluminação em qualquer ponto da cena depende da iluminação existente em todos os outros pontos do volume da cena[1].

Actualmente, existem diversos modelos teóricos que explicam o funcionamento da óptica, com diferentes graus de complexidade. Alguns desses modelos podem ser simulados computacionalmente com recursos ao alcance de qualquer designer. Em termos de apoio ao design, o método de design baseado em tentativa e erro já pode ser substituído por outros métodos mais rigorosos e semi-automáticos, nos quais o designer supervisiona o processo mas não precisa de se preocupar tanto com os aspectos numéricos da pesquisa de soluções.

Finalmente, a compreensão do modo de funcionamento do sistema visual humano tem vindo a registar alguns progressos significativos, sobretudo na vertente perceptual. Todos estes desenvolvimentos, aparentemente sem ligação entre si, permitem pensar que o papel do designer de iluminação poderá adquirir uma maior importância projectual, caso seja possível integrar esses desenvolvimentos em novas metodologias de design orientadas para o contexto da iluminação e posterior produção de melhores ou novas ferramentas computacionais de apoio ao design de iluminação.

1.2. OBJECTIVOS DE INVESTIGAÇÃO

O problema geral de conceber simultaneamente um espaço, a geometria dos seus objectos e o seu aspecto visual é demasiado complexo e possui demasiados graus de liberdade para ser abordado com os recursos tecnológicos actuais. Uma abordagem tratável deste problema exige que uma parte dos objectivos seja definida previamente de modo a funcionar como dados de entrada. No caso do design de iluminação, dado que o ênfase recai nos aspectos da iluminação, é lícito supor que as entidades mais directamente relacionadas com a iluminação sejam tratadas como objectos de design, sujeitos à experimentação e à pesquisa de configurações mais adequadas. Em contrapartida, as entidades menos directamente relacionadas com a iluminação poderão ser consideradas dados de entrada, devendo permanecer inalteradas durante o processo de design. Essas entidades estáticas são a geometria da cena, os materiais de superfície e iluminação prévia da cena, caso exista.

[1] Quando o meio ambiente é o ar, a iluminação num ponto depende da iluminação em todos os pontos sobre as superfícies dos objectos da cena.

A validade radiométrica da simulação da iluminação é uma premissa fulcral de qualquer processo de design que pretenda obter soluções verosímeis e praticáveis, mas não é a única. A fidelidade e a exactidão da representação quantitativa dos dados de entrada também é um factor determinante para garantir a validade dos resultados finais de design[2]. Para além dos dados de entrada referidos, também se assume que o designer é capaz de fazer uma formulação quantitativa dos seus objectivos de design de iluminação, dentro do modelo de representação proposto. Sem essa formulação, o problema não poderá ser analisado quantitativamente e será impossível de resolver de forma automática.

Neste contexto, a nova abordagem ao design de iluminação centrar-se-á na pesquisa de configurações óptimas de parâmetros directamente relacionados com a iluminação, essencialmente características de luminárias individuais ou de conjuntos de luminárias.

Assim sendo, os principais objectivos de investigação são:

- Converter problemas de design de iluminação aparentemente intratáveis em problemas equivalentes e tratáveis através de recursos computacionais actualmente existentes.
- Encontrar formas de traduzir objectivos de design de iluminação eminentemente qualitativos em dados de entrada quantitativos ou mecanismos computacionais.
- Utilizar modelos de ambientes virtuais nos quais a caracterização dos elementos geométricos, de superfície e de iluminação prévia seja efectuada com o maior pormenor possível.
- Empregar modelos ópticos fisicamente válidos no estudo das soluções de iluminação.
- Encontrar formas de pesquisar automaticamente o universo de soluções de um problema de design de iluminação, com intervenção mínima do designer, mas facultando-lhe a possibilidade de monitorizar o processo de pesquisa e de poder actuar sobre ele.
- Encontrar soluções de design de iluminação verosímeis e aplicáveis, descartando tão cedo quanto possível as soluções impraticáveis.
- Permitir ao designer produzir diversos tipos de dados de saída com as soluções de design de iluminação obtidas, a fim de poder confirmar ou desmentir as suas hipóteses de design e, desse modo, validar ou recusar as soluções encontradas.
- Esconder ao máximo do designer os detalhes computacionais associados à simulação do comportamento da luz e ao funcionamento dos processos de pesquisa multi-dimensional.
- Obter o desempenho máximo de um sistema computacional que implemente os objectivos anteriormente referidos, recorrendo para isso a técnicas de aceleração de cálculo adequadas, mas sem pôr em causa a validade física necessária ao processo de design de iluminação.

1.3. ESTRATÉGIAS DE INVESTIGAÇÃO

Apesar dos desenvolvimentos registados nas áreas da computação em geral e da computação gráfica em particular, não existem ainda ferramentas computacionais capazes de apoiar satisfatoriamente o design de iluminação. Algumas das razões que podem explicar esta lacuna são:

- Os recursos computacionais necessários para utilizar essas ferramentas são elevados.
- Os fenómenos físicos da óptica, que estão na base da iluminação, são complexos.

[2] "*Garbage in, garbage out*", ie, independentemente da validade de um processo computacional, dados incorrectos à entrada irão resultar em dados incorrectos à saída.

- A relação da iluminação com a geometria e os materiais é muito complicada.
- A simulação e previsão das relações de causa-efeito em design de iluminação é difícil.

Não obstante, alguns algoritmos de simulação do transporte da luz existentes permitem uma grande confiança nos resultados obtidos em simulações de cenas reais. Realmente, os modelos ópticos actuais têm uma base teórica bem estudada e são conhecidas as suas capacidades e limitações.

Em conjunto com os mais recentes desenvolvimentos na área da optimização, afigura-se viável uma nova abordagem que vise estabelecer os fundamentos de uma metodologia em que os objectivos de design tenham um papel importante, ie, uma metodologia para design de iluminação baseada em objectivos. Uma consequência lógica dessa metodologia é uma proposta de algoritmo capaz de descrever os passos necessários para se realizar um design de iluminação mais orientado para o utilizador e para a satisfação dos seus objectivos. Finalmente, o algoritmo proposto é traduzido numa implementação específica através de algoritmos, heurísticas, técnicas e programas informáticos disponíveis ou desenvolvidos, a fim de ser sujeito a um processo de avaliação das suas capacidades através de casos demonstrativos e dos respectivos resultados.

1.4. TRABALHOS RELACIONADOS

A noção de ajuda, por parte de um computador, na escolha dos valores de parâmetros de um problema de design é muito interessante e tem sido tema de alguns trabalhos de investigação. Uma das metodologias empregues com esse fim é a metodologia de evolução interactiva ([Sims91] e [Todd92]), na qual o computador explora o espaço de configuração de parâmetros e o utilizador actua como um oráculo, baseado numa ideia mental do objectivo pretendido, escolhendo as alternativas que acha mais apropriadas para posterior exploração. Dado que esta metodologia necessita da intervenção do utilizador para analisar as alternativas existentes em cada iteração do ciclo de design, um dos problemas que surge é a necessidade do processo de design funcionar a taxas interactivas, apenas alguns minutos por iteração. Para além disso, é fundamental que o papel do utilizador como oráculo de uma função custo "mental" seja consistente com o próprio design, ie, o utilizador tem de saber razoavelmente o que pretende e como o pode atingir.

Uma metodologia alternativa é o **design inverso** ([Kawai93], [Schoeneman93], [Poulin97], [Teo97] e [Marschner98]), na qual o computador pesquisa valores de parâmetros de design que optimizem uma função custo definida pelo utilizador. A principal dificuldade associada ao design inverso é a função custo. No caso dos dados de saída serem difíceis de quantificar ou não se conhecerem as características do design relevantes para a função custo, a aplicação desta metodologia torna-se problemática.

Uma outra metodologia que pretende assumir um papel relevante em problemas de design passíveis de uma representação gráfica perceptualmente eficiente é a metodologia de ***Design Gallery™*** ([Marks97]). Esta metodologia exige uma exploração inicial alargada do espaço de configuração de parâmetros, de modo a posteriormente condensar os resultados dessa pesquisa num conjunto reduzido de valores de parâmetros, os quais são graficamente apresentados ao utilizador para uma decisão final. No entanto, esta metodologia pode ser considerada uma evolução do design inverso, pois os resultados da exploração inicial do espaço de configuração são analisados através de uma função definida pelo utilizador[3], a qual deverá permitir agrupar conjuntos de soluções candidatas em super-soluções, ie, soluções abrangentes. Apesar da função

[3] Uma métrica de distância perceptual, na terminologia dos autores.

"distância perceptual" parecer mais fácil de quantificar e menos importante do que a função custo, na realidade esta metodologia efectua a substituição da função custo por uma função "distância perceptual" e pela intervenção do utilizador.

A aplicação das metodologias anteriormente referidas a problemas relacionados com o design de iluminação, por vezes também designados problemas de iluminação ou sombreamento[4] inverso, não é abundante, destacando-se os seguintes trabalhos de investigação, alguns dos quais já citados:

- [Dorsey91] descreve um sistema para determinação de características de luminárias e projecção de luz em ambientes teatrais.
- O trabalho de [Schoeneman93] permite a definição de características de luminárias através da "pintura com luz", sendo as posições e distribuições emissivas previamente fixadas. Baseado num algoritmo de elementos finitos (radiosidade), o sistema desenvolvido determina as luminárias que emitem de um conjunto de luminárias potenciais, em termos das suas cores e intensidade.
- O trabalho de [Kawai93], igualmente baseado no algoritmo de radiosidade, permite a determinação da orientação, cor e intensidade de luminárias previamente definidas através da optimização global de uma função custo orientada para a satisfação de objectivos perceptuais e emocionais relacionados com o espaço interior.
- [Teo97] descreve um sistema para design de iluminação interactivo em cenas com geometria e tomada de vista fixas, com o qual é possível ajustar interactivamente a orientação de uma luminária do tipo foco, a posição de uma fonte de luz do tipo área ou uma combinação de ambas. Para tal, é necessário calcular previamente tantas distribuições de radiância, descritas através de combinações lineares de distribuições elementares, quantas as fontes de luz existentes; a fase interactiva baseia-se na manipulação das distribuições obtidas sob o controlo do utilizador, através de um algoritmo de recombinação linear desenvolvido para esse efeito.
- A abordagem de [Poulin97] parte da especificação de fronteiras de sombra e manchas de reflexão especular para efectuar a determinação e o posicionamento interactivo de fontes de luz simplificadas; porém, a utilização de algoritmos simplificados do transporte da luz sem tratamento adequado da inter-reflexão difusa impede a aplicação do sistema em espaços iluminados de forma predominantemente indirecta.
- O trabalho de [Marks97], baseado na metodologia *Design Gallery*, também descreve a sua aplicação à determinação de características de luminárias do tipo foco (posição e orientação), embora novamente o uso de algoritmos de simulação do transporte da luz sem tratamento rigoroso da inter-reflexão difusa ponha em causa a validade radiométrica dos resultados.
- Assumindo-se conhecidas a geometria, as reflectâncias dos materiais de superfície e dados quantitativos sob a forma de fotografias, o trabalho de [Marschner98] permite a determinação da iluminação existente na cena correspondente aos dados fornecidos, através de modelos simples de luminárias.

Em termos de luminotecnia e design de iluminação, os artigos de [Moon46] e [Moon48] foram primordiais e ajudaram a estabelecer os fundamentos da ligação futura entre esses domínios. [O'Brien65] mostrou que era possível analisar a iluminação através de cálculos numéricos e sugeriu que o design de iluminação viria a ser praticável. O trabalho de [Miller84] interligou a computação gráfica com a luminotecnia e [DiLaura88] analisou a aplicabilidade de imagens sintéticas no design e estudo de iluminação.

[4] Sombreamento é tradução empregue neste trabalho para a palavra inglesa *rendering*.

Os trabalhos de [McEwan85], [Carter88], [Carter92], [Leung94], [Carter96], [Lupton96], [Carter97] e [Hill98] tentam fazer uma abordagem essencialmente quantitativa do design de iluminação, especialmente voltado para espaços de trabalho interiores. [Carter96] e [Carter97] propõem a adopção de métodos de determinação de características de iluminação muito mais elaborados do que os métodos empíricos convencionais. Nesses trabalhos, e também em [Hill98], os autores identificam as obstruções geométricas como sendo as causas principais de erros no design empírico de iluminação e sugerem modos de as tratar devidamente. O trabalho de [Lupton96] analisa e compara alguns pacotes computacionais de simulação de iluminação, terminando com uma sugestão explícita de que o futuro do design de iluminação passa pelo uso de ferramentas de cálculo com maior ligação à realidade radiométrica.

Diversos métodos e ferramentas computacionais de apoio ao design de iluminação foram desenvolvidos por [Stanger84], [Canesi93], [Anderson94], [Tropp94], [Ward94], [Ward94b], [Dobashi95], [Gates95], [Dobashi96], [Ward96] e [Paule98]. Em todos eles é dada uma grande relevância à validade radiométrica como condição necessária para se realizar um design de iluminação aplicável a problemas reais.

A utilização da noção de importância (grandeza dual da radiância) e da sua equação de transporte data de 1940, no contexto da teoria de transporte de neutrões. A primeira aplicação da importância no contexto da iluminação global foi efectuada por [Smits92], tendo desde essa altura sido empregue na simulação do transporte da luz, particularmente nas técnicas de aceleração, condução ou refinamento de cálculos radiométricos, propostas por [Pattanaik93], [Veach94], [Bekaert95], [Dutre95], [Pattanaik95], [Dutre97] e [Ingmar98]. No entanto, parece haver "consenso" na comunidade científica da computação gráfica que a importância ainda não é devidamente aproveitada em ferramentas computacionais orientadas para a síntese de imagens [RTNews99].

A abordagem proposta pelo autor, baseada na noção de importância, foi originalmente descrita em [Costa98], mas sem se explicar como resolver problemas de design de iluminação de forma semi-automática. Em [Costa99a] e [Costa99b] aprofunda-se a descrição da abordagem proposta e descrevem-se métodos e técnicas capazes de resolver problemas semi-automaticamente.

A fim de melhorar o desempenho computacional do sistema implementado com base na abordagem proposta, em [Costa99c]/[Costa99d] é descrita uma técnica de aceleração de cálculo que permite reduzir significativamente os recursos computacionais consumidos, sobretudo no que concerne à redução dos tempos de processamento. Descrevem-se igualmente os principais problemas em aberto na utilização da abordagem proposta, propondo-se pistas e modos de os solucionar. Em [Costa00] aprofunda-se a descrição de outras técnicas de aceleração de desempenho baseadas na exploração do conceito de coerência dos dados radiométricos, o que permite uma reutilização significativa de dados previamente computados e resulta em cálculos consideravelmente mais rápidos.

1.5. ORGANIZAÇÃO DA TESE

Embora o design de iluminação seja o tema aglutinador desta tese, os temas relacionados com a simulação do comportamento da luz e os processos de pesquisa são igualmente importantes, dado que a maioria dos objectivos incorpora conceitos de todos esses temas. Esta inter-penetração de temas faz com que as bases deste trabalho assentem sobre todos eles em simultâneo, não podendo nenhum deles ser relegado para plano secundário.

Por esse facto, no Capítulo 2, "Fundamentos", faz-se uma síntese das áreas científicas subjacentes ao tema deste trabalho. São abordados com detalhe o Transporte da Luz, a Visão e

Luminotecnia, a Iluminação e a Optimização. Esta síntese é importante porque ajuda na compreensão dos conceitos que estão envolvidos, de forma relevante, no design de iluminação e porque estabelece as bases teóricas fundamentais para os capítulos seguintes.

Dado ser o design de iluminação um tema já com algumas dezenas de anos de existência, o Capítulo 3, "Metodologias de Design e Projecto de Iluminação", inicia-se com uma abordagem das Metodologias de Design existentes, incluindo-se também a que é objecto deste trabalho, prossegue analisando os Métodos de Projecto de Iluminação e termina com uma análise do Estado da Arte do Metodologias de Design e Projecto de Iluminação.

Pretendendo formalizar as diferenças da metodologia previamente definida em contraponto com as metodologias existentes, no Capítulo 4, "Design de Iluminação Baseado em Objectivos", descrevem-se e analisam-se tópicos relevantes para a metodologia proposta, tendo como base conceptual o design inverso e o uso de objectivos como dados de entrada. Os tópicos mais importantes deste capítulo abordam os Objectivos do Design de Iluminação, o uso de Optimização em Design de Iluminação e o papel da Função Custo no Design de Iluminação.

Tomando como base a metodologia proposta e descrita no capítulo anterior, o Capítulo 5, "Algoritmo Proposto para Design de Iluminação", descreve o algoritmo desenvolvido no âmbito deste trabalho, analisa os seus Recursos Computacionais e finaliza com o detalhe da implementação realizada. Nesta implementação descrevem-se os algoritmos, programas e técnicas computacionais escolhidos, os tipos de dados de entrada e saída, as características de complexidade e as técnicas de aceleração de desempenho usadas e desenvolvidas.

A partir de uma implementação baseada no algoritmo proposto, no Capítulo 6, "Avaliação de Resultados", discutem-se os Aspectos Técnicos da Implementação e faz-se a Apresentação de Casos demonstrativos de aspectos técnicos e de problemas reais de design de iluminação. A Discussão de Resultados analisa os resultados obtidos em termos de desempenho e de validade física, factores de utilização muito importantes, e aborda as limitações inerentes à metodologia e ao algoritmo proposto.

O Capítulo 7, "Conclusões", faz Revisão dos Objectivos de Investigação e descreve as Contribuições Originais deste trabalho em face dos resultados obtidos e discute pistas para Trabalho Futuro, em parte já iniciado.

Nos Anexos descrevem-se técnicas computacionais empregues na implementação e referem-se exemplos significativos de conceitos inerentes a este trabalho.

1.6. CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS

Nesta dissertação propõe-se uma nova abordagem ao design de iluminação em que os objectivos de iluminação são convertidos em dados de entrada, os quais, conjuntamente com a geometria da cena, os materiais de superfície e a iluminação prévia, são submetidos a um processo semi-automático de pesquisa de soluções de iluminação, totalmente controlável pelo designer. O processo de pesquisa baseia-se numa aplicação original de um algoritmo de simulação do transporte da importância e não no transporte da radiância. No entanto, explicitam-se nesta dissertação as condições que permitem aplicar um algoritmo de simulação do transporte da radiância à simulação do transporte da importância, pelo que assim se evita o desenvolvimento e a implementação de novos algoritmos e se promove a reutilização dos já existentes.

Assim sendo, neste trabalho faz-se uma integração de três áreas distintas: o design, através do uso de metodologias baseadas em design inverso para abordar problemas de design de iluminação em que os objectivos do design são considerados dados de entrada; a iluminação,

através do uso de algoritmos fisicamente válidos de simulação do transporte da luz aplicados de uma forma não convencional; e a optimização, através da utilização de métodos de optimização global na determinação de soluções "óptimas" de problemas de design de iluminação.

O principal contributo técnico deste trabalho é a proposta de um algoritmo capaz de abordar a maior parte dos problemas comuns de design de iluminação através da integração das três áreas citadas.

Para além da integração, no decurso do trabalho identificaram-se aspectos limitativos no desempenho de uma implementação computacional do algoritmo derivado da metodologia proposta. Esses aspectos foram alvo de análise e foram encontradas formas de os ultrapassar, descrevendo-se as características de cada solução desenvolvida e adoptada.

1.6.1. Design

Em comparação com trabalhos anteriores em que se aplicavam metodologias de design inverso ao design de iluminação (principalmente [Shoeneman93] e [Kawai93]), este trabalho tem um campo de aplicação mais vasto, na medida em que o utilizador pode especificar livremente os objectivos de design que pretende ver satisfeitos e a forma como é medida a qualidade de cada tentativa de solução de design. Além disso, o utilizador pode incluir diversos tipos de condicionantes (radiométricas, geométricas, estéticas, etc) no processo de pesquisa de soluções.

1.6.2. Iluminação

Neste trabalho usam-se os desenvolvimentos da teoria do transporte da luz através de uma grandeza fundamental da radiometria, a radiância, e da sua dual, a importância. De um modo geral, a grandeza importância é pouco aproveitada em aplicações de simulação do transporte da luz, sobretudo em aplicações cuja finalidade é a produção de imagem sintetizada computacionalmente.

No contexto da metodologia de design inverso baseada em objectivos, o uso da importância permite um tratamento algorítmico mais simples de problemas comuns de design de iluminação, visto a importância parecer ser mais adequada a tratamentos inversos da iluminação ("conhecem-se os fins, desconhecem-se os meios"). Ao invés, a radiância parece ser mais apropriada a abordagens directas ("conhecem-se os meios, desconhecem-se os fins").

1.6.3. Optimização

Um dos aspectos inovadores deste trabalho é a transformação de um problema de design num problema equivalente de optimização, sob total controlo do utilizador. O problema de optimização possui uma dimensionalidade variável e características mais ou menos complexas decorrentes do problema concreto de design, pelo que se torna necessário identificar métodos genéricos e globais de optimização, capazes de operar sobre dados de entrada muito diversificados. Nesse contexto, o método de optimização global *simulated annealing* mostrou possuir as características apropriadas para utilização na pesquisa de soluções de problemas de design de iluminação.

1.6.4. Implementação

A implementação efectuada baseia-se em ferramentas computacionais de uso generalizado, integradas de modo a funcionarem como uma ferramenta de apoio ao design de iluminação. Uma das preocupações no desenvolvimento da implementação foi a integração das ferramentas

de simulação do transporte da luz e de optimização global como "caixas pretas", sendo apenas predefinidos os dados de entrada e de saída de cada uma dessas caixas. Deste modo, a implementação partilha de uma independência em relação às ferramentas específicas escolhidas e pode ser facilmente modificada por forma a funcionar com outras ferramentas computacionais.

Para além da integração referida, foram desenvolvidas técnicas de aceleração de desempenho, a fim de se reduzirem os recursos computacionais utilizados. A motivação principal foi diminuir ao máximo os tempos totais de processamento, embora com a preocupação de não retirar validade física ao processo de design de iluminação.

É de destacar a adaptação e implementação de uma versão paralela, segundo o modelo mestre escravo, do motor de cálculo radiométrico (o núcleo da simulação do transporte da luz) numa rede de computadores, como se de uma máquina virtual se tratasse. As reduções de tempo de processamento obtidas por esta versão paralela são muito elevadas em comparação com a versão sequencial. A aplicação deste motor paralelo de cálculo radiométrico à implementação efectuada produziu acelerações de desempenho significativas.

2. FUNDAMENTOS

Neste capítulo descrevem-se os fundamentos dos domínios científicos e tecnológicos relacionados com o design de iluminação, de acordo com os objectivos deste trabalho.

Um dos objectivos deste trabalho é desenvolver ferramentas computacionais que auxiliem a obtenção de soluções correctas e optimizadas para problemas de design de iluminação. Neste capítulo descrevem-se os fundamentos das áreas subjacentes a esse objectivo: o transporte da luz, responsável pela modelação dos fenómenos associados à propagação da luz; a visão e luminotecnia, relacionadas com o modo como o ser humano apreende e quantifica a luz que vê; a iluminação, através dos conceitos necessários para se compreender o que é o design de iluminação; e a optimização, domínio científico orientado para o estudo de métodos de obtenção da solução óptima de problemas descritos de forma quantitativa.

Do transporte da luz descrevem-se os fundamentos teóricos, através dos principais modelos ópticos e respectivas formulações, com o objectivo de se explicar e sistematizar os conceitos mais relevantes, que serão depois utilizados nos capítulos dedicados à descrição do trabalho desenvolvido.

Em relação à visão, analisam-se com detalhe a teoria da cor e o sistema visual humano. Tal justifica-se pela complexidade do funcionamento do sistema visual humano, para o qual existe inclusive uma teoria que explica o comportamento da luz de acordo com a percepção visual humana – a fotometria. No que respeita à luminotecnia, são abordados os tópicos como fontes de luz e luminárias, níveis de iluminação, tipos e métodos de iluminação, etc. A luminotecnia, que pode ser considerada a engenharia da iluminação, depende da fotometria para desempenhar cabalmente a sua função.

A descrição dos conceitos básicos da iluminação centra-se nas entidades que desempenham um papel fulcral no design de iluminação, ie, as entidades que funcionam como dados iniciais do problema e sem as quais não é possível realizar um processo de design: a geometria do espaço, os materiais de superfície dos objectos e as fontes de luz/luminárias.

Em relação à optimização, descrevem-se os principais métodos existentes de abordagem a problemas multi-dimensionais não-lineares de grande escala e para os quais, frequentemente, não existem técnicas exactas de obtenção de soluções óptimas. Dos métodos referidos e sucintamente descritos, os mais relevantes serão posteriormente analisados em termos da sua adequação ao trabalho desenvolvido.

2.1. TRANSPORTE DA LUZ

Os métodos actualmente usados de simulação do transporte da luz são ainda muito limitados em termos de capacidades. A maioria desses métodos é optimizada para operar sobre modelos de

dados de entrada muito restritivos e, geralmente, exigem-se grandes recursos computacionais para lidar com outros modelos de dados. Para que os algoritmos de simulação do transporte da luz se disseminem mais, é fundamental encontrar técnicas que sejam mais robustas. A partir de modelos reais, os algoritmos de síntese de imagem deverão ser capazes de produzir resultados verosímeis dentro de limites temporais razoáveis, geralmente imagens fisicamente correctas e visualmente agradáveis. Isto exige que estes algoritmos sejam capazes de operar sobre cenas, materiais de superfície e iluminação complexa, dado ser esta a situação mais frequente nos ambientes à nossa volta.

A simulação do transporte da luz é uma ferramenta que permite criar imagens mais ou menos convincentes do mundo (real ou artificial). A partir de uma descrição do ambiente[1], que inclui a geometria, as propriedades reflectivas das superfícies, as fontes de luz e os pontos do espaço representativos das tomadas de vista, os algoritmos de simulação do transporte da luz simulam a óptica do mundo real de modo a gerar imagens pretensamente realistas e correctas.

Um dos objectivos destes algoritmos é permitir aumentar a eficiência da modelação de ambientes virtuais realistas. Na área da animação, por exemplo, uma grande parte do trabalho realizado é centrado na criação de iluminação realista, mas, dado que os algoritmos geralmente empregues na produção das imagens não são capazes de simular a iluminação indirecta, muito trabalho extra tem de ser efectuado na tentativa de imitar esses efeitos de iluminação através de luzes suplementares. Ao invés, os algoritmos de simulação do transporte da luz robustos e eficientes são capazes de determinar a iluminação indirecta automaticamente, pelo que é de esperar que esta tarefa venha a tornar-se mais simples no futuro. A área da modelação preditiva, em que se pretende predizer o aspecto de objectos antes de serem construídos, também beneficiará muito do uso de algoritmos de simulação do transporte da luz robustos e eficientes, sendo a aplicação desta ideia muito importante na arquitectura e no design.

Os algoritmos de simulação do transporte da luz não simulam o comportamento da luz com todos os detalhes, dado que tal é desnecessário na maior parte dos casos e também porque a teoria da luz não é ainda totalmente conhecida. De um ponto de vista computacional, a óptica pode ser considerada como um conjunto diversificado de fenómenos; para cada tipo de aplicação, primeiro definem-se quais os fenómenos que são relevantes e depois escolhe-se um algoritmo capaz de os simular convenientemente [Glassner95].

2.1.1. Modelos da Luz

O transporte da luz pode ser analisado em diversos níveis de abstracção, desde os casos bidimensionais do tipo *flatland* [Heckbert92] até simulações quânticas. Uma vantagem importante de ter diversos modelos é poder escolher-se o mais adequado para uma determinada tarefa. Alguns fenómenos ópticos têm implicações muito profundas na natureza dos algoritmos, ao passo que outros são fáceis de integrar.

Os fenómenos ópticos agrupam-se segundo a teoria mais simples que os consegue explicar satisfatoriamente. Cada uma das três teorias a seguir descritas – óptica geométrica, óptica ondulatória e óptica quântica – explica diversos aspectos do comportamento da luz conforme é observada no mundo real.

[1] Também designado cena.

2.1.1.1. Óptica Geométrica

A óptica geométrica assemelha-se praticamente à teoria corpuscular da luz. Este modelo consegue descrever um conjunto extenso de fenómenos ópticos, incluindo-se a emissão, reflexão difusa e especular, refracção e absorção [Glassner95]. Estes são os fenómenos mais comuns no mundo real, o que explica porque tantos algoritmos de síntese de imagem se baseiam na óptica geométrica. No entanto, este modelo, na sua complexidade máxima, é ainda assim demasiado complicado para a maior parte das aplicações de síntese de imagem. Fazendo-se suposições mais restritivas obtêm-se algoritmos mais simples e rápidos.

Uma simplificação frequente é assumir que o ambiente não interfere nos fenómenos ópticos[2]. Alguns meios tais como fumo, nevoeiro ou gelatina emitem, espalham e absorvem a luz. Caso se ignorem estas possibilidades, então pode assumir-se que os fenómenos ópticos apenas acontecem nas superfícies dos objectos, não existindo perda de energia durante o percurso da luz entre as superfícies.

A óptica geométrica também consegue modelar meios que possuam um índice de refracção com variação contínua. Por exemplo, esta situação ocorre quando existe ar aquecido, o que pode gerar efeitos de miragem. No entanto, este fenómeno complica enormemente o transporte da luz, dado que os raios de luz deixam de percorrer trajectos em linha recta e passam a viajar em trajectórias curvas. Além disso, o teste de visibilidade entre dois pontos da cena transforma-se num difícil problema de optimização – encontrar pelo menos um percurso óptico desobstruído entre os referidos pontos.

A suposição de que a luz é monocromática, ie, de que possui uma única frequência, é também uma simplificação vantajosa na concepção de algoritmos de simulação do transporte da luz mais simples e rápidos. Para lidar com luz policromática, existem muitas formas de representação propostas por diversos autores, todas elas fazendo um compromisso entre a exactidão e a complexidade [Peercy93].

Frequentemente, a transmissão de luz através de superfícies é ignorada, o que permite simplificações na concepção dos algoritmos. No entanto, a transmissão pode ser tratada como a reflexão, com a diferença essencial da luz ser espalhada no lado oposto da superfície. Se os índices de refracção nos dois lados da superfície forem diferentes, então é necessário levar isso em conta, dado que as características geométrico-ópticas dos raios de luz são dependentes do quadrado do índice de refracção. Por outro lado, ocorrerá o fenómeno da dispersão de luz (efeito do tipo arco-íris) se o índice de refracção depender da frequência da luz incidente.

Alguns algoritmos apenas lidam com reflexão difusa ideal, na qual a direcção de espalhamento da luz reflectida não depende da direcção de incidência. O mundo real contém uma gama imensa de materiais e são as variações das suas propriedades de espalhamento da luz que o tornam real e visualmente interessante. Porém, só uma percentagem ínfima é que pode ser satisfatoriamente descrita por modelos de reflexão difusa ideal[3].

2.1.1.2. Óptica Ondulatória

A luz também pode ser considerada uma manifestação de ondas electromagnéticas. Este modelo mais abrangente explica todos os fenómenos da óptica geométrica e mais alguns que lhe são

[2] Designa-se por meio não-participante.

[3] No extremo oposto situa-se a reflexão especular ideal, na qual a direcção de espalhamento da luz reflectida se resume apenas à direcção de reflexão ideal, definida através da lei geométrica em que se diz que "o ângulo entre o raio incidente e a normal à superfície no ponto de incidência é igual ao ângulo entre o raio reflectido e a referida normal".

próprios [Glassner95]. Um efeito associado a ondas é a difracção, a qual faz com que a luz contorne ligeiramente certos obstáculos. Apesar de não ser praticamente notada em escalas macroscópicas, não pode ser ignorada com objectos de dimensões reduzidas[4]. Porém, simular a difracção em algoritmos de simulação do transporte da luz é muito complicado devido ao facto de este fenómeno violar a hipótese da luz percorrer trajectos ao longo de linhas rectas.

A coerência é outro fenómeno óptico de natureza ondulatória com alguma importância e que é basicamente uma medida da correlação média entre as fases de dois feixes de luz. Geralmente, assume-se que a luz é totalmente incoerente, ie, quaisquer duas ondas de luz não têm correlação de fase. Nestes casos, as intensidades de dois feixes de luz incoerentes adicionam-se linearmente. Quando existe coerência, a sobreposição de feixes de luz produz o efeito de interferência[5], o qual é importante quando existem pormenores geométricos de pequenas dimensões tais como películas finas, por exemplo.

Um outro fenómeno inerente à óptica ondulatória é a polarização, a qual se deve ao facto da luz ser uma onda electromagnética composta por duas ondas independentes mas vibrando perpendicularmente entre si. A luz é polarizada quando estas ondas elementares são total ou parcialmente coerentes, ou têm amplitudes diferentes. A polarização é importante na simulação de materiais dieléctricos tais como água ou vidro, por exemplo. Nestes materiais, o espalhamento da luz depende fortemente da polarização da luz incidente, resultando que a modelação do espalhamento da luz transmitida se torna muito complicada.

2.1.1.3. Óptica Quântica

A óptica quântica é o modelo mais exacto e pormenorizado da descrição do comportamento da luz – electrodinâmica quântica, [Feynman90]. Alguns dos fenómenos que só este modelo descreve são relevantes e, em algumas aplicações, não podem ser ignorados [Glassner95].

A fluorescência é um efeito que ocorre quando os fotões são absorvidos por uma molécula e um novo fotão é emitido com um comprimento de onda diferente. Este efeito distingue-se da fosforescência, na qual os fotões são absorvidos e mais tarde emitidos, com ou sem alteração do comprimento de onda. Com o aparecimento dos laseres descobriram-se os fenómenos ópticos não-lineares[6], tais como, por exemplo, os fenómenos de alteração do comprimento de onda de um feixe laser dependentes da intensidade luminosa desse feixe. Outros fenómenos apenas explicáveis por este modelo são o efeito fotoeléctrico e os efeitos relacionados com as leis da relatividade (efeitos gravitacionais, por exemplo), mas estes são praticamente irrelevantes nas situações mais comuns do mundo que nos rodeia.

A fim de mostrar que o espalhamento da luz se rege por leis simples a uma escala microscópica, mas resultando em efeitos macroscópicos complexos, na Fig. 1 representa-se a interpretação da reflexão segundo o modelo da óptica geométrica, de acordo com a lei em que se diz que "um espelho ideal reflecte a luz quando o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência". Poder-se-ia pensar que o comportamento dos fotões que atingem o olho do observador vindos da fonte de luz seria idêntico, todos eles sofrendo um fenómeno de reflexão ideal no mesmo local do espelho.

[4] Dimensões reduzidas significa com tamanho da ordem de alguns comprimentos de onda da luz.
[5] A interferência pode ser construtiva (correlação positiva) ou destrutiva (correlação negativa).
[6] A óptica diz-se linear quando, num sistema óptico, o feixe luminoso de saída é uma função linear dos feixes ópticos de entrada.

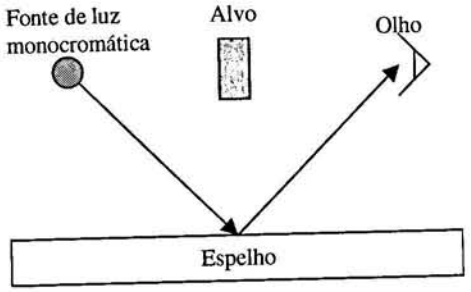


Fig. 1 – Reflexão num espelho (óptica geométrica)

No modelo da óptica quântica, os fotões possuem, para além da suas coordenadas de posição, direcção e frequência (ou comprimento de onda), uma coordenada adicional (fase), que pode ser comparada a uma seta interna que gira a uma velocidade dependente da sua frequência, ie, da sua cor. A interpretação da reflexão ideal segundo o modelo da óptica quântica, apresentada na Fig. 2, diz que a luz tem uma probabilidade igual de se reflectir em qualquer ponto da superfície do espelho. No entanto, dado que os comprimentos dos infinitos trajectos possíveis são diferentes, os fotões que chegam ao olho apresentam diferentes valores de fase. Pelo facto dos contributos dos fotões que se reflectem no centro do espelho serem semelhantes, ie, as distâncias diferem muito pouco e as fases são quase iguais, o efeito macroscópico resultante é parecer que "a reflexão apenas acontece num único local do espelho". Na realidade, os contributos dos fotões que apresentam outros trajectos tendem a anular-se mutuamente, resultando macroscopicamente insignificantes.

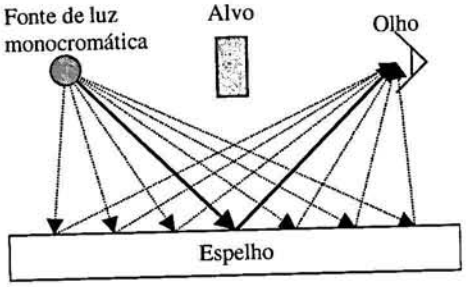


Fig. 2 – Reflexão num espelho (óptica quântica)

Uma confirmação deste fenómeno é o efeito de difracção, conforme se apresenta na Fig. 3 (rede de difracção). Este verifica-se quando uma superfície possui zonas não-reflectivas (por exemplo, zonas raspadas) com dimensões da ordem do comprimento de onda da luz, fazendo com que os efeitos de cancelamento de fotões com fases opostas deixem de ser significativos. O resultado macroscópico é a visualização de reflexões fortes em zonas "inesperadas" do espelho.

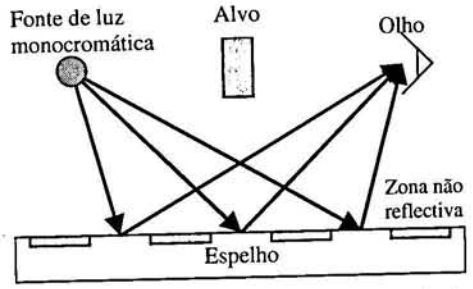


Fig. 3 – Rede de difracção (óptica quântica)

Este fenómeno explica-se facilmente no modelo da óptica quântica e requer a utilização dos conceitos de comprimento de onda e de fase na descrição do comportamento dos fotões.

2.1.2. Problemas Relacionados

Existem problemas noutras áreas da física e da engenharia que possuem semelhanças com o transporte da luz (transporte de neutrões, transporte do som, etc). Em alguns casos, técnicas actualmente utilizadas na computação gráfica foram inicialmente descobertas na resolução de problemas dessas áreas – por exemplo, o algoritmo de radiosidade [Goral84]. Porém, as premissas são de tal modo diferentes que geralmente é difícil aplicar directamente resultados dessas áreas na computação gráfica.

Uma diferença notável surge na representação dos resultados, quase sempre efectuada através de imagens. Na física e na engenharia, as imagens não são importantes, dado que, normalmente, se pretende obter um conjunto de valores numéricos ou uma representação, sob a forma de função, dos resultados no domínio do problema.

A medida da qualidade da solução também é uma distinção importante. Noutras áreas, os resultados são quantitativamente exactos, de acordo com métricas de erro bem definidas. Na computação gráfica, mais concretamente na síntese de imagem, as métricas de erro são eminentemente perceptuais e difíceis de exprimir explicitamente, embora o trabalho de [Rushmeier95] sugira alternativas prometedoras. Certos defeitos visuais (bandas de *Mach* e descontinuidades inverosímeis, por exemplo) são muito importantes na computação gráfica, mas são aceitáveis noutras áreas.

2.1.2.1. Transporte de Neutrões

O transporte da luz tem algumas semelhanças com o transporte de neutrões. Em ambos os casos, é a mesma equação que os descreve: a equação de Boltzmann. Esta descreve o transporte de partículas que não interagem mutuamente, sendo um dos pilares da teoria do transporte, a qual estuda o transporte de partículas genéricas, independentemente do seu significado físico.

Porém, no caso do transporte de neutrões, a simulação do meio é absolutamente essencial e não pode ser desprezada. Como os neutrões penetram muito mais dentro dos objectos do que os fotões, o espalhamento volumétrico dos neutrões e a sua emissão são os fenómenos dominantes (o espalhamento e emissão na superfície dos objectos é ignorada). Também os fenómenos com neutrões equivalentes à fluorescência e à fosforescência ópticas são importantes e não podem ser ignorados.

Apesar destas e de outras diferenças, muitas técnicas do transporte de neutrões podem ser facilmente adaptadas à computação gráfica; muitas técnicas estocásticas usadas na computação gráfica provêm desta área.

2.1.2.2. Transporte do Calor

Dos três mecanismos de transferência do calor (condução, convecção e radiação), apenas a radiação se assemelha ao transporte da luz, pelo que esta é uma diferença primordial. Outra diferença importante reside no facto da transferência do calor ser frequentemente não-linear, mas a transferência radiativa do calor (transporte do calor) é sempre linear.

O transporte do calor também possui algumas semelhanças com o transporte da luz. No caso do transporte do calor, os fotões possuem um comprimento de onda superior (na região infravermelha do espectro). A maior parte dos algoritmos usados para resolver problemas de

transferência do calor baseiam-se em técnicas de elementos finitos, gerando soluções globais que facilitam a incorporação dos efeitos resultantes da condução e convecção. As abordagens de elementos finitos usadas na computação gráfica provêm quase todas desta área.

2.1.2.3. Propagação do Som

Dado que os comprimentos de onda dos sons audíveis pelos seres humanos se assemelham às dimensões dos objectos do mundo real (em escalas entre o centímetro e o metro), os efeitos ondulatórios na propagação do som não podem ser ignorados. Este e outros tipos de problemas baseiam-se na equação de onda, uma equação diferencial parcial que descreve o modo de propagação das ondas ao longo do tempo, que, embora seja uma representação geral e versátil, é muito complicada de usar na resolução de problemas reais. Para obviar a tal complexidade, desenvolveram-se formulações alternativas, mais fáceis de resolver, em que se remove a dependência do tempo[7].

Alguns dos métodos existentes para simular o espalhamento do som e de outras radiações podem ser aplicados à computação gráfica, embora isso não seja comum. Tal permitiria simular correctamente todos os fenómenos da óptica ondulatória e ainda a difracção e a interferência, o que pode ter interesse em problemas em que a natureza ondulatória da luz é relevante.

2.1.3. Radiometria e Transporte da Luz

A radiometria estuda os modos de medir a radiação electromagnética. É uma das bases da computação gráfica, dado que a luz é parte da referida radiação; isso justifica a sua importância na formulação dos algoritmos de simulação do transporte da luz.

A formulação analítica do transporte da luz recorre a um conceito muito importante denominado função de distribuição bidireccional do espalhamento da luz (BSDF[8] [Westin92]), o qual descreve matematicamente o modo como a luz é espalhada por uma superfície. O conceito de BSDF é usado nas equações básicas do transporte da luz, pelo que se fará, de seguida, uma descrição com algum pormenor.

2.1.3.1. Grandezas Radiométricas

As grandezas radiométricas podem ser definidas no contexto geral da teoria de transporte, a qual estuda o movimento de partículas de um modo abstracto. Cada partícula caracteriza-se por um determinado número de parâmetros, os quais dependem do tempo. Neutrões, fotões e moléculas de gás são exemplos de partículas que podem ser representadas pela sua posição e velocidade, ie, cada partícula possui 6 graus de liberdade. No caso de um sistema de N partículas, a sua representação faz-se através de um vector $6N$-dimensional, o qual pode ser imaginado como um ponto a deslocar-se num espaço de fase $6N$-dimensional, capaz de descrever todos os estados possíveis. A evolução temporal deste sistema corresponde a uma curva unidimensional no espaço de fase.

No caso da luz ser considerada despolarizada e perfeitamente incoerente, cada fotão pode ser descrito pela sua posição, direcção de movimento e comprimento de onda. Um sistema de N fotões corresponde portanto a um espaço de fase $6N$-dimensional. Uma alternativa mais comum, utilizada quando as partículas não interagem mutuamente, como é o caso de fotões, é considerar que o espaço de fase corresponde à descrição de uma única partícula. Assim, o espaço de fase ψ

[7] A solução representa assim um estado de equilíbrio.
[8] BSDF – *bidireccional scattering distribution function.*

é 6-dimensional e um sistema de N partículas é descrito por uma nuvem de N pontos, que evolui nesse espaço em função do tempo (R^3 – posição; S^2 – direcção; R^+ – comprimento de onda).

Eq. 1 $$\psi = R^3 \times S^2 \times R^+$$

Algumas grandezas radiométricas podem ser definidas através da contagem do número de fotões numa determinada região do espaço de fase ou através da medição da sua densidade em relação a um ou vários parâmetros. Uma noção mais geral de grandezas radiométricas considera o tempo como mais um parâmetro, o que origina o denominado espaço de trajectória Ψ (R – tempo; ψ – espaço de fase).

Eq. 2 $$\Psi = R \times \psi$$

Um sistema de N fotões origina um conjunto de curvas unidimensionais no espaço de trajectória. As medições radiométricas definem-se através da especificação de eventos fotónicos ao longos dessas curvas e da medição da distribuição dos referidos eventos. Um evento fotónico (um ponto no espaço Ψ) pode ter uma definição natural (emissão, absorção ou espalhamento) ou uma definição artificial. Por exemplo, uma superfície em Ψ que intersecta as curvas de fotões num determinado número de pontos; no caso de ser o instante temporal t_a, essa superfície é o plano $t = t_a$.

Na definição de grandezas radiométricas é conveniente assumir que os eventos são tão numerosos que a sua densidade pode ser modelada através de distribuições contínuas. Assim, por exemplo, em vez de se contar o número de eventos numa dada região de Ψ, calcula-se a sua energia radiante total Q. Embora Q seja uma grandeza discreta, devido ao facto da energia de um fotão ser sempre múltipla da energia elementar[9] h/λ, para todos os efeitos práticos considera-se que Q pode assumir qualquer valor real não-negativo.

A potência radiante ou fluxo define-se como sendo a energia por unidade de tempo

Eq. 3 $$\Phi = \frac{dQ}{dt} \text{ [W]}$$

A irradiância é a potência por unidade de área de superfície

Eq. 4 $$E(x) = \frac{d\Phi(x)}{dA(x)} \text{ [W} \times \text{m}^{-2}\text{]}$$

Note-se que a irradiância define-se sempre em relação a um ponto x numa superfície S, possuindo uma normal $N(x)$, e associa-se à radiação incidente. No caso da luz que abandona a superfície, designa-se radiância exitante ou radiosidade.

A radiância é definida como sendo a potência por unidade de área de superfície projectada dentro de um ângulo sólido infinitesimal

Eq. 5 $$L(x,\omega) = \frac{d^2\Phi(x,\omega)}{dA_\omega^\perp(x)\,d\sigma(\omega)} \text{ [W} \times \text{m}^{-2} \times \text{sr}^{-1}\text{]}$$

A radiância no ponto (x,ω) define-se pela contagem do número de fotões que passam, por unidade de tempo, numa superfície infinitesimal $dA_\omega^\perp(x)$ perpendicular à direcção ω e cujas direcções estejam contidas no ângulo sólido infinitesimal $d\sigma(\omega)$ em torno de ω. Uma representação mais conveniente da radiância que sai de uma superfície S é

[9] h é a constante de Planck e λ é o comprimento de onda.

Eq. 6
$$L(x,\omega) = \frac{d^2\Phi(x,\omega)}{|\omega \cdot \mathrm{N}(x)| dA(x) d\sigma(\omega)}$$

em que A é uma área elementar de S e N(x) representa a normal à superfície S no ponto x. Caso se deseje utilizar o ângulo sólido projectado $d\sigma_x^{\perp}(\omega)$, então a radiância representa-se por

Eq. 7
$$L(x,\omega) = \frac{d^2\Phi(x,\omega)}{dA(x) d\sigma_x^{\perp}(\omega)}$$

A radiância espectral define-se como sendo a radiância por comprimento de onda

Eq. 8
$$L_\lambda(x,\omega,\lambda) = \frac{d^3\Phi(x,\omega,\lambda)}{dA(x) d\sigma_x^{\perp}(\omega) d\lambda} [\mathrm{W \times m^{-3} \times sr^{-1}}]$$

A radiância espectral é a grandeza fundamental, a partir da qual todas as outras podem ser derivadas. Por exemplo, a radiância é

Eq. 9
$$L(x,\omega) = \int_0^\infty L_\lambda(x,\omega,\lambda) d\lambda$$

Esta é a grandeza manipulada pela maioria dos algoritmos de simulação do transporte da luz, embora seja incorrectamente abreviada por radiância[10].

2.1.3.2. Funções de Radiância

Uma função de radiância é uma função cujos valores são medidas de radiância. Geralmente essas funções são do tipo

$$L : M \times S^2 \rightarrow \mathrm{R}$$

sendo M o conjunto de superfícies da cena e S^2 uma direcção. No caso deste trabalho, as funções de radiância são do tipo

$$L : \mathrm{R}^3 \times S^2 \rightarrow \mathrm{R}$$

em que R^3 representa a posição e S^2 uma direcção. A distinção entre funções de radiância incidente e exitante faz-se através do parâmetro ω. Uma função incidente $L_i(x,\omega)$ mede a radiância que atinge x segundo a direcção ω. Ao invés, uma função exitante $L_o(x,\omega)$ mede a radiância que abandona x segundo a direcção ω. No espaço desobstruído verifica-se a seguinte relação

Eq. 10
$$L_i(x,\omega) = L_o(x,-\omega)$$

Na reflexão em superfícies, a distinção é mais importante, dado que L_i e L_o representam conjuntos diferentes de eventos fotónicos, um correspondente ao instante ligeiramente antes da chegada à superfície, o outro correspondente ao instante ligeiramente depois da partida, respectivamente. Note-se que os fotões espalhados num ponto de uma superfície mudam instantaneamente de direcção e/ou comprimento de onda, pelos que as diferenças entre L_i e L_o são geralmente muito grandes e dependem da natureza do material da superfície. As diferenças entre L_i e L_o estão na base daquilo que os seres humanos "vêm".

[10] Muitas vezes a radiância espectral é discretizada em três comprimentos de onda (vermelho, verde e azul).

A função BSDF é uma descrição matemática das propriedades de espalhamento da luz numa superfície que actua como uma constante de proporcionalidade entre L_i, mais concretamente a irradiância E_i, e L_o

Eq. 11
$$f_s(x,\omega_i,\omega_o)=\frac{dL_o(x,\omega_o)}{dE_i(x,\omega_i)}=\frac{dL_o(x,\omega_o)}{L_i(x,\omega_i)d\sigma_x^{\perp}(\omega_i)}\ [\mathrm{sr}^{-1}]$$

Na realidade, uma descrição completa do espalhamento da luz numa superfície deve também ter em conta os fenómenos de polarização, fluorescência e fosforescência, os quais podem depender da posição na superfície. Porém, na prática, ignoram-se esses fenómenos e também a dependência espacial, pelo que resulta apenas uma função de dois ângulos.

Eq. 12
$$f_s(\omega_i,\omega_o)=\frac{dL_o(\omega_o)}{dE_i(\omega_i)}=\frac{dL_o(\omega_o)}{L_i(\omega_i)d\sigma^{\perp}(\omega_i)}\ [\mathrm{sr}^{-1}]$$

Frequentemente, o BSDF é subdividido em componentes reflectidos (BRDF) e transmitidos (BTDF), os quais são manipulados separadamente. Ambos são obtidos através da restrição do domínio angular aos hemisférios apropriados. Um BSDF (f_s) é composto de dois BRDF's (f_r) e dois BTDF's[11] (f_t), no caso geral.

$$f_r : H_i^2 \times H_r^2 \rightarrow \mathrm{R}\ ;\ f_t : H_i^2 \times H_t^2 \rightarrow \mathrm{R}$$

sendo H_i o hemisfério associado ao raio incidente e H_r o hemisfério associado ao raio reflectido. Dado que a maior parte das superfícies dos objectos do mundo real é opaca, ie, não ocorre transmissão da luz, o BSDF é composto por apenas um BRDF; nestes casos, utilizar BRDF em vez de BSDF não apresenta problemas. Os BRDF's de superfícies do mundo real possuem propriedades importantes, a reversibilidade e a conservação da energia:

Reversibilidade do BRDF (princípio da reciprocidade)

Eq. 13
$$f_r(\omega_i,\omega_o)=f_r(\omega_o,\omega_i)\ ;\ \forall\ \omega_i,\omega_o \in S^2$$

Conservação da energia do BRDF

Eq. 14
$$\int_{H_o^2} f_r(\omega_i,\omega_o)d\sigma^{\perp}(\omega_o)\le 1\ ;\ \forall\ \omega_i \in H_i^2$$

Estas propriedades aplicam-se apenas à reflexão. No caso da transmissão, nem sempre se verificam. O princípio da reciprocidade geral, aplicável a BSDF's de superfícies fisicamente válidas, leva em conta o índice de refracção dos meios envolvidos[12]

Reversibilidade do BSDF ($\eta_i = \eta(\omega_i)$; $\eta_o = \eta(\omega_o)$ – índices de refracção funções de ω)

Eq. 15
$$\frac{f_s(\omega_i,\omega_o)}{\eta_o^2}=\frac{f_s(\omega_o,\omega_i)}{\eta_i^2}\ ;\ \forall\ \omega_i,\omega_o \in S^2$$

A formulação do princípio da reciprocidade, no caso do comprimento de onda ser levado em conta, ie, descrito em termos de radiância espectral, é

Eq. 16
$$\frac{f_{s,\lambda}(\omega_i,\omega_o,\lambda_o/\eta_i)}{\eta_o^3(\lambda_o)}=\frac{f_{s,\lambda}(\omega_o,\omega_i,\lambda_o/\eta_o)}{\eta_i^3(\lambda_o)}\ ;\ \forall\ \omega_i,\omega_o \in S^2$$

[11] Reflexão e transmissão em ambos os lados.

[12] Este princípio assume que não existe absorção (os meios são não-participantes) e que não existem campos magnéticos externos.

sendo λ_o o comprimento de onda da luz no vácuo. No caso de superfícies fisicamente válidas, o princípio da conservação da energia do BSDF é idêntico ao do BRDF:

Conservação da energia do BSDF

Eq. 17 $$\int_{S^2} f_s(\omega_i,\omega_o)d\sigma^{\perp}(\omega_o) \leq 1 \; ; \forall \; \omega_i \in S^2$$

2.1.3.3. Transporte da Radiância e da Importância

O objectivo final do transporte da luz é determinar um conjunto de valores reais (por exemplo, pixels). Cada valor medido corresponde ao resultado da operação de um sensor virtual que reage à radiância incidente. A resposta depende da posição e direcção da luz que atinge o sensor. Cada sensor possui uma sensibilidade $W_e(x,\omega)$, sendo a resposta total calculada através da integração do produto W_eL_i. A equação de medida é

Eq. 18 $$I = \int_{M\times S^2} W_e(x,\omega)L_i(x,\omega)dA(x)d\sigma_x^{\perp}(\omega)$$

Existirá uma equação de medida por cada medida a efectuar, em cada uma utilizando-se a sensibilidade do sensor associado.

Geralmente, pretende-se determinar o estado de equilíbrio da função de radiância na cena[13]. Nesse caso, sendo $x_M(x,\omega)$ a função de *ray-casting*[14], a formulação da equação do transporte da luz é

Eq. 19 $$L(x,\omega) = L_e(x,\omega) + \int_{S^2} L(x_M(x,\omega_i),-\omega_i)f_s(x,\omega_i,\omega)d\sigma_x^{\perp}(\omega_i)$$

A equação do transporte da luz apresentada descreve o espalhamento da luz emitida pelas fontes de luz, sendo esta descrita através da radiância. No entanto, também se podem formular equações relacionadas com os sensores, considerando-se a sensibilidade $W_e(x,\omega)$ como uma grandeza emitida; esta designa-se função de importância emitida, dado que W_e representa a importância da luz que chega ao sensor. Esta é a ideia subjacente aos métodos duais, em que as regras de transporte são aplicadas à importância em vez da radiância. A equação do transporte da importância é

Eq. 20 $$W(x,\omega) = W_e(x,\omega) + \int_{S^2} W(x_M(x,\omega_i),-\omega_i)f_s(x,\omega,\omega_i)d\sigma_x^{\perp}(\omega_i)$$

O BSDF dual f_s^* de um BSDF f_s define-se como sendo

Eq. 21 $$f_s^*(\omega_i,\omega_o) = f_s(\omega_o,\omega_i) \; ; \forall \; \omega_i,\omega_o \in S^2$$

A principal vantagem de um BSDF dual é permitir obter uma equação de transporte de importância semelhante à da radiância, sendo usado em algoritmos para determinar a importância e espalhar as partículas da luz. O BSDF comum permite determinar a radiância e espalhar as "partículas" da importância.

[13] O olho humano só é capaz de ver estados de equilíbrios da função de radiância, dado que a velocidade da luz é muito elevada.

[14] A função de *ray-casting* $x_M(x,\omega)$ determina o ponto mais próximo de x segundo a direcção ω, o que faz com que $L_i(x,\omega) = L_o(x_M(x,\omega),-\omega)$.

2.1.4. Formulações Operacionais do Transporte da Luz

Pode considerar-se que o transporte da luz é composto por dois mecanismos que se sucedem alternadamente: o espalhamento, que descreve a interacção dos fotões com as superfícies, e a propagação, que descreve o modo como os fotões viajam em linha recta através de um meio.

Um operador linear F é uma função linear $\mathbf{A}:F\rightarrow F$, cujo domínio é um espaço vectorial F. No caso do transporte da luz, F é um espaço vectorial de funções de radiância.

O operador de espalhamento K define-se através de

Eq. 22 $$(\mathrm{K}h)(x,\omega)=\int_{S^2} f_s(x,\omega_i,\omega)h(x,\omega_i)d\sigma_x^{\perp}(\omega_i)$$

Quando se aplica este operador a uma função de radiância incidente L_i, obtém-se a radiância exitante $L_o = \mathrm{K}L_i$ resultante de uma operação de espalhamento da luz.

O operador de propagação G é definido como sendo

Eq. 23 $$(\mathrm{G}h)(x,\omega_i)=\begin{cases} h(x_M(x,\omega_i),-\omega_i) \Leftarrow x_M(x,\omega_i)\in M \\ 0 \end{cases}$$

Este operador descreve a radiância incidente $L_i = \mathrm{G}L_o$, em termos das radiâncias exitantes L_o das superfícies da cena. A composição destes operadores origina o operador do transporte da luz T

Eq. 24 $$\mathrm{T}=\mathrm{KG}$$

A aplicação deste operador a uma radiância exitante L_o produz uma radiância exitante $\mathrm{T}L_o$, resultante de uma operação de transporte da luz. Para se determinar a radiância L no estado de equilíbrio, tem que se verificar

Eq. 25 $$L=L_e+\mathrm{T}L$$

em que L_e é a radiância emitida pelas fontes de luz – esta equação é uma versão operacional da equação do transporte da luz. Resolvendo esta equação em ordem a L, obtém-se[15]

Eq. 26 $$L=L_e+\mathrm{T}L_e+\mathrm{T}^2L_e+\mathrm{T}^3L_e+\ldots$$

Esta equação mostra que L pode ser considerado como a adição da luz emitida pelas fontes de luz, mais a luz espalhada uma vez, duas vezes, etc, sendo esta formulação correcta para superfícies fisicamente válidas.

Em termos do transporte da importância através de operadores duais, também se verifica que

Eq. 27 $$W=W_e+\mathrm{T}_W W$$

definindo-se $\mathrm{T}_W = \mathrm{K}^*\mathrm{G}$, em que K^* é o operador dual de K[16]. Quando $\mathrm{K} = \mathrm{K}^*$, ie, se não existem BSDF's assimétricos, verifica-se que $\mathrm{T} = \mathrm{T}_W$. No caso geral, porém, a radiância e a importância possuem equações de transporte diferentes

Eq. 28 $$\mathrm{T}_L=\mathrm{KG};\ \mathrm{T}_W=\mathrm{K}^*\mathrm{G}$$

o que pode originar problemas em métodos de simulação do transporte da luz que usem o mesmo algoritmo para simular o transporte da radiância e da importância.

---

[15] O operador T tem de respeitar algumas condições associadas a normas para que a equação apresentada seja válida.

[16] Na realidade é $\mathrm{T}_W = \mathrm{K}^*\mathrm{G}^*$, mas G^* é igual a G.

Em [Veach97] é proposto um novo enquadramento dos operadores de transporte por forma a resolver o problema. A solução baseia-se na alteração da definição do operador de espalhamento K, de modo a ser usado f_s/η_o^2 em vez de f_s[17]. Para tal, sugere a utilização de $d\sigma_x^{\perp\prime}(\omega) = \eta^2(x,\omega)\, d\sigma_x^{\perp}(\omega)$ em vez de $d\sigma_x^{\perp}(\omega)$ em todas as definições e relações radiométricas, sendo $d\sigma_x^{\perp\prime}(\omega)$ designado o ângulo sólido projectado básico. Algumas das novas definições que decorrem desse enquadramento são:

Radiância básica

Eq. 29
$$L'(x,\omega) = L(x,\omega)/\eta^2(x,\omega)$$

BSDF básico[18]

Eq. 30
$$f_s'(x,\omega_i,\omega_o) = f_s(x,\omega_i,\omega_o)/\eta^2(x,\omega_o)$$

Usando estas definições de radiância e BSDF básico, os operadores de transporte passam a ser

Eq. 31
$$\mathrm{T}_{L'} = \mathrm{T}_W = \mathrm{K}'\mathrm{G}$$

ie, a radiância básica e a importância obedecem à mesma equação de transporte. Estas duas grandezas deveriam ser as grandezas usadas por todos os algoritmos de simulação do transporte da luz, sobretudo aqueles que empregam a importância para comandar os cálculos [Veach97].

A existência de um operador de transporte comum para a radiância básica e importância indicia que essas entidades são afinal a mesma e que apenas as suas interpretações são diferentes. Por exemplo, se a tomada de vista da cena for considerada uma fonte emissora de importância, o estado de equilíbrio da sua distribuição representa a "importância" dos diferentes objectos em termos de um observador colocado nessa tomada de vista. Em contrapartida, a distribuição direccional de radiância que converge nessa tomada de vista representa a "visão" que um observador tem da cena. A principal vantagem do enquadramento de Veach é permitir usar um único algoritmo de transporte para calcular essas grandezas, bastando para tal que respeite a Eq. 31.

2.1.5. Algoritmos de Simulação do Transporte da Luz

Na computação gráfica, geralmente assume-se que a óptica pode ser representada por um modelo baseado na óptica geométrica – a luz é emitida, espalhada e absorvida somente nas superfícies dos objectos, e viaja ao longo de linhas rectas entre superfícies. Os efeitos ignorados pela óptica geométrica não são significativos na maior parte dos ambientes reais; pelo contrário, esta é adequada para modelar e representar quase tudo o que se vê no mundo real com um elevado grau de exactidão. Isto explica porque quase todos os algoritmos de simulação do transporte da luz se baseiam nas premissas da óptica geométrica.

De um modo geral, os algoritmos de simulação do transporte da luz podem ser divididos em dois grupos: métodos de Monte Carlo e métodos de elementos finitos.

Os métodos de Monte Carlo foram empregues inicialmente em [Appel68], mas foi em [Whitted80] que se definiu o conceito de traçagem de raios e se sugeriu a ideia de aplicar perturbações de carácter aleatório aos raios de visualização. Esta ideia foi implementada em [Cook84] e alargada à amostragem aleatória de fontes de luz, lentes, etc. O primeiro algoritmo

[17] f_s/η_o^2 é uma função simétrica.
[18] O BSDF básico de superfícies reais é simétrico e obedece ao princípio de conservação de energia.

não-tendencioso[19] de simulação do transporte da luz baseado em métodos de Monte Carlo surgiu em [Kajiya86], no qual se compreendeu que o problema podia ser descrito através de uma equação integral. Os algoritmos tendenciosos de simulação do transporte da luz surgiram em [Ward88] e têm sido desde então muito estudados, dado serem mais eficientes do que os algoritmos não-tendenciosos, na medida em que concentram os seus esforços de cálculo na determinação dos fenómenos mais relevantes para o observador, ie, tendem a orientar os seus cálculos.

Os primeiros algoritmos de simulação do transporte da luz baseados em métodos de elementos finitos foram quase todos adaptados da área da transferência do calor. Em [Goral84] aplicaram-se estes métodos na computação gráfica, tendo sido designados algoritmos de radiosidade. Muitos melhoramentos foram desde então introduzidos neste tipo de algoritmos.

Foram desenvolvidos alguns métodos mistos ([Wallace87], [Sillion89], [Shirley90], [Chen91] e [Pattanaik95]) que combinam características de Monte Carlo com elementos finitos, geralmente sob a forma de métodos multi-passo, ie, efectuando vários passos de processamento de radiância de modo a resolver mais eficientemente problemas de transporte da luz em cenas complexas.

Um aspecto vantajoso adicional dos algoritmos baseados em métodos de Monte Carlo é a maior facilidade de implementações paralelas, ie, de utilizar vários dispositivos de computação em simultâneo para simular o transporte da luz [Reinhard98].

2.1.5.1. Abordagem Determinística versus Estocástica

De um modo geral, os algoritmos de Monte Carlo são mais abrangentes, ie, são capazes de modelar praticamente todas as cenas com razoável exactidão. Pelo contrário, os algoritmos determinísticos estão frequentemente restringidos a cenas com geometrias e materiais especiais (polígonos e reflectores difusos ideais). Estas restrições tornam difícil a modelação de cenas reais.

Outra diferença importante é o modo como estes algoritmos acedem ao modelo da cena. Geralmente, os algoritmos determinísticos utilizam representações explícitas da cena do tipo listas de polígonos, o que afecta significativamente o tamanho e a complexidade da descrição da cena. Pelo contrário, os algoritmos de Monte Carlo baseiam-se em amostragem, através da qual o modelo da cena é consultado através de "perguntas" independentes do modo de descrição da cena[20]. Esta interface abstracta esconde a complexidade da cena dos métodos de cálculo da radiância, o que faz com que os tempos de processamento não sejam normalmente afectados pelo método de descrição da cena. Este aspecto é muito importante do ponto de vista de robustez. O desempenho dos algoritmos de simulação do transporte da luz deveria depender apenas daquilo que a cena representa e não do modo como ela está representada.

Refira-se, no entanto, que a distinção entre estes tipos de algoritmos nem sempre é tão nítida, dado que os algoritmos de Monte Carlo utilizam vários tipos de números "aleatórios" – o único requisito em comum é que os referidos números tenham uma distribuição uniforme. Existem padrões de geração desses números que satisfazem o conceito lato de "número aleatório" e que originam melhores desempenhos. São designados métodos quasi-Monte Carlo [Niederreiter92].

[19] Nota de tradução: *unbiased* – não-tendencioso e *biased* - tendencioso.
[20] Exemplo: qual a superfície mais próxima intersectada por um determinado raio?

2.1.5.2. Dependência da Tomada de Vista

Geralmente, o objectivo dos algoritmos de simulação do transporte da luz é produzir imagens, arranjos regulares de valores de cores, apropriados para visualização em dispositivos tais como ecrãs, impressoras, etc. Um algoritmo designa-se independente da tomada de vista se computa uma representação intermédia da solução, a partir da qual diversas tomadas de vistas podem facilmente ser computadas. Por oposição, os outros algoritmos dizem-se dependentes da tomada de vista, de que os mais comuns são os algoritmos que operam no espaço de imagem, ie, que calculam uma imagem directamente da cena sem tentar representar soluções gerais, nos quais se incluem os algoritmos de Monte Carlo[21].

Um problema importante dos algoritmos independentes da tomada de vista é que eles não quantificam os erros cometidos. Dado que o erro é medido de um modo global, distribuído por toda a cena, podem surgir casos de tomadas de vista em que os erros locais são grandes e os resultados parcial ou totalmente errados. Este tipo de algoritmo também tende a ser mais "pesado" de um ponto de vista computacional, porque computa uma representação da solução global. A presença de materiais especulares complica frequentemente a situação, além de outros motivos, porque este tipo de materiais tem uma aparência visual que é largamente dependente da tomada de vista escolhida.

Embora ambos os tipos de algoritmo computem um conjunto finito de medições lineares da solução global, no caso dos algoritmos dependentes da tomada de vista essas medições são efectuadas para calcular valores de pixels, sendo o valor de cada pixel obtido através da integração da radiância incidente numa região pequena do plano da imagem. No outro caso, essas medições são efectuadas em pontos distribuídos pela cena e calculam-se outras grandezas mais "simples" que não a radiância (a radiosidade, por exemplo).

2.2. VISÃO E LUMINOTECNIA

O sistema visual humano recebe informação radiométrica do ambiente envolvente e realiza um tratamento complexo dessa informação, por forma a produzir uma imagem mental adequada à integração do indivíduo no ambiente. A função plenóptica descreve o fluxo da luz numa cena através de uma função de cinco parâmetros e é o melhor modelo computacional existente do processamento visual [Adelson91]. Os trabalhos [Gortler96] e [Levoy96] apresentam duas metodologias diferentes de modelação da função plenóptica, embora as aplicações práticas resultantes sejam ainda muito incipientes devido à elevada complexidade computacional inerente ao tratamento da referida função.

A percepção visual humana, que se distingue da percepção visual de outros seres vivos, descreve o modo como os raios luminosos que entram no olho são processados pelos orgãos da visão e pelo cérebro humano, envolvido não só na percepção, mas também noutras funções relacionadas com a visão. Para se compreender a percepção humana, é necessário conhecer a natureza da luz e as diferentes formas como ela é aprendida (cor, brilho, etc). Conhecidos os principais fundamentos da percepção, a luminotecnia procura estudar os modos de iluminar os espaços por forma a produzir ambientes com qualidade visual [Gardner93]. Estes temas são abordados detalhadamente nas secções seguintes.

[21] Outros exemplos são os algoritmos baseados na importância (dual da radiância) e os de multi-passos.

2.2.1. Natureza da Luz

Um "raio de luz" é um transporte de energia sob duas formas correlacionadas: partícula e onda. No caso corpuscular, a luz é formada por uma nuvem de fotões portadores de uma quantidade de energia, inversamente proporcional ao seu comprimento de onda. No caso ondulatório, a luz é tratada como sendo uma radiação electromagnética. Apesar da gama de comprimentos de onda da luz ser quase contínua, tipicamente considera-se que é composta por conjuntos de raios luminosos monocromáticos, cada um correspondendo a uma faixa estreita de comprimentos de onda próximos.

Esta divisão prática do espectro de comprimentos de onda da luz visível em componentes monocromáticos está na origem do conceito de cor. A colorimetria aborda o tratamento quantitativo da cor através de um conjunto vasto de convenções.

A radiação que o olho humano é capaz de converter em sensações luminosas é uma parte ínfima do espectro de radiação existente (raios cósmicos, raios gama, etc). A visibilidade humana média situa-se entre os 380nm e os 780nm (espectro visível).

2.2.1.1. A Cor

Através da combinação de três fontes luminosas coloridas diferentes[22] é possível recriar quase todas as cores visíveis existentes na natureza. Tipicamente, essas cores primárias são o vermelho, o verde e o azul. Estas três cores podem ser usadas para formar um espaço de cor, ie, um sistema de coordenadas tridimensional em que cada cor é expressa como sendo uma combinação linear das cores primárias. As coordenadas de uma determinada cor nesse espaço são designadas componentes tricromáticos P_i

Eq. 32
$$P_i = \int_{380nm}^{780nm} E(\lambda)\sigma_i(\lambda)d\lambda$$

sendo $E(\lambda)$ a distribuição espectral de energia e $\sigma_i(\lambda)$ as funções tricromáticas. As funções tricromáticas $\sigma_i(\lambda)$ podem ser definidas de diversas formas, a cada uma correspondendo um sistema de cor distinto. O sistema RGB da *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE) usa como cores base o vermelho (700nm), o verde (546nm) e o azul (436nm); para cada cor primária foi definida uma função que representa a sua resposta em termos do comprimento de onda, pelo que resulta que os componentes tricromáticos do sistema RGB-CIE são

Eq. 33
$$\begin{cases} R = K_m \int_{380nm}^{780nm} E(\lambda)r(\lambda)d\lambda \\ G = K_m \int_{380nm}^{780nm} E(\lambda)g(\lambda)d\lambda \\ B = K_m \int_{380nm}^{780nm} E(\lambda)b(\lambda)d\lambda \end{cases}$$

em que K_m=680 [lm×W^{-1}]. Outro sistema importante é o sistema XYZ-CIE, em que as cores primárias X, Y e Z não têm existência real.

Eq. 34
$$\begin{cases} X = K \int_{380nm}^{780nm} E(\lambda)x(\lambda)d\lambda \\ Y = K \int_{380nm}^{780nm} E(\lambda)y(\lambda)d\lambda \\ Z = K \int_{380nm}^{780nm} E(\lambda)z(\lambda)d\lambda \end{cases}$$

[22] Designadas cores primárias.

As funções tricromáticas $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ e $z(\lambda)$ são definidas através de uma norma da CIE, sendo K um coeficiente de normalização. Uma vantagem importante deste sistema é ser independente de qualquer dispositivo de visualização, o que permite assim definir as cores de uma forma abstracta.

Existem muitos outros sistemas de cor alternativos, mas quase todos podem ser descritos em função do sistema XYZ-CIE.

2.2.2. Visão e Percepção Humana

O olho humano é formado por vários componentes (Fig. 4), dos quais se destacam:

- Córnea – Bolsa de tecido cheia de líquido transparente (protecção).
- Pupila – A perfuração existente no olho por onde a luz entra.
- Cristalino – Bolsa de tecido contráctil cheia de líquido transparente, que actua como lente na focagem do feixe luminoso por forma a gerar uma imagem nítida na retina.
- Retina – Camada de tecido fotossensível contendo as células cones, que reagem em função do comprimento de onda da luz, as células bastonetes, que reagem aos diferentes níveis de luminância, e a substância rodopsina, usada como mensageiro químico pelos bastonetes.
- Nervo óptico – Canal de transporte da informação captada pelo olho até ao cérebro.

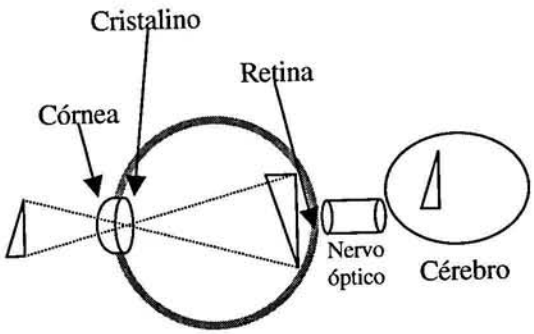


Fig. 4 – Funcionamento do olho humano

O complexo processo da visão é formado por oito etapas principais, as quais se encadeiam tão rapidamente que permitem ver até cerca de 30 imagens por segundo:

- A luz entra no olho através da córnea.
- As pestanas ajustam-se de modo a proteger as partes interiores do olho.
- A pupila é ajustada de modo a controlar a quantidade de luz que passa para o cristalino.
- O cristalino é ajustado de modo a efectuar a focagem dos raios luminosos na parede interna do olho.
- A informação luminosa atinge a retina, formando-se uma imagem focada.
- A retina determina a luminância da imagem (bastonetes) e as suas cores (cones).
- A imagem é convertida em impulsos nervosos e enviada ao cérebro através do nervo óptico.
- O cérebro efectua a análise e interpretação da imagem.

A visão pode ser classificada em:

- Central – Os cones captam a imagem de modo muito nítido, ie, com o maior detalhe possível ao olho.
- Periférica – Os bastonetes não produzem uma visão nítida e os objectos surgem com silhuetas difusas, sendo, porém, muito sensíveis ao movimento e à intermitência.

- Escotópica – Quando a luminância é inferior a cerca de 0.5cd/m^2, os bastonetes assumem o papel principal e não existe percepção da cor.
- Fotópica – Quando a luminância é superior a cerca de 3cd/m^2, os cones são mais importantes e possibilitam a visão colorida.
- Mesópica – Para luminâncias intermédias, a capacidade de distinção de cores baixa com a diminuição do nível de iluminação, havendo um aumento de sensibilidade para as cores na gama mais baixa do espectro visível.

O processo que permite o funcionamento do olho sobre uma faixa ampla de níveis de iluminação designa-se adaptação. Este processo envolve uma alteração na abertura da pupila e modificações fotoquímicas na retina. A adaptação à escuridão total, depois de uma exposição a luminâncias elevadas, demora cerca de uma hora a efectuar-se completamente; pelo contrário, a adaptação completa à luz, depois de uma exposição a luminâncias baixas, demora muito menos tempo.

A acomodação é o processo de ajuste automático da distância focal do olho. No decurso deste processo, o músculo em volta do cristalino ajusta a tensão sobre o mesmo, modificando assim a sua curvatura. Com o aumento da idade, a capacidade de acomodação do cristalino diminui, requerendo o uso de dispositivos de auxílio visual.

O factor dominante na discriminação de um objecto é a diferença, em luminância ou cor, entre o objecto e a sua vizinhança espacial. Este factor é denominado contraste e é tipicamente definido através de

Eq. 35
$$C_L = \frac{2(L_o - L_f)}{(L_o + L_f)}$$

em que L_o é a luminância média do objecto e L_f é a luminância média do fundo. O limiar de sensibilidade ao contraste define-se, em condições de laboratório, pela fórmula

Eq. 36
$$C_S = \frac{L_f}{(L_o - L_f)}$$

Se o contraste ou a luminância forem aumentados acima do referido limiar, a realização de tarefas visuais torna-se mais fácil. Em situações de uso de visão para efeitos de trabalho ou semelhantes, a sensibilidade ao contraste pode ser influenciada pelo contexto espacial do campo de visão, adaptação do olho, presença de fontes de luz no campo de visão, etc, pelo que se torna difícil parametrizar esta quantidade, reduzindo-se assim a sua aplicabilidade.

O sistema visual humano possui características que condicionam o processo de visão, particularmente quando se trata de imagens fixas (como são as produzidas por computador e afixadas em dispositivos de visualização tais como ecrãs e papel). O conhecimento adequado dos limites e possibilidades da visão e da percepção é importante por duas razões:

- Alguns cálculos de iluminação poderão ser suprimidos ou efectuados com menor precisão se o objectivo for apenas a visualização.
- Conhecendo-se o dispositivo de visualização, os cálculos deverão ser orientados para reproduzir o mais fielmente possível sensações visuais semelhantes às da realidade.

Dentro da gama de radiação visível, a sensação de luminosidade depende do comprimento de onda da radiação, ie, depende da cor dos raios luminosos. A sensibilidade do olho em função do comprimento de onda da luz é descrita pela curva de sensibilidade relativa $V(\lambda)$ da Fig. 5 [Glassner95], a qual representa a sensibilidade relativa de um observador de referência.

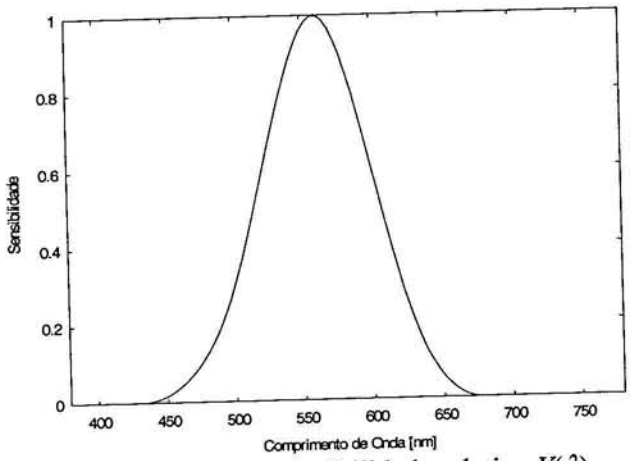


Fig. 5 – Curva de sensibilidade relativa $V(\lambda)$

O olho humano é sensível à luminância, a qual é convertida em sensação luminosa (luminosidade); a sensibilidade do olho humano varia de 10^{-6} a 10^{5}cd×m^{-2}. Porém, a sensação luminosa não tem uma dependência linear com a luminância. Muitos factores biológicos contribuem para essa relação complexa: abertura da pupila do olho, adaptação da sensibilidade da retina, interpretação do cérebro, etc. A seguinte fórmula empírica, conhecida por Lei de Weber, foi estabelecida pela CIE para descrever a luminosidade B em função da luminância Y, a qual varia entre 0 e 100cd×m^{-2}

Eq. 37
$$B = 25Y^{1/3} - 17$$

No entanto, outras fórmulas alternativas existem para descrever a dependência da luminosidade com a luminância. Destaca-se particularmente a Lei de Bodmann [Bodmann79], de acordo com a Lei de Weber mas mais geral, dado que inclui a dependência com a luminância de fundo Y_f (Fig. 6)

Eq. 38
$$B = 23\log Y - 5.5\log Y_f - 1.6$$

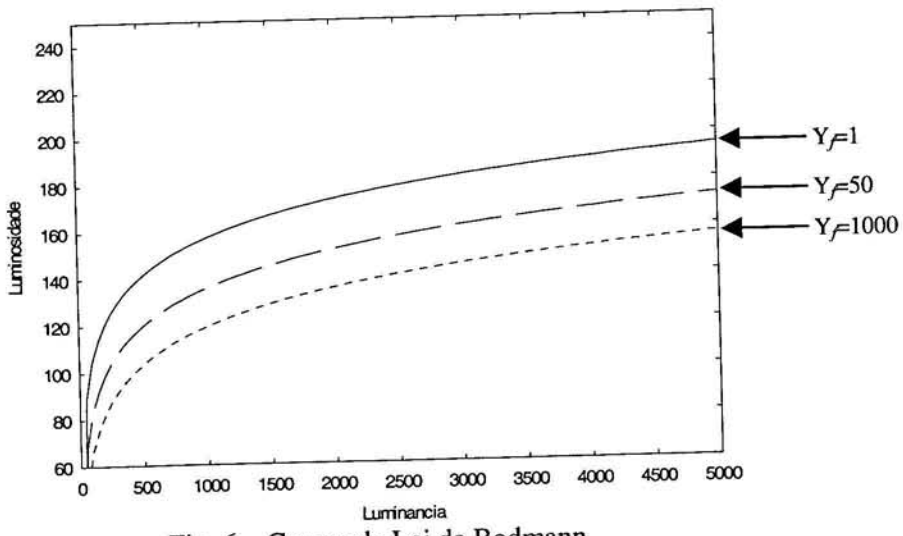


Fig. 6 – Curvas da Lei de Bodmann

Os mecanismos que explicam como a luz colorida chega ao olho, como é traduzida em sensações, como estas são transportadas até ao cérebro e como este apreende a cor são ainda parcialmente desconhecidos. No entanto, é consensual que o cérebro humano apreende a cor de

uma forma tridimensional, ie, com três componentes independentes, o que também está de acordo com a existência de três tipos de receptores de cor no olho.

O modo como a luz incidente afecta estes receptores é razoavelmente bem conhecido: em geral, a resposta dos receptores é linear, ie, o estímulo causado por vários feixes de luz é a soma dos estímulos individuais causados por cada feixe

Eq. 39

$$\begin{cases} R_{olho} = \int_{380nm}^{780nm} E(\lambda) F_R(\lambda) d\lambda \\ G_{olho} = \int_{380nm}^{780nm} E(\lambda) F_G(\lambda) d\lambda \\ B_{olho} = \int_{380nm}^{780nm} E(\lambda) F_B(\lambda) d\lambda \end{cases}$$

sendo $E(\lambda)$ a distribuição espectral de energia e $F_{RGB}(\lambda)$ as funções de resposta dos receptores do olho. Cada tipo de receptor (vermelho, verde e azul) é sensível a luz monocromática com diversos comprimentos de onda, o que é geralmente descrito através de uma curva de resposta em frequência. Quando a luz incidente no olho não é monocromática, aplicam-se as três respostas em frequência dos receptores à referida radiação, o que permite obter a resposta do olho em termos das sensações luminosas resultantes. A resposta final está directamente relacionada com a percepção humana da visão. No entanto, existem diferentes distribuições de luz incidente não-monocromática que produzem a mesma resposta final nos receptores do olho. Estes conjuntos de distribuições de luz designam-se metâmeros.

Pelo facto do olho humano possuir três tipos de receptores de cor, muitos modelos de descrição da luz e do seu espalhamento tendem a usar apenas três números para representar entidades "contínuas". Porém, a evidência empírica mostra que os mesmos objectos são vistos de modo diferente sob condições de iluminação diversa e que, em certas situações especiais, tal não é passível de ser explicado através de modelos tão simplificados. Dado ser impossível armazenar a intensidade da luz para todos os comprimentos de onda visíveis, um compromisso alternativo aos três valores tradicionais, sugerido por [Hall89], usa cinco valores espectrais. Esta solução parece ser suficiente e adequada para aplicações computacionais que lidem com o transporte e a visualização da luz.

2.2.2.1. Fotometria

Atendendo ao comportamento complexo do sistema visual humano, traduzido através da curva de sensibilidade relativa $V(\lambda)$ e outros factores, a radiometria não consegue exprimir devidamente a impressão visual causada pela luz, apenas descrevendo os seus efeitos energéticos. Para obviar a tal limitação, a fotometria descreve a impressão visual da luz no ser humano.

A grandeza básica da fotometria define-se através do fluxo luminoso, potência radiante afectada pela sensibilidade relativa

Eq. 40

$$\Phi_v = K_m \int_{380nm}^{780nm} V(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda \text{ [lm]}$$

sendo $V(\lambda)$ a sensibilidade relativa e $\Phi(\lambda)$ a potência radiante ou fluxo. A partir desta formulação, definem-se os equivalentes fotométricos das grandezas radiométricas (Tab. 1):

Grandezas Radiométricas		Grandezas Fotométricas	
Nome	Símbolo [unidade]	Nome	Símbolo [unidade]
Fluxo	Φ [W]	Fluxo	Φ_v [lm] (lúmen)
Intensidade	I [W×sr^{-1}]	Intensidade	I_v [cd] (candela)
Irradiância	E [W×m^{-2}]	Iluminância	E_v [lux]
Radiância	L [W×m^{-2}×sr^{-1}]	Luminância	L_v [cd×m^{-2}]

Tab. 1 – Grandezas radiométricas e fotométricas

2.2.3. Conceitos Básicos de Luminotecnia

A iluminação pode ser analisada sob dois pontos de vista complementares: quantitativo – medir a quantidade de luz e determinar o seu ajuste ao espaço a iluminar; qualitativo – melhorar aspectos de produtividade, conforto, bem-estar, etc. Nas secções seguintes serão abordados alguns tópicos de iluminação, numa perspectiva luminotécnica.

2.2.3.1. Quantidade da Iluminação

Em termos quantitativos, a iluminação mede-se através do seu fluxo em lúmen. Em muitos países, as fontes de luz são rotuladas em função da sua emissão em lúmen. A intensidade da luz medida em pontos particulares de planos do espaço designa-se iluminância e pode ser medida com um fotómetro nas superfícies dos objectos mais importantes ou em pontos de planos horizontais relevantes – o plano de trabalho convencional situa-se a alturas próximas de 0.8m, por exemplo. A luminância, ou brilho, mede a quantidade de luz que abandona uma superfície numa certa direcção, em função da iluminância na referida superfície e da sua reflectância[23]. O facto do olho humano ver a luminância e não a iluminância explica a importância da emissão luminosa e dos fenómenos de espalhamento da luz na compreensão da percepção visual.

A escolha dos níveis de iluminação é uma das tarefas principais dos luminotécnicos. De acordo com as técnicas clássicas, é frequente considerarem-se factores tais como tipo e precisão da tarefa a realizar, idades dos ocupantes, etc. Depois de determinados os níveis de iluminação, procede-se à escolha das luminárias com base na eficiência e quantidade de emissão luminosa a emitir, reflectância das superfícies, dimensões e formas do espaço, existência de iluminação natural, etc. Embora tradicionalmente não seja considerado um defeito grave, a sobre-iluminação é realmente prejudicial, em termos visuais e ecológicos, porque provoca um esforço excessivo dos músculos envolvidos na visão que pode originar mal-estar e outros efeitos nocivos.

2.2.3.2. Qualidade da Iluminação

Em termos qualitativos, a iluminação pode ser aferida através de critérios associados a três aspectos principais, o ofuscamento, a uniformidade da luminância e o ambiente visual.

O ofuscamento, geralmente considerado o aspecto mais relevante de qualidade da iluminação, é uma sensação provocada por luminâncias excessivas dentro do campo visual. Os resultados podem ser desconforto, incomodidade, baixa de produtividade, etc. Note-se que um objecto brilhante isolado não causa necessariamente ofuscamento; porém, um objecto brilhante sobre um fundo escuro provavelmente causa. Como foi dito anteriormente, o contraste é a relação entre a luminância de um objecto e a do seu fundo. Apesar do aumento de contraste facilitar as tarefas visuais, o contraste excessivo provoca ofuscamento e perturba a visão. A redução do

[23] A reflectância é uma versão muito simplificada do BSDF da superfície.

ofuscamento pode ser efectuada através da observância dos níveis de iluminação, pelo uso de equipamento com esse fim específico – lentes ou *louvres*[24] são frequentemente usados para reduzir a visualização directa das fontes de luz, ou pela aplicação de técnicas de iluminação mais adequadas – iluminação indirecta, por exemplo. Actualmente, muitos fabricantes de luminárias fornecem dados de Probabilidade de Conforto Visual (VCP[25] [CRQQI66]) para configurações geométricas típicas. O ofuscamento é um dos maiores problemas a resolver em espaços interiores, sendo particularmente difícil de tratar o ofuscamento reflectido, ie, aquele que não resulta da visão directa das fontes de luz.

A uniformidade de iluminância é um outro aspecto qualitativo importante. O valor da iluminância média pode ser adequado, mas tal não significa que a uniformidade seja respeitada. Razões que podem contribuir para a falta da referida uniformidade são critérios inapropriados de espaçamento de fontes de luz e armaduras com reflectores, entre outras. Os efeitos negativos provocados podem ser níveis de iluminação inapropriados em certas zonas, desconforto visual nas tarefas que exigem mudança de vistas e o aparecimento de manchas de luz, no chão e nas paredes, potencialmente causadoras de distracção.

Segundo [Barker97], no futuro, a prioridade principal do designer de iluminação será a qualidade do ambiente visual (saúde, desempenho e conforto visuais), relegando para planos secundários a eficiência energética e outros critérios menos humanos (numa acepção perceptual).

2.2.3.3. Fontes de Luz

Uma fonte de luz é um emissor de radiância com comprimentos de onda visíveis para o olho humano. Tradicionalmente, subdividem-se as fontes de luz em naturais (sol e céu, principalmente) e artificiais (usadas em luminárias fabricadas pelo homem). Apesar da grande diversidade, existe uma forma de representação homogénea e fácil de utilizar em aplicações computacionais, baseada numa função de distribuição espacial da radiância espectral.

A maioria das fontes de luz artificiais apresenta-se sob a forma de lâmpadas: incandescentes, fluorescentes, alta intensidade de descarga, vapor de mercúrio, etc. Actualmente, quase todas as lâmpadas são alimentadas electricamente e são vulgarmente classificadas segundo três parâmetros: eficiência, temperatura de cor e índice de restituição de cor. A eficiência de uma lâmpada mede o modo como esta faz a conversão da energia em radiação visível, sendo comummente medida através da razão do fluxo luminoso emitido versus potência eléctrica recebida (exprime-se em [$lm \times W^{-1}$]). A temperatura de cor especifica o modo como uma lâmpada é considerada "quente" ou "fria" na sua emissão, de acordo com a frequência emitida dominante, e exprime-se em [K (kelvin)]. Finalmente, o índice de restituição de cor avalia a capacidade de uma lâmpada fazer corresponder as cores percepcionadas com as cores reais e exprime-se adimensionalmente entre [0-100].

As Fig. 7, Fig. 8 e Fig. 9 apresentam espectros emissivos de vários tipos de lâmpadas, uma ínfima parte da variedade espectral existente. A emissão luminosa mede-se em [$W \times m^{-1} \times lm^{-1}$]. Estas figuras indiciam que o uso de modelos tricromáticos de representação de cor não é satisfatório; os modelos referidos no fim da secção 2.2.2 são mais recomendáveis quando se deseja uma exactidão espectral elevada.

[24] *Louvres* são painéis dispostos em grelha, perto das fontes de luz, com o objectivo de bloquear a visualização directa destas.

[25] O VCP representa a percentagem de pessoas que acham aceitável o ofuscamento num dado ambiente.

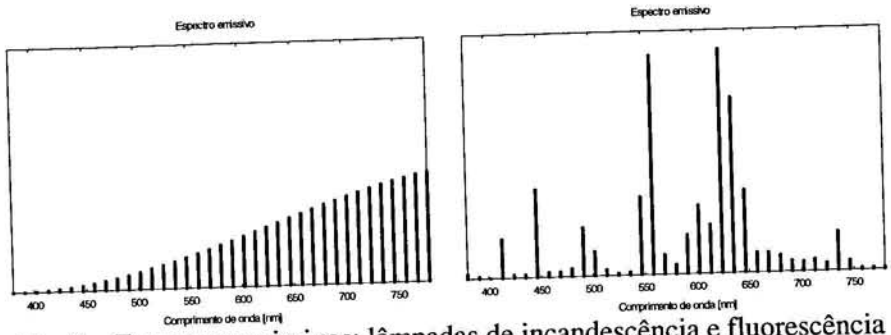


Fig. 7 – Espectros emissivos: lâmpadas de incandescência e fluorescência

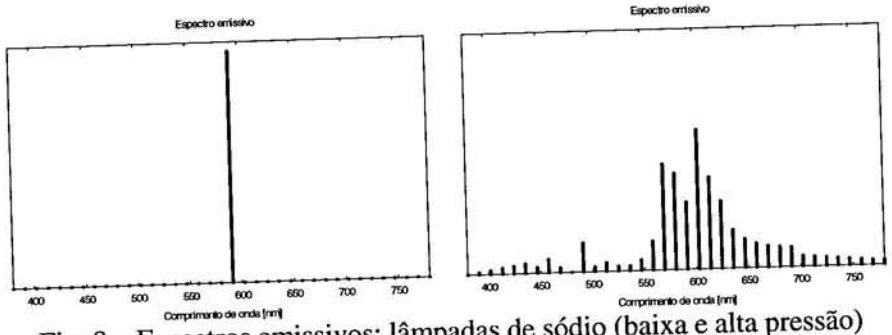


Fig. 8 – Espectros emissivos: lâmpadas de sódio (baixa e alta pressão)

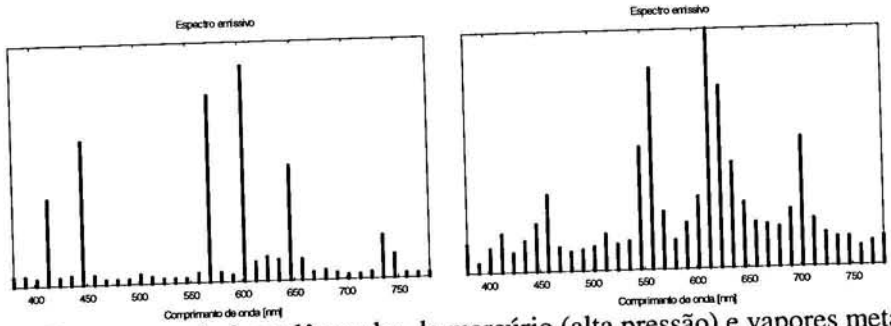


Fig. 9 – Espectros emissivos: lâmpadas de mercúrio (alta pressão) e vapores metálicos

2.2.3.4. Luminárias

De um modo lato, pode chamar-se luminária a qualquer fonte luminosa artificial, normalmente composta de uma ou mais fontes de luz propriamente ditas (filamento incandescente, vela, etc) e de um ou mais dispositivos físicos que modulam a distribuição da luz (armadura, caixa, difusor, etc). Em termos de utilização, uma luminária serve para "dirigir" a luz através de materiais reflectivos ou bloqueadores.

Existem muitos tipos de luminárias, as quais podem ser agrupadas em categorias principais conforme a utilização desejada: armaduras de uso geral, iluminação vertical (*downlighting* e *uplighting*), iluminação indirecta (geralmente através do tecto ou paredes), iluminação de efeito ou destaque, iluminação de tarefa, etc. A eficiência de uma luminária mede a quantidade de fluxo luminoso emitido, mas isso não significa que possua uma boa qualidade de iluminação. Frequentemente, o conforto visual varia inversamente com a eficiência, pelo que se torna muitas vezes necessário procurar um compromisso entre ambos [Barker97].

Sendo as fontes de luz responsáveis pela produção da luz, a maior parte dos componentes de uma luminária serve para dirigir e controlar a emissão dessa luz:

- Reflectores – São concebidos para dirigir a luz emitida, por forma a obter-se a distribuição de intensidade desejada. Em lâmpadas de incandescência, por exemplo, os

reflectores são revestidos de materiais do tipo espelho. No entanto, outros materiais podem ser usados em reflectores (tinta branca altamente reflectiva, película de prata, etc).

- Difusores – Permitem obter uma luminância praticamente uniforme em todas as direcções. A iluminação produzida é a que gera os menores efeitos de sombra. Os difusores são construídos a partir de materiais translúcidos, o que reduz razoavelmente a visualização directa das fontes de luz e diminui as probabilidades de ocorrência de ofuscamento.
- Lentes – Um dos objectivos de utilização das lentes é diminuir os riscos de visualização directa das fontes de luz. A luz emitida na denominada zona de ofuscamento, definida para um ângulo superior a 45° em relação ao eixo vertical da luminária, pode causar desconforto visual e gerar reflexões indesejadas, as quais poderão reduzir o contraste nas zonas de trabalho. A maioria das lentes é fabricada com materiais transparentes do tipo plástico acrílico, que garantem uma boa transmissão da luz e podem assumir diversas formas geométricas.
- *Louvres* – Igualmente com o objectivo de diminuir os riscos de visualização directa das fontes de luz, os *louvres* permitem um maior controlo do ofuscamento e do conforto visual. Vulgarmente apresentam-se sob a forma de grelhas de lâminas que dirigem a luz para baixo e impedem a visão directa das fontes de luz em direcções próximas da horizontal. Usam-se frequentemente para remover as reflexões das fontes de luz em ecrãs e podem ser empregues em caixas com várias fontes de luz, tipicamente lâmpadas fluorescentes. Um dos problemas que pode ocorrer com o seu uso é a redução da eficiência da luminária.

A distribuição da luz das luminárias é classificada pela *Illuminating Engineering Society* (IES) em vários tipos de iluminação:

- Directa – Mais de 90% da luz é dirigida para baixo (*downlighting*).
- Indirecta – Mais de 90% da luz é dirigida para cima: tecto e partes superiores de paredes (*uplighting*).
- Semi-directa – Entre 60 a 90% da luz é dirigida para baixo e o restante para cima.
- Difusa – Percentagens semelhantes da luz são dirigidas para cima e para baixo.
- Destaque – A direcção e abertura de projecção são ajustadas para cada objectivo.

Geralmente, a caracterização técnica de uma luminária faz-se através de informação fornecida pelo seu fabricante:

- Curvas de distribuição espacial da intensidade $I_l(\theta)$ e $I_t(\theta)$ ao longo dos dois planos principais da luminária (longitudinal e transversal)[26].
- Curvas de distribuição espectral de energia $\Phi_l(\lambda)$ das fontes de luz (tipicamente expresso em $[W \times m^{-1} \times lm^{-1}]$).
- Fluxo luminoso total emitido.

No entanto, esta informação não é propriamente a mais adequada para ser incorporada em aplicações computacionais de simulação do transporte da luz, sendo desejável obter a distribuição espectral de radiância da luminária. No caso da luminária emitir com intensidades semelhantes ao longo de qualquer direcção ω, então pode aproximar-se a radiância na direcção ω por

Eq. 41
$$L_e(\omega) = I_e(\omega)/S\cos\alpha$$

[26] θ é o ângulo entre a direcção de emissão e a direcção normal aos planos da luminária.

sendo $S\cos\alpha$ a superfície aparente da luminária na direcção ω. Supondo que o espectro de radiância emitida à saída da luminária é igual ao espectro da fonte de luz[27], a radiância espectral $L_e(\omega,\lambda)$ é

Eq. 42 $$L_e(\omega,\lambda) = KL_e(\omega)\Phi_l(\lambda)$$

sendo K a razão radio-fotométrica ou eficácia luminosa, medida em [lm×W^{-1}]. Para determinar a radiância espectral em qualquer direcção, utiliza-se a projecção desta nos planos longitudinal e transversal da luminária, por forma a computar duas radiâncias de referência, respectivamente $L_{el}(\omega,\lambda)$ e $L_{et}(\omega,\lambda)$, com as quais se calcula finalmente a radiância desejada. O referido cálculo final deverá ser efectuado com recurso a um método de interpolação sofisticado, no qual se utilize devidamente o peso da contribuição de cada plano [Tellier93]. Métodos de interpolação simplistas (linear, por exemplo) tendem a gerar efeitos de interpolação indesejáveis e que se manifestam negativamente no resultado final.

2.2.3.5. Tipos de Iluminação

A luz é muito mais do que uma radiação electromagnética que inunda os espaços habitados pelo homem [Gardner93]. Muitos aspectos qualitativos da iluminação são difíceis de exprimir analítica e numericamente (conceitos tais como "ambiência" e "intimidade", entre outros). Devido à enorme carga perceptual e subjectiva da iluminação, muitos designers iniciam o planeamento da iluminação através da análise de aspectos tais como função do espaço, estilo, tarefas a executar, objectos importantes, áreas de estar, atmosfera, destaques, etc. Em seguida, de acordo com as respostas encontradas, procuram as características luminotécnicas que melhor se enquadrem nas referidas respostas, de acordo com uma vasta gama de critérios, princípios e normas reguladoras:

- Iluminação Ambiente - Este tipo de iluminação procura inundar o espaço com a quantidade/qualidade de iluminação adequada às actividades humanas e é praticamente universal. Assume uma importância especial em espaços do tipo habitacional (salas de estar, cozinhas, corredores, quartos, etc).
- Iluminação de Destaque – Procura focar a atenção em objectos, recorrendo-se frequentemente a técnicas de contraste para realce de pormenores ou características mais importantes (pinturas, esculturas, etc).
- Iluminação de Tarefa – No passado, a iluminação de tarefa era um mero suplemento da iluminação ambiente. Actualmente, este tipo de iluminação é planeado cuidadosamente e combina-se cada vez mais com a iluminação ambiente, dando origem a um novo tipo denominado ambiente/tarefa. A iluminação de tarefa pode assumir muitas formas, quase sempre dependente da geometria do local e do tipo de tarefa visual. No entanto, devido à proximidade das luminárias (situação muito frequente), os perigos de efeitos visuais nocivos são muito elevados, particularmente o ofuscamento através de reflexões. Dado que este tipo de iluminação está muito relacionado com algumas características físicas dos seres humanos (altura, postura, etc), em quase todas as soluções se advoga a necessidade de mobilidade ou controlo das luminárias, a fim de permitir o ajuste personalizado[28].
- Iluminação Indirecta – Este outro tipo de iluminação pode ser utilizado para difundir a luz de um modo mais subtil, com o objectivo de melhorar a percepção dimensional do

[27] O que nem sempre se verifica: reflexão e/ou transmissão na geometria da luminária podem modificar o espectro de saída.

[28] Em iluminação de tarefa centrada em ecrã de computador, a iluminação deve realizar-se apenas na área de teclado/papel (toda a luz que atinja o ecrã poderá prejudicar o desempenho da tarefa).

espaço e valorizar o seu conteúdo. Pode ser obtido de várias formas, destacando-se: luzes de parede (*wall washers*), luzes de parede embutidas (*wall grazers*), luzes do tipo esconso (em *uplighting*), sistemas lineares (*track lighting*), entre outros. Recentemente, a proliferação de computadores em ambientes do tipo escritório originou o aparecimento de novas tarefas horizontais e verticais no plano de trabalho, com relevo para as tarefa verticais, muito ligadas aos ecrãs de computador e susceptíveis de fenómenos perturbadores (ofuscamento e outros). Nesta medida, a iluminação indirecta apresenta-se como uma solução simples e eficiente para a satisfação das normas relativas ao ofuscamento e contraste. Devido ao aparecimento de novos tipos de armaduras e outros dispositivos de "indirecção" da luz com estéticas mais sofisticadas, capazes de realçar/prejudicar o design arquitectural, o papel dos arquitectos na selecção de luminárias para espaços com iluminação indirecta tem-se tornado mais importante.

- Iluminação Natural – A presença de iluminação natural, apesar de reconhecidas as suas vantagens (principalmente psicológicas), apresenta dificuldades e desafios significativos, aos quais só ultimamente se têm dado respostas satisfatórias. As soluções mais recentes, geralmente designadas dinâmicas por possuírem dispositivos capazes de determinar constantemente a posição do sol ou situações atmosféricas condicionantes, são capazes de reagir muito rapidamente às mudanças ambientais e manter níveis de iluminação praticamente inalterados.

2.3. ILUMINAÇÃO

As ferramentas computacionais de apoio ao design de iluminação operam sobre uma representação quantitativa do espaço e da luz [Gardner93] [Barker97]. Essa representação tem uma vertente geométrica correspondente à descrição de todos os objectos existentes, os quais afectam o percurso dos raios luminosos e, por consequência, a propagação da radiância pela cena. Outra vertente descreve o comportamento da radiância quando os raios luminosos incidem num ponto da superfície de um objecto, o que influencia o espalhamento da radiância pela cena. Uma terceira vertente descreve a emissão inicial de luz na cena.

Em termos do operador **T** do transporte da luz (Eq. 24), o operador **K** está associado à descrição das superfícies e o operador **G** à descrição dos objectos. Como L_e representa o conjunto inicial de emissores de luz, a equação do transporte da luz (Eq. 25) fica assim completamente especificada e pode ser "resolvida" em ordem à luz resultante desconhecida (radiância L).

2.3.1. Geometria

A descrição geométrica dos objectos é tipicamente efectuada através de representações de fronteira de classes geométricas fundamentais (polígonos, esferas, cubos, etc). Para além destas classes fundamentais, podem ainda existir operadores geométricos capazes de transformar os objectos das classes fundamentais (rotação, translação e escala) e geradores automáticos de classes geométricas mais complexas. O design de iluminação necessita da informação geométrica para modelar os fenómenos de transporte da luz, na vertente da propagação dos raios luminosos, mas apenas como um dado inicial do problema. É frequente o recurso a ferramentas de CAD (*Computer Aided Design*) para a produção dos dados geométricos descritivos da cena.

Apesar da mais pequena alteração geométrica da cena poder modificar quantitativamente o transporte da luz, do ponto de vista qualitativo, as alterações de iluminação poderão ser irrelevantes. Em cenas do mundo real, normalmente existe uma relação proporcional entre a escala das alterações geométricas e a escala das modificações no transporte da luz; uma pequena

alteração geométrica tenderá a produzir menores modificações no transporte da luz do que uma grande alteração. No entanto, esta proporcionalidade deve ser encarada com precaução, dado que nem sempre se verifica; por exemplo, se pequenas alterações geométricas ocorrem junto das fontes de luz.

A sensibilidade da iluminação em relação à geometria é um tema complexo e insuficientemente investigado, destacando-se os trabalhos de [Leung94] e [Hill98]. Acresce ainda o problema do modo de representação da cena (listas de polígonos, superfícies definidas analiticamente, representações volumétricas, etc) poder também aumentar esta sensibilidade, de acordo com o referido na secção 2.1.5.1.

2.3.2. Materiais de Superfície

Apesar do modelo geométrico ser importante, a representação dos materiais de superfície é igualmente importante, dado que é nas superfícies que ocorrem os fenómenos ópticos de interacção da luz com os objectos. O conceito base usado na descrição dos materiais é o BSDF, previamente descrito na secção 2.1.3.2.

As ferramentas existentes de simulação do transporte da luz empregam modelos mais ou menos simplificados do BSDF, em função do realismo pretendido nas simulações e dos recursos a empregar. No caso mais simples, remove-se a dependência direccional – o resultado é um modelo puramente difuso, frequentemente utilizado com algoritmos de elementos finitos. Em algoritmos mais sofisticados, o BSDF desejado pode ser escolhido numa gama variada de BSDF's padronizados, eventualmente com alguma parametrização controlada pelo utilizador.

Destacam-se os trabalhos de [Ward92b], [Marschner98] e [Marschner99] na medição experimental e modelação fisicamente correcta de BRDF's de materiais de superfície reais.

2.3.2.1. Propriedades Ópticas de uma Superfície

A interacção da radiação luminosa incidente num ponto de uma superfície com essa superfície é um fenómeno difícil de descrever, em termos macroscópicos, apesar de uma explicação simples à luz da óptica quântica. A fim de se poder descrever mais facilmente essa interacção, considera-se que ela se decompõe em fenómenos ópticos elementares: a reflexão, a transmissão e a refracção.

A reflexão é um fenómeno óptico que corresponde à devolução da radiação sem modificação dos comprimentos de onda incidentes. Nem a toda a radiação é reflectida quando a luz incide numa superfície, perdendo-se uma parte da radiação por absorção. Tipicamente, distinguem-se quatro tipos de reflexão:

- Reflexão especular – Este tipo de reflexão ocorre quando o ângulo entre o raio reflectido e a normal à superfície é igual ao ângulo entre o raio incidente e a normal (materiais: ouro, prata, plásticos, etc).
- Reflexão difusa – Neste tipo de reflexão, a luz é reflectida uniformemente em todas as direcções do hemisfério definido pela normal à superfície (materiais: papel fosco, gesso, neve, etc).
- Reflexão mista – Ocorre na maior parte dos materiais e é composta de reflexão especular e difusa, podendo variar a combinação em função do ângulo de incidência.
- Reflexão total (interna) – É um tipo de reflexão especular que ocorre em materiais transparentes, para ângulos de incidência superiores a um ângulo limiar próprio do material (materiais: vidro, água, etc).

A transmissão consiste na passagem de raios luminosos através de um meio, igualmente sem modificação dos comprimentos de onda incidentes. A passagem através de um meio acarreta alguma absorção.

A refracção de raios luminosos é a modificação da direcção dos referidos raios aquando da mudança de meio e deve-se à mudança de velocidade da luz, que diminui em meios mais refractivos. Este fenómeno é descrito através de uma relação trigonométrica simples envolvendo os índices de refracção e os ângulos de incidência e refracção, mas a explicação fisicamente correcta da refracção é a descrita em [Feynman90].

2.3.2.2. Reflectância de uma Superfície

A representação de materiais de superfície baseada apenas na reflectância média permite obter imagens realistas e predizer razoavelmente os níveis de iluminação. Esta situação é frequente em problemas eminentemente arquitecturais. De um modo geral, recomenda-se que a definição dos materiais de superfície se inicie pelas características mais gerais (reflectância), e, em seguida, poderão adicionar-se características específicas tais como especularidade e rugosidade.

A reflectância, razão entre o fluxo que abandona a superfície e o fluxo incidente total na superfície, pode ser calculada aproximadamente através da comparação com uma escala de cinzentos, um documento em papel com uma tabela de rectângulos preenchidos com diversos níveis de cinzento[29].

Caso se disponha de um aparelho medidor de luminância ou iluminância, existem procedimentos simples que poderão ser seguidos para determinar a reflectância de uma superfície. No entanto, estes métodos experimentais assumem que as superfícies são idealmente difusas, ie, não existem direcções que reflictam mais luz do que outras; esta suposição limita consideravelmente o campo de aplicação destes aparelhos. Para superfícies com comportamentos mais complexos, ie, com um carácter direccional significativo, recomendam-se espectrofotómetros inseridos num dispositivo hemisférico, a fim de se poder obter amostras em diferentes ângulos em torno do ponto de medição. Em todos os tipos de medição referidos, é fundamental conservar constante a emissão da fonte de luz usada para fornecer a luz incidente.

2.3.2.3. Cor de uma Superfície

Para estimar a cor de uma superfície, existe um método que recorre a um ecrã RGB e a qualquer aplicação informática de tratamento de imagem que disponha de um caixa de selecção de cores RGB. Depois de se calcular a reflectância média, deve colocar-se uma amostra do material a determinar junto ao ecrã, que deverá ter sido previamente calibrado com correcção gama. Através da caixa de selecção de cores, e tendo colocado a amostra na perpendicular do ecrã perto da referida caixa, deverão ser ajustados os valores RGB de modo a que a cor resultante seja o mais parecida com a cor da amostra. Os valores RGB obtidos deverão ser corrigidos em função da calibração do monitor (correcção gama inversa) e transformados em nível de cinzento (reflectância fotópica). Caso esta reflectância fotópica difira da reflectância média inicialmente medida, deverá ser calculado um factor de correcção (reflectância fotópica/reflectância medida), o qual deverá ser finalmente aplicado aos valores RGB obtidos, determinando-se assim a cor RGB da superfície. Este procedimento deve ser sempre encarado como último recurso e, caso tenha de ser usado, a luz ambiente deverá ser a menor possível.

No caso do design de iluminação, nomeadamente em espaços interiores, quando não se conhecem detalhadamente os materiais a usar e apenas se possuem noções vagas das cores

[29] Pode ser comprada em lojas especializadas em fotografia ou design gráfico.

pretendidas, é preferível utilizar cores "cinzentas" ou esquemas de cores simples (cinzentos para paredes e tectos, castanhos para chão e objectos de madeira, etc).

2.3.2.4. Especularidade de uma Superfície

Para calcular a especularidade de uma superfície, o melhor método existente recorre ao espectrofotómetro em dispositivo hemisférico. No entanto, este método tem limitações para superfícies pouco especulares. Existem outros métodos empíricos, mas os resultados são questionáveis.

2.3.2.5. Transmitância de uma Superfície

O método mais simples de medir a transmitância de uma superfície recorre a uma fonte de luz constante, um medidor de iluminância e uma sala escura. Para cada direcção, deve ser feita uma medição inicial da iluminância, ie, às escuras. Em seguida, deve fazer-se uma medição com a fonte de luz ligada. Finalmente, deve fazer-se a medição com a amostra do material entre o medidor e a fonte de luz. Para obter a transmitância, subtrai-se a medição "às escuras" às outras medições (medições calibradas) e o valor pretendido é o quociente da medição calibrada "com amostra" pela medição calibrada "sem amostra". Existem outros métodos mais sofisticados para calcular a transmitância, mas empregam aparelhos complexos e muito dispendiosos, pelo que o seu uso é muito raro.

2.3.3. Luminárias

A maior parte das ferramentas de simulação do transporte da luz apenas aceita a especificação de luminárias muito simples (do tipo fonte de luz pontual, por exemplo). Do ponto de vista do designer, uma luminária é um objecto complexo, que emite radiância com distribuições direccionais complexas e espectros complicados. Este desfasamento entre as ferramentas e o utilizador é responsável, em parte, pelo desinteresse dos designers no emprego destas ferramentas computacionais. No entanto, com o aparecimento de formatos estandardizados de descrição de luminárias, as ferramentas mais sofisticadas de simulação do transporte da luz já suportam modelos de luminárias reais.

Na secção 2.2.3.4 foi apresentado o processo de obtenção da radiância e da radiância espectral a partir de dados fornecidos pelo fabricante. No caso de não se dispor desses dados experimentais, para luminárias que emitam com intensidades semelhantes em todas as direcções consideradas relevantes, o uso de um medidor de luminância permite determinar aproximadamente a radiância emitida L_e. Para tal, deve medir-se a luminância emitida pela luminária em diversas direcções e calcular o valor médio dessas medições (luminância média); a radiância emitida pretendida (em $[W \times m^{-2} \times sr^{-1}]$) é aproximadamente igual a luminância média (em $[cd \times m^{-2}]$) dividida pelo valor 179.

O emprego de luminárias coloridas complica frequentemente o estudo da iluminação, o que se deve à compreensão ainda incompleta do desempenho do sistema visual. A regra vigente é assumir que o olho humano tende a adaptar-se à fonte de luz predominante, ie, aquela que contribui com mais luz para a cena.

2.3.3.1. Dados Experimentais de Luminárias

O uso de dados de distribuição luminosa, normalmente sob a forma de ficheiros em formato IESNA[30], permite modelar com elevada exactidão o desempenho emissivo das luminárias. Actualmente, quase todos os fabricantes disponibilizam a custo zero estes dados sobre as suas luminárias.

Dado que as luminárias tendem a ser objectos complexos, formados por uma ou mais fontes de luz cercadas de objectos para controlo do fluxo emissivo (ver secção 2.2.3.4), é frequente a utilização de geometria "impostora" nos algoritmos de simulação do transporte da luz. Esta geometria puramente auxiliar engloba completamente a luminária e emite luz de acordo com os dados de distribuição luminosa respectiva. O tratamento computacional dos efeitos de iluminação directa da luminária faz-se com recurso à geometria impostora e aos dados de distribuição luminosa, mas para efeitos de visualização directa da luminária pelo observador usa-se a geometria real da luminária.

Os dados de distribuição luminosa, que é uma grandeza direccional contínua, são quase sempre fornecidos através de tabelas em que se discretizam os componentes direccionais da emissão, no plano da luminária e na perpendicular a esse plano. Devido à complexidade da emissão luminosa, é raro surgirem dados de distribuição luminosa descritos através de funções analíticas.

Algumas luminárias utilizam superfícies semi-transparentes para "tapar" as fontes de luz, que assim ficam parcialmente escondidas. Também podem surgir superfícies deste tipo em cortinas ou certos tipos de vidro, o que poderá obrigar a considerá-los como luminárias, para efeitos de tratamento computacional da sua emissão luminosa. Nestes casos, se não existirem dados de distribuição luminosa disponíveis, é necessário modelar estes objectos como sendo transmissivos, o que afecta consideravelmente a complexidade dos algoritmos de simulação do transporte da luz e obriga tipicamente a determinar:

- Reflectância difusa – Fracção da luz que abandona o objecto (reflexão e transmissão).
- Reflexão difusa – Fracção da luz que é reflectida exteriormente de modo difuso.
- Reflexão especular – Fracção da luz que é reflectida sem espalhamento difuso.
- Transmitância difusa – Fracção da luz que atravessa o objecto de modo difuso.
- Transmitância especular – Fracção da luz transmitida sem espalhamento difuso.
- Rugosidade.

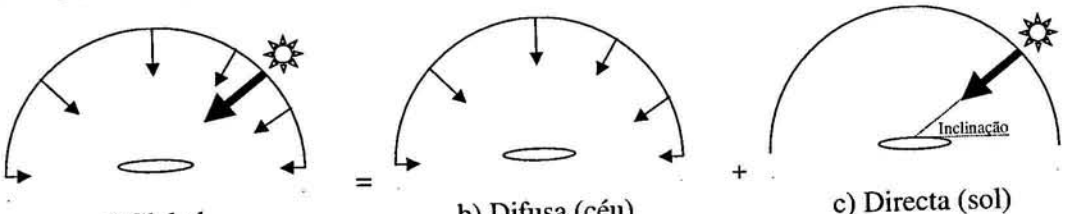
Estas grandezas não são fáceis de determinar experimentalmente. Além disso, a sensibilidade da simulação computacional em relação às grandezas referidas poderá ser elevada, o que significa que a validade dos resultados obtidos depende do modelo óptico escolhido e do grau de exactidão das medições experimentais.

2.3.3.2. Iluminação Natural

A fonte de toda a iluminação natural é o sol, mas é o espalhamento da luz solar na atmosfera pelo ar, vapor de água, poeiras, etc, que dá ao céu a aparência de uma fonte de luz autónoma. Normalmente, o sol e o céu são modelados através de luminárias infinitamente distantes da cena. Além disso, assume-se que a luz solar não é afectada por espalhamento ou absorção, o que exclui a modelação de fenómenos tais como nevoeiro, neblina, etc. A iluminação gerada pelo céu depende da sua luminância, a qual varia em função de fenómenos meteorológicos e sazonais, entre outros.

[30] IESNA – *Illumination Engineering Society of North America.*

A descrição do sol como luminária é simples, dado que a sua forma não varia e a posição é facilmente previsível. Porém, o efeito emissivo do céu é difícil de descrever, exceptuando-se certos casos de céu muito nublado, nos quais praticamente desaparece a dependência angular. A presença de nuvens ainda complica mais a modelação do céu, dado que introduz variações temporais potencialmente rápidas na emissão luminosa. Por estas razões, foram desenvolvidos modelos do comportamento emissivo do sol e do céu para aplicação em simulações computacionais – estes modelos geram padrões emissivos a partir de grandezas físicas simples [CIE73] [Perez93].



a) Global b) Difusa (céu) c) Directa (sol)

Fig. 10 – Iluminação natural

A Fig. 10 mostra que a iluminação natural pode ser interpretada como sendo a adição linear da iluminação difusa gerada pelo céu (difícil de modelar) com a iluminação directa do sol (fácil de modelar). Os modelos referidos ([CIE73] e [Perez93]) fazem o tratamento separado dos dois componentes principais da iluminação natural. Em ambientes nocturnos, os efeitos de iluminação da lua podem ser simulados de modo semelhante ao sol.

2.4. OPTIMIZAÇÃO

O conceito de optimização global está associado ao problema de encontrar o melhor conjunto de parâmetros que optimiza uma função objectivo. No caso geral, existem soluções que são óptimas localmente, mas não globalmente. Por consequência, os problemas de optimização global são geralmente difíceis de resolver de um modo exacto. Este tipo de problemas enquadra-se no contexto mais abrangente da programação não-linear (NLP). Os diversos métodos existentes de optimização global podem ser classificados com base nas propriedades do problema em causa e na qualidade das soluções finais atingíveis.

Frequentemente, sobretudo em problemas complexos, não é possível saber se uma solução "óptima" é realmente a melhor solução. Em problemas deste tipo, apenas se pode esperar que, após um esforço considerável de procura da solução óptima desconhecida, a melhor solução obtida coincida ou esteja muito próxima da solução óptima, o que explica a designação de solução quasi-óptima. Noutros problemas, o objectivo é obter uma solução quasi-óptima, ie, uma solução que, não sendo a melhor possível, esteja próxima da solução óptima. Em problemas deste tipo, tem-se muitas vezes uma noção aproximada do que é a solução óptima, o que ajuda a definir o significado de "estar próximo".

Na maior parte dos problemas de design de iluminação parece ser possível ter uma noção qualitativa do que são boas soluções devido à experiência do designer, considerações geométricas, etc, o que faz com que a optimização possa ser orientada para a determinação de soluções quasi-óptimas verosímeis e fisicamente aplicáveis.

Este trabalho alarga o espectro de aplicação dos métodos de optimização ao design de iluminação, através da inclusão da optimização global em ferramentas de design de iluminação.

2.4.1. Princípios de Optimização

Um problema NLP tem a seguinte formulação (Fig. 11):

```
minimizar F(x)
sujeito a
  gi(x)=0, ∀i∈[1,m] ∧ m≥0
  hj(x)≥0, ∀j∈[m+1,n] ∧ n≥m
```

Fig. 11 – Pseudo-código de um problema NLP

em que $F(x)$ é uma função de um vector de números reais, sujeita a relações de igualdade e desigualdade. Métodos específicos de optimização têm sido desenvolvidos para abordar diversas classes de problemas. No entanto, algumas técnicas gerais parecem ter uma aplicabilidade bastante lata [Horst95]:

- Problemas combinatórios – A função tem um domínio finito mas muito extenso. Se a função é linear por troços, podem ser usados métodos exactos de programação inteira, embora métodos heurísticos tais como *simulated annealing*, *tabu search* e algoritmos evolucionários possam ser empregues com sucesso para obter soluções aproximada [Skiena97].
- Problemas sem constrições – A função tem domínio real e não possui constrições. Existem diversos métodos para abordar estes problemas, dependendo porém da quantidade de informação existente *a priori* e de existir uma formulação analítica da função objectivo.
- Problemas com constrições – A função tem domínio real e possui constrições. Os métodos dos problemas sem constrições podem ser geralmente adaptados, embora em alguns casos estes problemas sejam mais difíceis de abordar.

Algumas das classes mais importantes de problemas são a optimização diferencial convexa, problemas *minimax* e a optimização global contínua.

2.4.2. Métodos de Optimização

Apresentam-se de seguida os principais métodos existentes para a optimização de problemas multi-dimensionais de larga escala, sujeitos ou não a constrições complexas. No capítulo dedicado à descrição da implementação efectuada será justificada a escolha de um destes métodos, referindo-se os seus pontos fortes e fracos, tendo em conta a adequação ao problema em causa, limitações, etc.

2.4.2.1. Métodos de Intervalos

Os métodos de optimização baseados em técnicas de intervalos são capazes de garantir que a solução óptima global é determinada. As referidas técnicas são empregues para se calcular informação global sobre funções relacionadas com o problema concreto, usando-se depois estratégias de *branch and bound* para acelerar o desempenho. Estes métodos decompõem o domínio de pesquisa num conjunto de caixas multi-dimensionais, nas quais os limites inferiores da função objectivo são computados através de técnicas de intervalos. Necessitam de uma função objectivo formulada analiticamente, e, embora não exijam o uso de derivadas, a sua eficiência pode aumentar significativamente se estas estiverem disponíveis.

As técnicas existentes mostraram ser capazes de resolver problemas com algumas centenas de parâmetros [Hansen92].

2.4.2.2. Métodos de *Clustering*

Os métodos de optimização baseados em *clustering* podem ser considerados como uma variação de um método designado *multistart*, no qual se faz uma pesquisa local a partir de vários pontos distribuídos por todo o domínio de pesquisa. Um problema do método *multistart* é a potencial ineficiência em certas situações iniciais. Os métodos de *clustering* evitam esta possibilidade através de uma selecção mais cuidadosa dos pontos iniciais de pesquisa. Depois de escolhidos esses pontos, este método analisa-os e tenta determinar grupos de pontos que constituam vizinhanças de extremos locais, a fim de, posteriormente, evitar pesquisas locais redundantes.

Estes métodos foram desenvolvidos para a optimização de funções reais sem constrições, porque assumem que a função objectivo é simples de computar, dado que muitos pontos são gerados aleatoriamente durante a determinação dos grupos. Além disso, parecem ser mais eficientes em problemas com um número relativamente baixo de dimensões (menos do que algumas centenas) [Törn89].

2.4.2.3. Métodos de *Simulated Annealing*

O método de *simulated annealing* é uma generalização de um método Monte Carlo usado no exame de equações de estado de um sistema de n-corpos [Metropolis53]. O método baseia-se no modo como um líquido congela ou um metal recristaliza durante um processo de têmpera – uma fusão inicial a alta temperatura seguida de um arrefecimento lento, por forma a conseguir que o sistema esteja sempre perto do equilíbrio termodinâmico.

A generalização desta abordagem Monte Carlo a problemas combinatórios é simples [Kirkpatrick83]. O estado de um sistema termodinâmico é análogo ao estado de um problema combinatório, sendo a equação de estado equivalente à função objectivo e o estado de equilíbrio final equivalente ao extremo global. O aspecto mais complexo deste método é a manipulação do parâmetro temperatura, que não tem análogo nos problemas combinatórios, para além de outros factores tais como critérios de *annealing*.

Este método tem sido empregue na optimização de problemas combinatórios [Pirlot96], com um sucesso notável na resolução de problemas em design de circuitos electrónicos.

2.4.2.4. Métodos de *Tabu Search*

A ideia base do método *tabu search* [Glover86] é ser uma meta-heurística aplicada sobre uma heurística. O objectivo é evitar que a pesquisa seja ineficiente, através da proibição ou penalização de iterações que gerem estados previamente visitados. Para tal, o método regista os passos efectuados em listas, que funcionam como uma memória de pesquisa, sendo o papel dessas listas muito importante para se obter um bom desempenho. Com este método consegue garantir-se que o espaço de soluções é razoavelmente explorado e que os extremos locais são facilmente evitados, aumentando assim as possibilidades de determinação da solução óptima.

Tradicionalmente, este método é aplicado à optimização de problemas combinatórios [Pirlot96], mas pode também ser aplicado a problemas com funções contínuas através do uso de esquemas de codificação discreta dos estados do problema [Glover90].

2.4.2.5. Métodos de Algoritmos Evolucionários

Os algoritmos evolucionários são métodos de pesquisa inspirados em ideias da selecção natural, de que se destaca a sobrevivência do mais apto [Goldberg89]. Estes métodos diferem dos tradicionais na medida em que fazem a pesquisa numa população de soluções e não em soluções particulares. As soluções com maior potencial de sobrevivência serão depois processadas

através de diversas técnicas, quase todas modeladas a partir da biologia: mutações, recombinação com outras soluções, etc. Em quase todos os algoritmos evolucionários surge a sequência característica: selecção competitiva, processamento genético e avaliação das melhores soluções, repetindo-se esta sequência até se verificarem os critérios de terminação previamente definidos.

Algumas variantes de algoritmos evolucionários são:

- Programação genética (GP) – Evolução de programas.
- Programação evolucionária (EP) – Optimização de funções contínuas sem recombinação.
- Estratégias evolucionárias (ES) – Optimização de funções contínuas com recombinação.
- Algoritmos genéticos (GA) – Optimização de problemas combinatórios.

Embora os algoritmos evolucionários sejam considerados métodos de optimização global, a convergência existe apenas num sentido probabilístico muito vago. No entanto, uma das vantagens destes métodos é terem um bom desempenho com funções complexas, nas quais existam muitos extremos locais. Estes métodos conseguem frequentemente evitá-los e produzir soluções globais "óptimas".

A operação de recombinação usada nestes métodos exige que o problema possa ser representado de tal modo que a combinação de duas soluções tenha uma probabilidade razoável de gerar soluções novas e interessantes, pelo que a escolha da representação do problema é um dos maiores desafios destes métodos. Apesar de inicialmente aplicados a problemas sem constrições [Pirlot96], existem métodos adaptados que permitem o seu uso em problemas com constrições.

2.4.2.6. Métodos Estatísticos

Os métodos baseados em algoritmos de optimização global estatísticos utilizam um modelo estatístico da função objectivo para influenciar a selecção de novos estados [Mockus89]. Supondo que a função objectivo a optimizar pertence a uma classe de funções modelada por uma dada função estocástica, a informação obtida em iterações anteriores pode ser usada para estimar parâmetros dessa função estocástica. Esse modelo refinado ajudará a influenciar a geração de novos estados.

Estes métodos assumem que a função objectivo possui um elevado custo de computação e, por esse motivo, procedem a análises não-triviais dos estados anteriores, no sentido de determinar quais os melhores estados a processar nas iterações seguintes. Devido à complexidade do processamento subjacente a estes métodos, a sua utilização é ainda reduzida, sendo mais frequentemente aplicados a problemas com baixo número de dimensões.

2.4.2.7. Métodos Híbridos

Os métodos híbridos de optimização global incorporam ideias de diversos métodos. Como tal, em alguns casos apresentam vantagens significativas sobre os métodos mais elementares.

Os métodos híbridos mais relevantes são os métodos de programação não-linear inteira mista (MINLP) – algoritmos de programação não-linear capazes de optimizar parâmetros reais e inteiros, com ou sem restrições. Por exemplo, muitos problemas de design em engenharia são do tipo MINLP, ie, implicam a selecção de uma configuração (que entidades incluir ou excluir no design), assim como características dessas entidades. A inclusão pode ser modelada através de variáveis inteiras e as características através de variáveis reais. Note-se que os problemas

MINLP são NP-completos e que só recentemente se desenvolveram técnicas razoavelmente eficientes para os abordar – por exemplo, as estratégias de *branch and bound* [Grossmann90].

2.5. SUMÁRIO

Neste capítulo abordaram-se as áreas subjacentes à dissertação: o transporte da luz, a visão e luminotecnia, a iluminação e a optimização.

Na área do transporte da luz, destacou-se a escolha do modelo da óptica geométrica para basear a simulação do transporte da luz, assim como a definição de algumas premissas que permitem o tratamento adequado, mas mais simplificado, dos fenómenos da iluminação.

Na área da visão e luminotecnia, realçou-se a importância do carácter perceptual da visão humana e a importância da luminotecnia para melhor descrever e caracterizar os fenómenos luminosos do mundo que nos rodeia.

Na área da iluminação, descreveram-se as três entidades participantes nos fenómenos de transporte da luz, a geometria, os materiais de superfície e as luminárias, destacando-se algumas das suas características mais importantes.

Finalmente, na área da optimização, analisaram-se os principais tipos de métodos de optimização, com ênfase naqueles capazes de tratar problemas muito complexos.

3. METODOLOGIAS DE DESIGN E PROJECTO DE ILUMINAÇÃO

Neste capítulo descrevem-se as metodologias de design e as suas aplicações ao design de iluminação, os vários métodos de projecto de iluminação actualmente usados e o estado da arte do design de iluminação.

A partir da descoberta do fogo, o ser humano passou a controlar algo que lhe permitiu ver na escuridão, aquecer-se, cozinhar alimentos e afastar os seus predadores. Também descobriu que o fogo queima, se não for lidado com precaução. Mas as vantagens superaram claramente as desvantagens. A civilização, tal como a conhecemos, não existiria sem o domínio deste elemento.

Em termos de iluminação, o domínio do fogo permitiu a vida organizada em espaços naturais (grutas e cavernas). O homem pôde então aproveitar todos os recantos desses espaços para os fins mais diversos, sem depender da iluminação natural: abrigo contra intempéries, defesa contra inimigos, armazenamento de bens, etc. As primeiras técnicas de design de iluminação devem datar provavelmente destes tempos primordiais (iluminação de grutas e cavernas através de tochas) [Barker97].

A primeira construção humana conhecida que usa a luz de um modo não-convencional é a igreja *Hagia Sofia*, construída entre 532 e 537DC em Istambul, durante o reinado do imperador Justiniano. Edificada para ser uma manifestação física dos reinos celestiais, ainda hoje é considerada uma obra prima de beleza e design. As suas cúpulas elevadas permitem a existência de poços de luz, o que faz com que o interior da igreja brilhe de um modo subtil e harmonioso, como se as paredes fossem fontes de luz. Há algo misterioso nesta edificação para além da mera junção da luz com a arquitectura.

Foi só muito mais tarde, aquando da construção das primeiras catedrais góticas dos séculos XIII e XIV, que o uso da claridade ressurgiu no contexto de uma iluminação baseada em insuficiente luz natural (norte da Europa) e emprego de vitrais. A primeira catedral gótica a possuir o novo tipo de janelas "luminosas" foi construída por Abbot Suger em Saint Denis, França, cerca de 1140DC. O resultado foi reforçar a dimensão emocional do espaço, dado que estas janelas luminosas enchem o interior com uma luz suave que sugere uma espiritualidade para além do mundo real.

Com o advento da Renascença italiana, a pintura começou a desafiar a beleza dos vitrais. Foi a primeira vez que se aplicou a pintura, como processo de modelação da luz, às superfícies interiores de espaços públicos. Os artistas descobriram que a luz e a sombra podiam criar ilusões subtis, sendo habilmente manipuladas em grandes pinturas de modo a gerar forma e movimento. Artistas tais como Botticelli, Rafael e Miguel Ângelo usaram os seus dotes e os seus conhecimentos de luz e sombra para criar efeitos emocionais impressionantes.

No século XX, as pinturas dos impressionistas franceses procuraram perceber como a luz é reflectida e absorvida por diferentes materiais. Muitos destes trabalhos foram criados ao ar livre,

o que permitia aos artistas ver e sentir a iluminação dos objectos pintados. Na arquitectura, os trabalhos de Lloyd Wright, Gropius, Gaudi e van der Rohe apresentaram diferentes soluções para o problema da iluminação de interiores. No entanto, foi noutros contextos que a iluminação eléctrica mostrou ser capaz de ultrapassar os limites da época: os grandes paquetes luxuosos dos anos 30 e 40. Os paquetes *Bremen*, *Paris*, *Isle de France* e *Normandie* foram inundados com o brilho de lâmpadas eléctricas. No paquete *Paris*, por exemplo, existia um salão de dança iluminado a partir do chão, o que gerava um impressionante efeito de flutuação num banho de luz e cor. Em quase todos os paquetes da época, a iluminação indirecta "escondida" foi amplamente utilizada para valorizar as paredes de pedra natural (mármore, ónix, etc) e os objectos de prata e ouro.

Arquitectos tais como Gropius procuraram integrar a pintura, a música e a dança dentro de uma filosofia alargada da arquitectura. Ele e van der Rohe usaram a luz e o espaço de tal forma que conseguiram capturar complexos efeitos de iluminação em estruturas rígidas compostas de vidro e aço. As descobertas do Cubismo e o desejo de exprimir uma quarta dimensão influenciaram a geometria volumétrica dos arquitectos expressionistas alemães. Os desenvolvimentos das capacidades das luminárias ajudaram a libertar as imaginações dos simbolismos introspectivos do passado. As influências de pintores expressionistas e cubistas tais como Braque, Kandinsky, Klee e Picasso encorajaram a desmontagem criativa de espaços interiores electricamente iluminados. Através do uso cada vez maior do vidro, a mistura de entidades curvas e angulares trouxe uma sensação de leveza à relação entre luz e sombra. Van der Rohe acreditava que um edifício podia transcender a sua massa de aço e betão e gerar um espaço envolvente infinito, com conotações artísticas.

Apesar dos desenvolvimentos das teorias do espaço efectuadas pelos arquitectos alemães, o uso mais sofisticado da iluminação natural foi conseguido por Lloyd Wright. O seu entendimento da luz e a plasticidade da suas criações são consideradas notáveis numa altura em que as preocupações cubistas eram predominantes. Desde então, as fronteiras criativas da iluminação têm vindo a ser sucessivamente alargadas.

É vulgar, na vivência diária dos espaços em edifícios, classificá-los como "amplos", "alegres", "claustrofóbicos", "depressivos", entre outras designações. Estas palavras têm uma carga emocional evidente e muito raramente um espaço interior é classificado através de um código numérico. Como é a luz que revela a arquitectura, existe um problema de comunicação quando se tenta exprimir por palavras ou números uma experiência visual – as subtilezas da luz são difíceis de descrever através de explicação verbal ou matemática. Em oposição, do mesmo modo que os cientistas tentam racionalizar os mistérios da natureza, os técnicos de iluminação tendem a reduzir a luz a grelhas de números, tarefa dificultada pelo facto de que cada pessoa apreende a luz de um modo muito próprio. Realmente, é raro que dois designers de iluminação obtenham a mesma solução para um espaço interior, sendo uma possível explicação para essa aparente discrepância o elevado número de variáveis em jogo.

Antes do aparecimento do designer de iluminação como entidade participante na definição de um espaço, a iluminação era tarefa do arquitecto e do luminotécnico. Frequentemente, os aspectos de iluminação eram descurados, deixados para o fim e a qualidade da solução final era imprevisível. Com o tempo, a participação do designer foi-se impondo, essencialmente voltada para a abordagem dos problemas técnicos da luz e dos modos como esta se relaciona com os aspectos estéticos do espaço.

Geralmente as pessoas não se sentem bem em ambientes demasiado neutros ou vagamente iluminados e apresentam uma habituação psicológica forte a fontes de luz "quentes", ie,

espectralmente ricas em componentes amarelos e alaranjados[1] (luz do fogo, velas, lâmpadas eléctricas de incandescência, etc). Como a iluminação é para ser "usada" por pessoas, muitos designers acham que não faz sentido projectar uma iluminação eficiente do ponto de vista energético se as pessoas sentirem desconforto ou incómodo. Nos anos 60 e 70 pensava-se ser possível obter excelentes níveis de trabalho em espaços do tipo escritório através do uso de iluminação espacialmente muito homogénea e fria; os resultados foram desastrosos [Barker97]. Por estas e outras razões, actualmente considera-se importante que um designer de iluminação possua conhecimentos em diversos domínios: luminotecnia, ergonomia, arte e estudos sociais, entre outros.

Os motivos da presença de um designer de iluminação num projecto de espaço interior podem ser variados. Frequentemente, o designer é convocado para fornecer um certo tipo de iluminação "atraente" em fases finais do projecto. A sua presença surge mais raramente no início do projecto e, quando acontece, é quase sempre em situações de iluminação complexa (presença de iluminação natural, arquitectura sofisticada, requisitos visuais rigorosos, etc).

A investigação da resposta humana em ambientes de iluminação controlada permitiu desenvolver esquemas de iluminação padronizados para uma gama diversificada de espaços interiores. No entanto, muitos designers acham que o "toque pessoal" que valoriza uma solução de iluminação não pode ser obtido de uma forma totalmente analítica, mas essencialmente através da intuição fundamentada numa visão abrangente do problema. Tal não significa, porém, que o designer não se socorra de ferramentas de apoio, capazes de potenciar a qualidade e quantidade do trabalho a realizar. É desejável que essas ferramentas possuam uma base física válida, um grau de abstracção elevado e sejam orientadas para os utilizadores que realmente delas necessitam.

Num futuro próximo, tendo em conta a complexidade do design de iluminação, é improvável que sejam desenvolvidas ferramentas totalmente automáticas de design de iluminação, excepto em situações padrão muito simples. Assim, as novas ferramentas de apoio ao design deverão ser tão flexíveis quanto possível, no sentido de ajudar a evitar soluções desvantajosas e de facilitar a descoberta de soluções interessantes, mas sempre sob controlo total do designer.

3.1. METODOLOGIAS DE DESIGN

Actualmente, existem ferramentas computacionais sofisticadas de apoio ao designer, embora forneçam pouco apoio ao design, ou seja, o designer dispõe de ferramentas fisicamente válidas e razoavelmente intuitivas para realizar cálculos de iluminação, com inegáveis vantagens produtivas, nomeadamente ao nível da confiança nos resultados. No entanto, a actividade de design está ainda muito desapoiada, pois as referidas ferramentas pouco mais são do que calculadores luminotécnicos sofisticados (aplicações de validação de iluminação), conforme se mostra na Fig. 12.

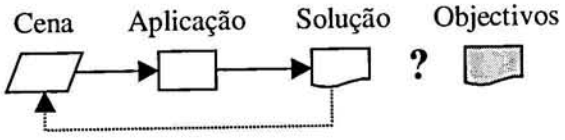


Fig. 12 – Design de iluminação tradicional

[1] Efeito fácil de constatar em fotografias.

Assim, no design de iluminação que designamos de tradicional, o designer tem de comparar os resultados obtidos com os seus próprios objectivos e decidir se reinicia o processo de design ou se aceita a solução. O problema principal reside na dificuldade em saber como alterar os dados de entrada, de modo a aproximar-se da solução idealizada.

Para se poder empregar correctamente a expressão "design de iluminação" às ferramentas computacionais, estas deverão ser capazes de lidar inicialmente com uma especificação dos objectivos do design, de modo a poderem orientar os seus cálculos para a produção de soluções enquadráveis nos referidos objectivos. Esta metodologia de design inverso (Fig. 13) é potencialmente superior à metodologia de evolução interactiva[2] que caracteriza o design tradicional, embora pareça adicionar mais complexidade ao problema.

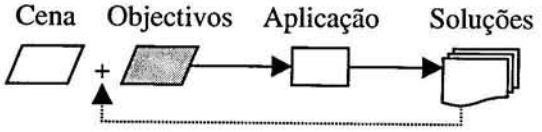


Fig. 13 – Design de iluminação inverso

No design inverso, os objectivos são especificados quantitativamente como se fossem dados de entrada. O processo de pesquisa de soluções deverá ser capaz de tirar partido dessa informação adicional e conduzir eficientemente a pesquisa para regiões do universo de soluções relacionadas com os objectivos idealizados.

Segundo [Marks97], para situações de design em que o custo computacional é elevado ou em que é difícil quantificar os objectivos, pode ser empregue uma metodologia alternativa designada *Design Gallery*™. A metodologia *Design Gallery* (Fig. 14) baseia-se na geração aleatória de um número muito elevado de soluções alternativas intermédias, através de heurísticas de "dispersão", seguida da selecção dos grupos de soluções mais relevantes. A fase inicial tem forçosamente de gerar um número suficientemente elevado de soluções, a fim de se reduzir a probabilidade de falhar a solução óptima. A segunda fase classifica as diversas soluções de acordo com parâmetros iniciais predefinidos e selecciona as mais significativas, deixando a escolha final para o utilizador.

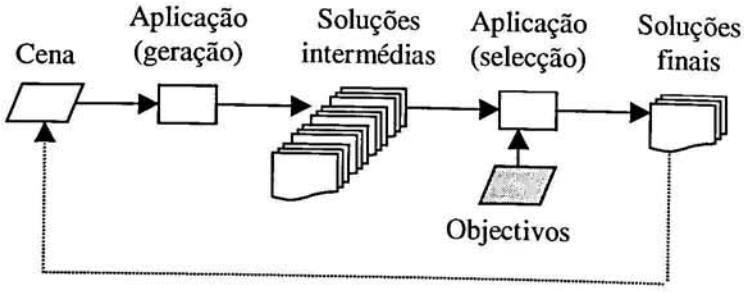


Fig. 14 – Design de iluminação baseado em *Design Gallery*™

No entanto, esta metodologia é susceptível de ser menos eficiente do que a metodologia de design inverso, caso seja possível medir-se a qualidade associada a cada solução candidata. Na metodologia de design inverso determina-se a medida de qualidade de cada solução computada, o que permite saber em cada iteração qual o melhor candidato à solução final. Na metodologia *Design Gallery* faz-se uma classificação de todas as soluções interessantes geradas e apresentam-se as mais promissoras numa interface visual hierarquizada navegável pelo

[2] Também designada por "tentativa e erro".

utilizador, mas sem a indicação da medida de qualidade de cada solução. Além disso, em problemas de elevado custo computacional, a geração de muitas soluções aumenta consideravelmente o tempo de processamento, o que pode ser incomportável. Nesses casos, o design inverso baseado num método de optimização global adequado (secção 2.4.2) pode evitar a geração excessiva de soluções intermédias desinteressantes e concentrar-se nas regiões mais promissoras do universo de soluções, tentando encontrar a solução óptima mais rapidamente.

3.1.1. Design de Iluminação Ideal

O design de iluminação "ideal" representa o design na sua abstracção máxima, desprovido de todos os pormenores acessórios. Em termos ideais, o designer deveria descrever de modo preferencialmente qualitativo os objectivos de iluminação, os quais seriam imediatamente validados e, em caso de conflito, assinaladas as causas. Conjuntamente com a geometria e os materiais de superfície dos objectos, uma ferramenta "ideal" de design de iluminação seria capaz de fazer muito rapidamente uma simulação do transporte da luz e apresentar os resultados fisicamente válidos, de uma forma visualmente adequada. Com uma ferramenta destas, dois cenários de utilização parecem evidentes:

- Tipo evolução interactiva – O designer faria a redefinição dos parâmetros do problema e obteria resultados imediatos, desejavelmente a taxas interactivas.
- Tipo design inverso – O designer faria uma especificação dos seus objectivos e das gamas de variação dos parâmetros, e obteria soluções óptimas rapidamente. Desta forma, seria possível obter ciclos de design altamente produtivos e conducentes às melhores soluções, do ponto de vista do designer.

Em ambos os cenários, a simulação do transporte da luz deverá ser efectuada por algoritmos com base física demonstrada, por forma a garantir a validade dos resultados obtidos.

O ciclo de design tradicional é formado por iterações de pesquisa de parâmetros, com o objectivo final de determinar os seus valores óptimos. Os parâmetros que os designers tentam optimizar estão quase todos relacionados com as luminárias, nomeadamente as suas localizações, disposição relativa, espaçamentos, etc. No entanto, a falta de flexibilidade dos métodos de design tradicional dificulta a experimentação.

O ciclo de design ideal seria semelhante, mas com uma maior diversidade de parâmetros a experimentar:

- Parâmetros de luminárias – Posição e orientação espacial, potência emissora, entre outros.
- Parâmetros geométricos – Espaçamentos entre luminárias, restrições geométricas e direccionais, etc.
- Parâmetros lógicos – Tipos de luminárias, esquemas de iluminação, etc.
- Parâmetros de cena – Alterações de geometria de cena, alterações de tipos de materiais, etc.

Tanto em cenários do tipo evolução interactiva como em design inverso, em cada iteração de design efectuar-se-iam uma ou mais simulações do transporte da luz, cujos resultados seriam utilizados para calcular a medida de qualidade da solução encontrada. No cenário de evolução interactiva, o utilizador decidiria, após cada iteração, se a solução encontrada era satisfatória. Caso não fosse, deveria alterar algum dos dados de entrada (geometria, materiais ou objectivos) e relançar o processo. No cenário de design inverso, uma ferramenta computacional controlaria a sequência de iterações com o objectivo de optimizar os parâmetros de design. O utilizador poderia, em qualquer instante, visualizar as soluções existentes e interromper o processo, caso achasse conveniente.

O actual estado da arte na área da simulação do transporte da luz não leva a supor que o design de iluminação "ideal" seja realizável, pelo menos a médio prazo. Nessa medida, torna-se necessário encontrar alternativas que permitam tratar o problema de forma razoável (em termos de consumo de recursos computacionais, tempos de processamento, etc). Algumas alternativas serão descritas neste trabalho.

3.1.2. Metodologias Baseadas em Objectivos

Na secção 3.1 foram apresentadas as principais metodologias de design que podem ser aplicadas ao design de iluminação. A metodologia de design inverso (Fig. 13) parece ser a mais prometedora no contexto actual das tecnologias de simulação computacional do transporte da luz. A noção de "objectivos" como dados de entrada, neste tipo de metodologia, tem em vista o aumento de eficiência do processo de design, no sentido de se evitar a exploração de regiões desinteressantes do espaço de design.

Tradicionalmente, os objectivos são de natureza quantitativa e estática, ie, definem-se numericamente no início e permanecem inalterados durante todo o processo de design. Quando os graus de liberdade do problema podem ser relacionados com parâmetros de um certo espaço de configuração multi-dimensional e a cada conjunto de valores dos parâmetros se associa um valor numérico representativo do grau de satisfação dos objectivos iniciais, através de uma função custo, o problema pode ser transformado num problema "equivalente" de optimização global. A optimização incide sobre a função custo, procurando-se determinar o seu valor extremo. Os valores dos parâmetros que produzem o extremo da função custo correspondem à solução do problema de design original.

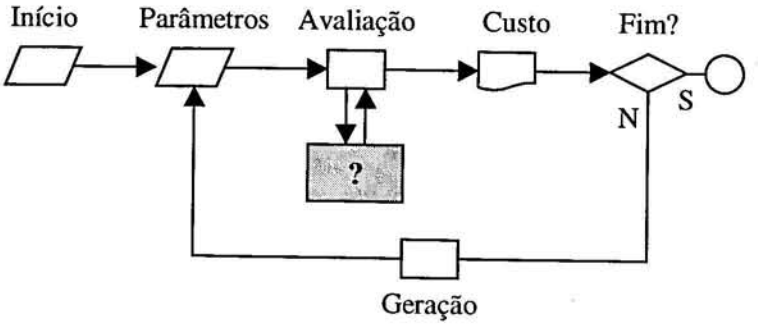


Fig. 15 – Design como optimização global

A Fig. 15 ilustra a transformação referida. Note-se que o bloco assinalado com "?" é a única entidade directamente relacionada com o problema original: à entrada desse bloco, os parâmetros do problema de optimização global são transformados em valores relacionados com o problema original. O resultado do processamento do bloco é um valor numérico de satisfação de objectivos que será associado a um valor de custo para optimização global.

Há situações em que as condições anteriormente referidas não se verificam:

- Objectivos qualitativos – Os objectivos não podem ser convertidos em versões quantitativas, ou, podendo ser, geram um conjunto contraditório de objectivos quantitativos. Tais situações impedem a transformação do problema original num problema de optimização global convencional baseado em função custo (por exemplo, design de iluminação "intimista", com o fim de obter a expressão de sentimentos ou emoções).

- Dados dinâmicos – Os dados do problema ou os objectivos variam no tempo de forma imprevisível, o que invalida a transformação num problema de optimização global convencional (por exemplo, quando a variação diária da iluminação natural é usada para modificar a vertente estética do espaço).

Como consequência, será praticamente impossível especificar uma função custo ou existirá um espaço de configuração de parâmetros de design demasiado extenso para ser convenientemente explorado. Para situações tão complexas, sobretudo do ponto de vista computacional, uma variante de design inverso, passível de aplicação, é aquela que emprega algoritmos evolucionários como motor do ciclo de design. Como já foi anteriormente referido (secção 2.4.2.5), a aplicação de algoritmos evolucionários não é geralmente capaz de produzir soluções "óptimas" no sentido convencional do termo. No entanto, a sua inspiração em ideias de selecção e o facto de pesquisarem populações de soluções faz crer que possam ser os mais apropriados para problemas de design claramente sub-especificados (informação inicial insuficiente ou vaga) ou para problemas de design sobre-especificados (informação inicial excessiva ou contraditória).

Uma solução interessante provavelmente será um misto de design inverso, *Design Gallery* e algoritmos evolucionários, conforme se apresenta na Fig. 16. Esta metodologia incorpora as vantagens de todas as metodologias referidas, mas tende a reduzir as desvantagens individuais de cada uma, resultando num processo de design capaz de auxiliar o designer, mas sem o substituir.

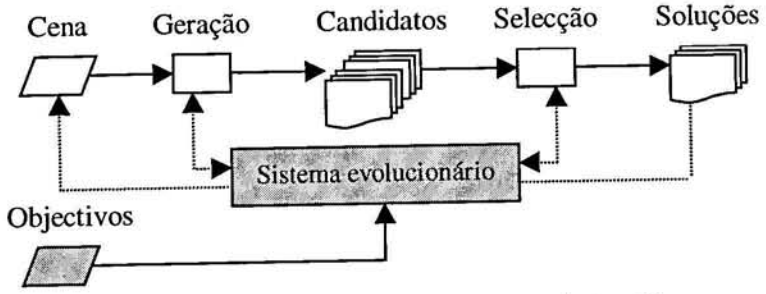


Fig. 16 – Design de iluminação evolucionário

Esta metodologia evolucionária de design parece apresentar algumas vantagens conceptuais importantes sobre as outras metodologias de design:

- Maior semelhança com o processo mental humano, que é fortemente evolucionário, no sentido em que o designer tende a alterar os seus objectivos, mas tentando reaproveitar o conhecimento anteriormente adquirido.
- Maior ênfase dado ao design do que aos aspectos quantitativos da iluminação, embora o design deva continuar a ser baseado em algoritmos de simulação do transporte da luz fisicamente válidos.
- Permitir várias aproximações ao design, desde o caso com objectivos mínimos (tende para o *Design Gallery*) até ao caso com objectivos muito específicos (tende para o design inverso).

Em contrapartida, são necessários mais requisitos:

- Garantir permanentemente a validade física dos resultados obtidos, a fim de se evitar soluções de design impraticáveis.
- Evitar ser intrusivo ou rígido, ie, evitar forçar ou impedir a escolha de direcções de design consideradas mais interessantes pelo utilizador.

- Detectar situações "inverosímeis" ou "irrealistas", ou seja, soluções que sendo fisicamente correctas, possam, no entanto, ser consideradas más opções de design.

No estado actual das tecnologias envolvidas no design de iluminação, a vertente menos desenvolvida é a do apoio ao design. Isso constata-se pelo uso ainda predominante de métodos baseados em evolução interactiva, nos quais o designer está essencialmente entregue a si próprio e não recebe *feedback* adequado para perceber devidamente os resultados obtidos nem o que deve ser modificado. A vertente de engenharia da iluminação, que engloba os modelos ópticos do transporte da luz, modelos da visão e percepção humana e algoritmos de simulação, está razoavelmente desenvolvida e permite obter resultados verosímeis com recursos computacionais razoáveis. No entanto, as limitações apontadas na secção 2.1.5 são ainda demasiado importantes e justificam mais investigação científica.

3.2. MÉTODOS DE PROJECTO DE ILUMINAÇÃO

Os métodos de projecto de iluminação procuram fundamentalmente determinar a melhor combinação de luminárias que assegura uma adequada qualidade visual, incluindo eventualmente iluminação artificial manipulada através de dispositivos. Essa qualidade a atingir deverá ser função dos fins a que se destina o espaço, das actividades que nele se irão desenrolar, da natureza dos utilizadores, da geometria dos objectos, dos materiais presentes, etc. A fim de tornar o processo mais fácil, é típico efectuar, numa primeira fase, o levantamento das tarefas visuais presentes e dos tipos de iluminação requeridos (ambiente, destaque, etc). A segunda fase parte dos resultados obtidos para fazer uma selecção inicial dos tipos de luminárias a usar. Note-se, no entanto, que é nesta fase que se devem ter em conta as normas, princípios, critérios e outras restrições que poderão condicionar o leque inicial de hipóteses.

Devido à complexidade do fenómeno óptico, praticamente nenhum designer de iluminação, em projectos de alguma relevância, confia totalmente nos resultados empíricos obtidos, pelo que é frequente o recurso a simulações directas do problema e das soluções encontradas. Estas simulações baseiam-se na própria óptica (através de modelos físicos) ou em modelos computacionais inseridos em aplicações informáticas de simulação[3]. No entanto, sendo passível de medições e análises quantitativas, a iluminação é um dos elementos ambientais que tende a ser simplificada em demasia e, por isso mesmo, fonte potencial de erros de design. Além disso, níveis máximos e mínimos de iluminância e outros critérios meramente numéricos definem-se através de normas, princípios e regulamentos que não levam em conta os aspectos perceptuais do ambiente.

3.2.1. Métodos Analógicos

Considerando como métodos analógicos aqueles em que não existe uma simulação computacional significativa do transporte da luz, os métodos de "modelos à escala" assumem-se como os mais interessantes deste tipo. Uma das suas vantagens é permitir um estudo quase simultâneo da arquitectura e da iluminação, o que os torna atractivos em fases de design muito intenso. Ainda hoje são as ferramentas favoritas de muitos arquitectos, por serem fáceis de construir e modificar, e muito úteis para comunicar ideias aos clientes. Actualmente, o artista James Casebere emprega maquetas minuciosas feitas de cartão e pedra, representativas de espaços arquitectónicos vazios e fotografadas através de técnicas especiais por ele

[3] A óptica é demasiado complexa para ser abordada analiticamente, excepto em casos muito simples.

desenvolvidas, para transmitir a sua visão romântica, mas ao mesmo tempo austera, de "realidades" tridimensionais incrivelmente convincentes [Casebere99].

Dado que a iluminação é independente da escala[4], um modelo que reproduza com fidelidade a geometria do espaço e os materiais de superfície pode representar com elevada exactidão os diversos efeitos luminosos (qualitativos e quantitativos). No entanto, quando a iluminação natural faz parte das condições iniciais do problema, torna-se necessário usar um sol artificial e/ou um simulador de céu encoberto, dado que as entidades naturais não se conseguem escalar adequadamente.

Um caso particular de "modelos à escala" são os modelos em tamanho natural, usados apenas em situações muito excepcionais. A fim de serem exactos, estes modelos requerem a existência de objectos e materiais reais. Porém, uma vantagem indiscutível é a presença física na cena, a qual permite análises e experimentações muito convincentes, para além da aquisição fácil de dados quantitativos.

3.2.2. Métodos Empíricos

Os métodos empíricos de projecto de iluminação foram desenvolvidos para utilização em espaços estereotipados (espaços de escritório, espaços fabris, etc), nos quais os objectivos de iluminação são aproximadamente semelhantes e os graus de liberdade do design são relativamente baixos. De um modo geral, recorrem a procedimentos constituídos por passos de determinação de parâmetros seguidos por consultas em dados tabelados, baseados em normas e regulamentos, resultando em recomendações qualitativas e quantitativas [Burton99]. Devido à complexidade da simulação do comportamento da luminância (radiância), estes métodos utilizam essencialmente a iluminância (irradiância)[5]. O ponto de partida é quase sempre a determinação da categoria de iluminância (Tab. 2):

Cenário	Descrição de Tarefa	Categ.	Iluminâncias [lux]
Geral	Esp. públicos (pouco iluminados)	A	20, 30, 50
	Esp. públicos (muito iluminados)	B	50, 75, 100
	Esp. de trabalho (poucas tarefas visuais)	C	100, 150, 200
Local	Esp. de trabalho (tarefas visuais simples)	D	200, 300, 500
	Esp. de trabalho (tarefas visuais normais)	E	500, 750, 1000
	Esp. de trabalho (tarefas visuais complexas)	F	1000, 1500, 2000
Suplementar	Esp. de trabalho (tarefas de tamanho normal)	G	2000, 3000, 5000
	Esp. de trabalho (tarefas de tamanho reduzido)	H	5000, 7500, 10000
	Esp. de trabalho (tarefas de tamanho minúsculo)	I	10000, 15000, 20000

Tab. 2 – Categorias de iluminância em função das tarefas visuais

Alguns conceitos utilizados por estes métodos [Burton99] são:

- Factor de ajuste – Usado para escolher a iluminância dentro da categoria seleccionada; depende da idade média dos ocupantes, do nível de importância das tarefas e da quantidade de luz reflectida pelo ambiente de fundo.
- Reflectância das superfícies – Valor percentual arbitrado em função da cor, textura e reflectividade das superfícies (principalmente chão, paredes e tecto).
- Rácios de cavidade – Valor representativo da luz que atinge as superfícies reflectivas, calculado em função das dimensões principais do espaço:
  $R_{CR} = 5A(C+L)/CL$ (A – altura; C – comprimento; L – largura).

[4] O comprimento de onda da luz pode ser ignorado sem se afectar a validade do modelo.
[5] Embora existam procedimentos simples para analisar o ofuscamento e os níveis de luminância.

- Coeficiente de utilização – Representa a percentagem de luz que abandona as superfícies iluminadas (calculado através de tabelas próprias de cada tipo de luminária).

De um modo geral, estes métodos empíricos assumem geometrias espaciais paralelipipédicas, não levam em conta a presença de objectos capazes de influenciar a iluminação e não conseguem analisar facilmente a iluminação natural.

3.2.3. Métodos Computacionais

Tipicamente, os métodos computacionais baseiam-se em aplicações informáticas capazes de simular o transporte da luz, incorporando um número variável de fenómenos e assumindo algumas simplificações. Os resultados directos obtidos podem ser:

- Gráficos de iluminância em conjuntos de pontos do espaço.
- Gráficos de luminância em conjuntos de pontos do espaço segundo certas direcções.
- Imagens fotometricamente realistas e visualmente correctas.

Estes métodos necessitam de uma descrição completa da geometria do espaço e dos objectos existentes, dos materiais de superfície presentes e das luminárias a testar; como resultado da simulação produzem dados quantitativos, sobre os quais o designer toma decisões de aceitação ou recusa das hipóteses de iluminação. São métodos frequentemente baseados em estratégias de tentativa e erro, por isso mesmo muito dependentes da experiência acumulada e da intuição do designer para produzir resultados úteis em prazos razoáveis. Uma vantagem adicional destes métodos é poderem ser interligados com métodos de simulação de energia a fim de se estimar custos energéticos, um aspecto cada vez mais actual.

3.3. ESTADO DA ARTE DO DESIGN DE ILUMINAÇÃO

A obtenção de consensos sobre o que é o design de iluminação, e por consequência a qualidade de iluminação, passa pela compreensão do que são boas ou más soluções de iluminação. Actualmente, o design de iluminação vive tempos conturbados pela existência de regulamentos, normas e regras empíricas aplicáveis a espaços padronizados, cada vez mais postos em causa pelo facto de terem origens geográficas e culturais distintas e de terem sido obtidos há muitos anos através de processos hoje em dia considerados pouco rigorosos.

O trabalho de [Veitch96] descreve pormenorizadamente o estado da arte da qualidade de iluminação e a confusão reinante quando se tentam correlacionar aspectos de qualidade de iluminação com factores humanos tais como desempenho, conforto e bem-estar. O debate sobre a relação entre o design e a qualidade de iluminação tornou-se mais importante a partir do momento em que a noção de conservação de energia ganhou relevo público e as normas de construção de edifícios reduziram a energia disponível para a iluminação. Tentativas prévias de desenvolvimento de métricas de qualidade de iluminação [Leung94] parecem ter falhado devido a abordagens pouco rigorosas (investigação insuficiente, análises estatísticas discutíveis, etc). A falta de consenso sobre o que é a qualidade de iluminação parece dever-se à falta de comunicação entre os cientistas do comportamento e os cientistas da iluminação; os principais benefícios de uma elevada qualidade de iluminação manifestam-se de modo comportamental nos utilizadores.

Segundo Veitch, actualmente sabe-se menos sobre a qualidade da iluminação do que se sabia há cem anos, apesar de um século de práticas de iluminação e de várias dezenas de anos de actividade de organizações profissionais. Mesmo com uma compreensão da qualidade de iluminação fundamentada em investigação científica sólida, o design de iluminação não se tornará uma simples questão de números.

Pela sua importância no estudo do design e qualidade de iluminação, destacam-se duas experiências do *Institute for Research in Construction* (IRC), organização do *National Research Council* (NRC) do Canadá.

Experiência 1

O espaço usado nesta experiência era do tipo escritório, com seis células de trabalho, cada uma contendo um armário e uma mesa em forma de L, esta última suportando um ecrã de computador. As células são separadas por painéis verticais elevados (cerca de 1.6m de altura), conforme se mostra na Fig. 17.

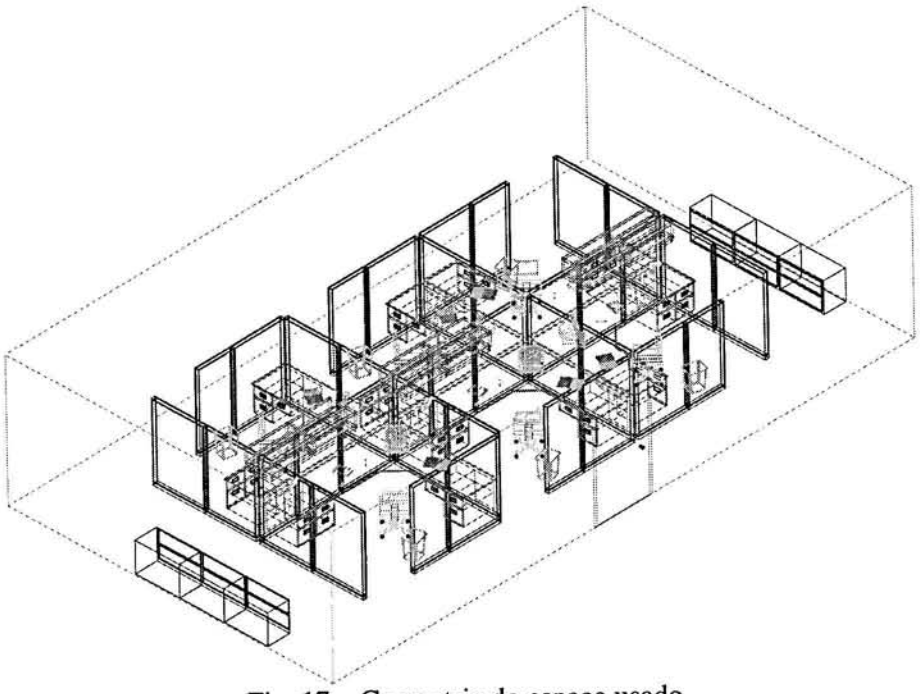


Fig. 17 – Geometria do espaço usado

A primeira experiência consistia no exame das características de nove soluções diferentes de design de iluminação (Fig. 18) por um painel de especialistas. As soluções representavam diversas combinações de densidade de potência iluminante (DPI) e "qualidade de iluminação", tendo sido definidas por designers de iluminação e luminotécnicos canadianos. O painel de avaliadores era formado por mais de 40 peritos de diversas proveniências e tinha acesso a dados quantitativos muito pormenorizados sobre a experiência.

1ª linha: luminárias embutidas com lentes prismáticas
2ª linha: luminárias embutidas com *louvres* parabólicos
3ª linha: luminárias directas ou indirectas
colunas: DPI crescente da esquerda para a direita

Fig. 18 – Soluções de design de iluminação para avaliação por peritos

Esta experiência pretendia avaliar:

- Se a densidade de potência iluminante afecta o desempenho, satisfação e estado emocional de um utilizador durante uma sessão diária.
- Se as soluções de design definidas pelos peritos como sendo de elevada qualidade são realmente melhores em termos de desempenho, satisfação e estado emocional de um utilizador durante uma sessão diária.
- Se é possível correlacionar aspectos comportamentais com grandezas físicas de iluminação.

Os resultados obtidos e as conclusões derivadas foram surpreendentes [Veitch96b]:

- A variabilidade das pontuações atribuídas foi elevada; quase todas as soluções receberam pelo menos uma pontuação mínima e uma máxima, o que evidencia uma falta de consenso sobre o que é a qualidade da iluminação.
- A concordância entre as "melhores" soluções previstas pelos especialistas que definiram os diversos cenários de iluminação e as opiniões dos peritos foi baixa.
- As imagens produzidas por computador tiveram uma grande repercussão na avaliação, concluindo-se que as deficiências da imagem podem influenciar muito as avaliações.
- Ficaram patentes diferenças culturais importantes entre os peritos americanos e os não-americanos (essencialmente europeus); focos de discordância foram a elevação dos painéis, a falta de janelas, luminárias suspensas, entre outros.
- O uso de ferramentas computacionais deve ser encorajado, mas é necessário estudar melhor a sua validade na aplicação ao design de iluminação e, principalmente, como meio de apresentação de resultados a clientes.
- A validade de normas, regulamentos, recomendações, etc, relacionados com design e qualidade de iluminação deve ser revista, sobretudo porque os factores comportamentais dos clientes não são devidamente tomados em consideração.

Em jeito de conclusão final, parece que ninguém sabe definir o que é "qualidade de iluminação".

Experiência 2

A literatura sobre iluminação evidencia uma falta de consenso sobre o que são as condições ideais de iluminação de trabalho. Esta experiência visava aferir os efeitos do controlo individual da iluminação sobre o desempenho de tarefas visuais e a satisfação dos utilizadores. Para tal, o utilizador podia escolher controladamente as características de iluminação para fins de trabalho centrado no ecrã. O espaço de trabalho usado era o mesmo da experiência anterior (Fig. 17).

Os resultados e as conclusões são sumariados em [Veitch99]:

- A variabilidade das escolhas é elevada.
- A concordância das escolhas com normas, regulamentos, etc, foi considerada boa.
- A percentagem média escolhida para o desempenho das tarefas visuais foi de 52% para a iluminação directa, 43% para a iluminação indirecta e os restantes 5% para iluminação complementar localizada.
- As escolhas dos utilizadores respeitaram as normas que regulamentam o consumo de energia em edifícios e geraram elevados índices de satisfação pessoal.
- É recomendável que se evitem a todo o custo imagens reflectidas de luminárias nos ecrãs, assim como todas as manifestações de ofuscamento.

Em jeito de conclusão final, a variabilidade das respostas leva a crer que não existe consenso sobre o que são as "condições ideais de iluminação de trabalho".

3.4. SUMÁRIO

Neste capítulo abordaram-se as metodologias de design, os métodos de projecto de iluminação e descreveu-se o estado da arte do design de iluminação.

Em termos de metodologias de design, concluiu-se que as metodologias de design inverso possuem um potencial de utilização que as torna as mais indicadas para tratar problemas de design de iluminação. Realçou-se o papel dos objectivos de design como entidade a ter em conta nos processos de design semi-automáticos.

Na área dos métodos de projecto de iluminação, destacaram-se as potencialidades dos métodos computacionais, bastante mais flexíveis do que os outros métodos.

Em termos do estado da arte do design de iluminação aplicado a espaços interiores de trabalho, parece não haver actualmente consenso sobre o que é a qualidade de iluminação e quais são as condições ideais de trabalho.

4. DESIGN DE ILUMINAÇÃO BASEADO EM OBJECTIVOS

Neste capítulo descrevem-se inicialmente as grandezas envolvidas em iluminação e as características da metodologia proposta para o design de iluminação. Em seguida, aborda-se detalhadamente o papel da optimização em design de iluminação, com destaque para o papel da respectiva função custo.

Na secção 3.1 abordaram-se as principais metodologias de design de iluminação. Neste capítulo será analisada em pormenor a metodologia de design inverso aplicada ao design de iluminação, de acordo com a estrutura apresentada na Fig. 15, e que servirá de base aos trabalhos de investigação, desenvolvimento e implementação a descrever nos capítulos 5 e 6.

Devido à complexidade do design de iluminação em geral, procurou-se identificar um subconjunto relevante de situações de design de iluminação que pudesse ser abordado por metodologias de design inverso com recurso a função custo e a optimização global. Esta aproximação ao design de iluminação exige que os objectivos de iluminação sejam descritos de forma quantitativa e que permaneçam inalterados durante todo o processo de design, a fim de não invalidarem a pesquisa da solução "óptima", o que pode ser considerado como uma limitação desta aproximação. No entanto, o seu campo de aplicação é vasto e relevante, podendo ser empregue nos seguintes contextos:

- Determinação de características individuais de luminárias – Tipo, posição na cena, orientação, etc. Provavelmente, é o problema de design mais frequente, sendo difícil de resolver pelos métodos empíricos em espaços interiores cuja geometria não se coadune com as limitações impostas por esses métodos (limitações do tipo tectos horizontais e espaço com forma de paralelipípedo, entre outras).
- Determinação de características gerais de luminárias – Espaçamentos entre luminárias, tipos de arranjos, etc. Este é um problema importante e também de difícil resolução com os métodos empíricos.
- Determinação de características da cena:
  - — Geometria de objectos especiais, como sejam painéis, reflectores, filtros, etc. Sendo um tipo raro de problema, é completamente intratável pelos métodos empíricos.
  - — Materiais de superfície tais como acabamentos, efeitos de cor, etc. Problema raro e intratável pelos métodos empíricos.

Refira-se, porém, que a aplicação de metodologias baseadas em design inverso para tratar problemas de design de iluminação só se justifica se for garantida a validade radiométrica da simulação do transporte da luz. Sem garantias mínimas de validade física, os benefícios do design inverso perdem-se completamente e os resultados obtidos deixam de ser verosímeis.

Esta variante da metodologia do design de iluminação, baseada em design inverso, será designada **design de iluminação baseado em objectivos** no resto deste documento, a fim de se distinguir facilmente das outras metodologias. Por um lado, esta metodologia permite

implementar ferramentas computacionais mais simples, mas, por outro lado, introduz um elemento extra de complexidade considerável logo no início do processo de design: a especificação e o papel dos objectivos. Esta especificação, além de ser fulcral para a produção de soluções relevantes, é passível de incluir em si própria contradições graves ou limitativas da pesquisa de soluções, o que aliás é uma dificuldade comum a todas as metodologias de design referidas.

Na Fig. 19 mostra-se a influência dos objectivos do design de iluminação na metodologia baseada em objectivos. Como se pode constatar pela análise da figura, a especificação dos objectivos como entidade participante do processo de design pode fazer-se em três domínios:

- Domínio dos graus de liberdade de exploração do problema – Geralmente, os objectivos condicionam fortemente os graus de liberdade do problema. Por exemplo, problemas com objectivos mais vagos tendem a uma maior liberdade de exploração, logo com mais graus de liberdade ou com maior variação das gamas de valores associadas a esses graus de liberdade.
- Domínio dos dados de entrada do problema – Constituindo-se como uma novidade da metodologia proposta, certos tipos de objectivos poderão ser mapeados em dados de entrada específicos, os quais se juntam aos dados de entrada comuns em design de iluminação.
- Domínio da avaliação das soluções intermédias – Igualmente uma novidade da metodologia proposta, alguns tipos de objectivos podem ser mapeados dentro de uma função custo, cujo papel é classificar quantitativamente as sucessivas soluções intermédias geradas.

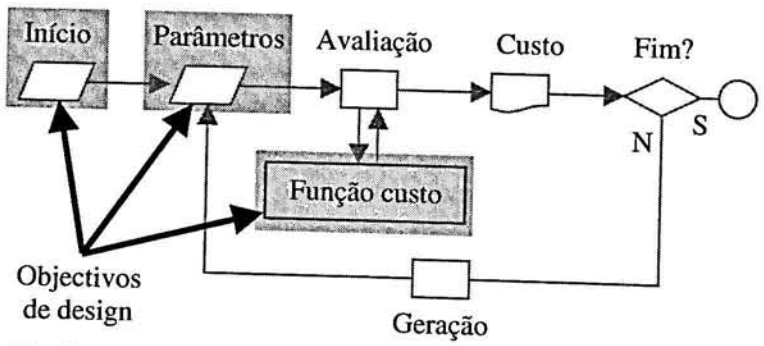


Fig. 19 – Papel dos objectivos no design inverso baseado em objectivos

Em relação a metodologias simples tais como a metodologia de evolução interactiva, na metodologia de design proposta os objectivos passam a desempenhar um papel fulcral na definição do problema e na sua resolução. Duas questões que ficam para já em aberto: como representar objectivos como dados de entrada (de que tipo, quais as grandezas envolvidas, etc) e como incorporar objectivos numa função custo (de que modo, etc).

Pelo facto de se utilizarem objectivos quantitativos e estáticos não se pode concluir imediatamente que seja possível empregar um método de optimização global para ajudar na pesquisa da melhor solução (Fig. 19). O emprego de métodos específicos de optimização global do tipo *simulated annealing* exige um espaço de configuração de parâmetros escalares, cujo domínio pode ser o conjunto dos números reais ou um seu qualquer subconjunto, e uma função de medição da qualidade de cada solução correspondente a um conjunto particular de valores dos parâmetros (secção 2.4.2.3). Outros métodos de optimização global utilizam outros mapeamentos dos graus de liberdade e dos objectivos, assim como transformações diferentes

dos parâmetros de optimização em soluções, por exemplo, os métodos evolucionários (secção 2.4.2.5).

Se, para um problema de design de iluminação baseado em objectivos, for possível definir uma função custo que correlacione os parâmetros quantitativos do problema e calcule um valor escalar representativo do custo da solução associada, estão reunidas as condições para a aplicação de métodos de optimização global capazes de determinar a solução óptima, embora os recursos necessários para a obter possam ser elevados, o que será abordado posteriormente.

4.1. GRANDEZAS USADAS EM DESIGN DE ILUMINAÇÃO

Como já foi referido na secção 2.1.3.1, as principais grandezas radiométricas envolvidas na iluminação são: a radiância espectral, a radiância e a irradiância. No entanto, as características do sistema visual humano afectam enormemente a percepção dos fenómenos luminosos. Embora o sistema visual humano apenas apreenda estados de equilíbrio da distribuição da radiância, possui uma dimensão temporal de funcionamento que não pode ser desprezada. Esta dependência é facilmente notada quando se alteram bruscamente as condições de iluminação, situação em que o olho humano precisa de algum tempo para se adaptar às novas condições.

A solução utilizada para descrever quantitativamente a percepção humana dos fenómenos luminosos baseia-se na fotometria (secção 2.2.2), a qual usa como grandeza básica a luminância, ie, a radiância afectada de uma curva de sensibilidade humana média dependente do comprimento de onda. Isto explica porque as normas, princípios e regras utilizam principalmente as grandezas fotométricas luminância e iluminância. No entanto, é frequente medirem-se as seguintes grandezas fotométricas de forma directa:

- Intensidade luminosa – Esta grandeza é medida numericamente com um fotómetro.
- Fluxo luminoso de uma fonte de luz – Medida através de um fotómetro esférico ou aparelho semelhante.
- Luminância – A medição pode ser feita através de um medidor de luminância; também se pode usar um fotómetro, mas a área de emissão deve ser muito pequena (cobrindo o emissor com um tecido opaco escuro que possua uma pequena abertura, por exemplo), sendo necessário dividir a iluminação obtida pela área de emissão para obter o valor pretendido.
- Iluminância – Pode ser medida através de um luxímetro (os medidores de exposição, muito utilizados em fotografia, também podem ser usados para este fim).

4.2. OBJECTIVOS DO DESIGN DE ILUMINAÇÃO

De acordo com a secção 3.1.2, a metodologia de design de iluminação baseada em objectivos requer que os objectivos sejam quantitativamente especificados no início do processo de design. Esses objectivos podem ser classificados de diversas formas, conforme a sua relação com as grandezas físicas da iluminação e do espaço.

O design de iluminação baseado em objectivos utiliza como informação inicial um conjunto de quatro entidades: a geometria, os materiais de superfície, as luminárias (ou fontes de luz) e as características da iluminação pretendida. As três primeiras entidades fornecem a base física dos fenómenos ópticos, ao passo que a iluminação representa a manifestação física dos comportamentos ópticos desejados. Adicionalmente, a cada uma destas entidades pode estar associado um grau de incerteza na sua especificação quantitativa. No fundo, os diferentes objectivos serão relações impostas pelo utilizador com o fim de reduzir ao mínimo essa

incerteza colectiva. Os parâmetros correspondentes a essa incerteza mínima serão a solução do problema de design de iluminação, no caso dos objectivos terem sido adequadamente definidos.

Assim sendo, as secções seguintes relacionam-se com as quatro entidades referidas:

- Objectivos radiométricos – Iluminação.
- Objectivos geométricos – Geometria e luminárias.
- Objectivos direccionais – Geometria e luminárias.
- Objectivos estéticos – Materiais de superfície.

Para além dos objectivos facilmente enquadráveis nas categorias referidas, poderão existir outros objectivos que se relacionem com essas categorias de formas menos evidentes.

4.2.1. Objectivos Radiométricos

Os objectivos de natureza radiométrica são aqueles que se relacionam com grandezas físicas de um modo directo. No entanto, poderão ser usadas versões fotométricas dos objectivos. Os tipos de objectivos radiométricos mais comuns são:

- Níveis de irradiância (iluminância) – Os apresentados na Tab. 2 são geralmente valores mínimos a respeitar, mas há casos especiais em que não podem ser ultrapassados determinados valores (museus, etc).
- Níveis de radiância (luminância) – Apesar de serem pouco utilizados, são muito importantes para reduzir as probabilidades de efeitos prejudiciais tais como ofuscamento e outros.

4.2.1.1. Critérios Visuais

Os objectivos associados a critérios visuais também podem ser considerados do tipo radiométrico. O mais utilizado é a probabilidade de conforto visual, que é um índice de satisfação de uma cena e respectivas luminárias em relação ao ofuscamento. Uma solução de iluminação é considerada sem ofuscamento quando pelo menos 70% de um conjunto de pessoas se sente "bem" nesse ambiente [IESNA87]. Conforme foi referido na secção 2.2.3.2, o ofuscamento tem de ser adequadamente prevenido, dado que a sua correcção é mais difícil de efectuar depois do espaço construído. Para tal, é possível definir objectivos radiométricos que permitem reduzir as possibilidades do seu aparecimento em termos muito prejudiciais. Algumas das recomendações utilizadas para redução do ofuscamento, sobretudo do ofuscamento reflectido, são:

- Projecto cuidadoso do sistema de iluminação e/ou distribuição das zonas de trabalho, de modo a que a tarefa visual não fique próxima do ângulo de reflexão das fontes de luz em relação ao olho.
- Aumento da luz incidente no campo visual segundo direcções perpendiculares à direcção de visão.
- Uso de luminárias com grande superfície e baixa luminância.
- Uso de materiais de superfície foscos, a fim de se minimizar o efeito de reflexão.

Dado que o ofuscamento tem um componente direccional, a utilização de objectivos para prevenção de efeitos de ofuscamento exige a consideração de elementos geométricos e angulares, para além dos elementos radiométricos, pelo que o ofuscamento também pode ser considerado importante em termos de objectivos geométricos ou direccionais.

4.2.2. Objectivos Não-Radiométricos

Os objectivos ditos não-radiométricos são todos aqueles que não se enquadram nas especificações luminotécnicas tradicionais, descritas pelos objectivos referidos na secção 4.2.1. Uma das maiores limitações das abordagens luminotécnicas baseadas em métodos empíricos é não poderem acomodar facilmente objectivos não-radiométricos, por exemplo, de natureza arquitectónica ou estética. Efectivamente, esses métodos foram criados para resolver situações padronizadas orientadas para usos muito específicos, pelo que não possuem a flexibilidade necessária para abordar problemas em que exista uma margem criativa, o que esteve na origem da controvérsia entre a visão técnica versus a visão artística do design de iluminação.

4.2.2.1. Objectivos Geométricos

Os objectivos geométricos estão associados a restrições geométricas de iluminação na cena e podem ser de diversos tipos:

- Características de luminárias – Quando as características não estão definidas e se comportam como parâmetros de design (abertura de luminárias do tipo foco, comprimento de luminárias fluorescentes, etc).
- Localização de luminárias – Quando se pretende que a posição física das luminárias na cena seja restringida a certos pontos, áreas ou volumes.
- Espaçamento entre luminárias – Para situações em que existem restrições ou relações predefinidas de espaçamento entre luminárias.
- Arranjo de luminárias – Situações em que, para além de restrições geométricas individuais, existem restrições aplicáveis ao conjunto das luminárias (arranjos em grelha rectangular, etc).
- Características de objectos – Por exemplo, quando as dimensões físicas podem variar e se pretende uma definição adequada aos objectivos pretendidos.
- Localização de objectos – Situações em que a localização de objectos pode ser um parâmetro do design de iluminação (por exemplo, localização de paredes, painéis, etc).
- Espaçamento e arranjo de objectos.

Este conjunto não é limitativo, pelo que poderão existir outros objectivos de iluminação não-radiométricos passíveis de serem classificados como geométricos. Como caso particular de objectivos geométricos que merecem destaque referem-se os objectivos ditos direccionais.

A importância dos objectivos direccionais manifesta-se de várias formas. A sua utilização na aplicação de restrições de ofuscamento é óbvia, dado o carácter eminentemente direccional deste efeito. Em espaços de trabalho, é frequente restringir-se a colocação de luminárias no tecto em função das posições de trabalho e das pirâmides de reflexão resultantes da posição dos olhos (ofuscamentos reflectidos). A restrição do ofuscamento directo das fontes de luz também pode ser facilmente descrita por objectivos direccionais.

Para além da aplicação deste tipo de objectivos a situações de prevenção de ofuscamento, também podem ser usados para restringir características direccionais de luminárias:

- Assegurar orientação para o tecto, chão, paredes ou objectos da cena.
- Evitar orientação para objectos da cena, inclusive outras luminárias.
- Garantir padrões de orientação das luminárias, etc.

Este tipo de objectivos é um dos aspectos mais ignorados nos métodos empíricos, os quais se limitam a fazer recomendações de carácter mais ou menos geral.

4.2.2.2. Objectivos Estéticos

A inclusão de objectivos estéticos pode representar um progresso significativo no design de iluminação, na medida em que permite uma margem de manobra até agora quase inexistente.

Por objectivos estéticos consideram-se aqueles que se relacionam com aspectos de satisfação visual, aparência, ambiência e outros. Exemplos concretos são gradações de intensidade e/ou cor, combinação de cores de materiais de superfície com luminárias, etc. No entanto, estes objectivos deverão ser quantificáveis, o que poderá causar algumas dificuldades na sua especificação, dado o carácter qualitativo e até subjectivo que normalmente se associa a noções de ordem estética.

Objectivos estéticos também podem ser, por exemplo, as características dos materiais de superfície quando não são especificadas previamente. A cor de um objecto pode ter uma influência importante na ambiência de um espaço interior, o grau de especularidade de uma parede, etc.

4.3. PAPEL DA GRANDEZA RADIÂNCIA

A iluminação é um fenómeno complexo que vai muito para além dos fenómenos ópticos, principalmente porque o comportamento do sistema visual humano gera efeitos perceptuais muito importantes (secções 2.2.2 e 2.2.3). Os fenómenos ópticos macroscópicos usados na descrição dos efeitos práticos da iluminação (reflexão, sombra, penumbra, claridade, etc) podem ser analisados em termos dos dois fenómenos radiométricos elementares: a propagação da luz e o seu espalhamento (secção 2.1.3).

Na maioria dos casos, de acordo com a premissa do meio não-participante, os fenómenos de espalhamento da luz são restringidos às superfícies dos objectos, o que faz com que a radiância seja a grandeza física fundamental nas abordagens da iluminação através de simulação. Se tivermos em conta o comportamento médio do sistema visual humano, poderá usar-se a luminância como substituto da radiância. Neste contexto, a radiância é "o que penetra no olho humano", sendo a luminância "aquilo que as pessoas vêem"[1]. Existe, porém, uma outra diferença fundamental entre estas duas vertentes da visão.

Para todos os efeitos práticos, a radiância é uma grandeza direccional apreendida pelos olhos humanos em estados de equilíbrio de distribuição (os fenómenos transitórios são de tal modo rápidos que podem ser ignorados), ou seja, em cenas estáticas a distribuição de radiância permanece inalterada. Em termos macroscópicos, a informação radiométrica que entra no olho não varia se as condições da cena se mantiverem inalteradas. Em contrapartida, "aquilo que as pessoas vêem" tem uma dependência temporal importantíssima, pois a percepção visual depende do que se vê no momento e daquilo que foi visto anteriormente, podendo este prazo estender-se até cerca de uma hora[2]. Como resultado, poderia dizer-se que a luminância "humana" é bastante mais complexa do que a Eq. 35 sugere, uma simples mudança de escala, dado que essa equação não incorpora a dependência temporal referida.

Em face das considerações anteriores, o tratamento computacional de simulações de iluminação em que se pretende manter uma validade física permanente obriga a utilizar a radiância como grandeza fundamental, na medida em que é mais "tratável" do que a luminância. Apesar do aumento de importância do componente perceptual da iluminação e, por consequência, também

[1] Mais correctamente seriam radiância e luminância "espectrais".
[2] Dependente da capacidade de adaptação do olho.

no design de iluminação, o papel do sistema visual humano deverá continuar a ser modelado como um processo final, ie, o tratamento computacional baseia-se na radiância e apenas no fim se efectua a conversão para grandezas ligadas à percepção visual humana.

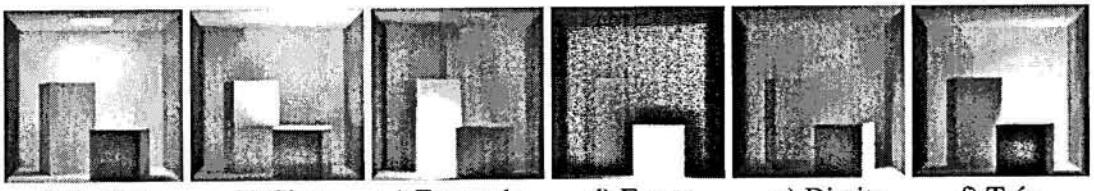
4.4. PAPEL DA GRANDEZA IMPORTÂNCIA

Na secção 2.1.4 mostrou-se que a radiância básica possui uma entidade dual, a importância, a qual respeita os mesmos mecanismos de transporte. Esta dualidade é importante porque permite o desenvolvimento de algoritmos de simulação do transporte da luz que:

- Iniciam os cálculos simultaneamente a partir do ponto de tomada de vista e das fontes de luz.
- Traçam os percursos dos raios luminosos vindos do ponto de tomada de vista e das fontes de luz.

Esta aproximação simultânea resulta numa maior eficiência na determinação de percursos luminosos, muito difícil de igualar por algoritmos mais convencionais, em que se traçam os referidos percursos com início apenas no ponto de tomada de vista ou apenas nas fontes de luz. Além disso, como os cálculos são orientados em função do ponto de tomada de vista (receptor dos raios luminosos) e das fontes de luz (emissor dos raios luminosos), os percursos luminosos traçados tendem a ser os mais relevantes para a visualização pretendida, pois não se gastam recursos computacionais a processar raios luminosos pouco importantes para a imagem final. O algoritmo de transporte de luz *Metropolis* [Veach97] emprega esta dualidade e parece ser bastante eficiente a computar imagens de geometrias "difíceis" (por exemplo, a tomada de visão dentro de uma sala iluminada indirectamente pela luz que entra através de uma porta ligeiramente aberta). As imagens produzidas por algoritmos mais convencionais apresentam fraca qualidade visual e possuem frequentemente erros grosseiros de iluminação.

Para ilustrar a noção de importância, considere-se a cena da "Caixa de Cornell"[3] apresentada na Fig. 20 (imagens geradas através do pacote de simulação *RADIANCE* [Ward94], descrito na secção 5.3.2.1).



a) Realista b) Cima c) Esquerda d) Frente e) Direita f) Trás

Fig. 20 – Imagens real e de "importância"

A imagem designada realista mostra o que é visto por um observador localizado em frente à cena. As restantes imagens mostram a distribuição de radiância resultante e a "imagem" correspondente quando se transforma cada face do cubo numa fonte de luz. O que estas imagens iluminadas pelas várias faces do cubo mostram é a respectiva importância em termos da tomada de vista em causa. Quando a cena é pouco iluminada, isso significa que a face do cubo que actua como fonte de luz é pouco importante para a visualização da cena. Assim sendo, as imagens b) a f) podem ser interpretadas como pistas de importância de cada face do cubo em termos da tomada de vista especificada:

[3] A"Caixa de Cornell" é uma cena muito utilizada para comparar e analisar algoritmos de síntese de imagem, tendo sido materializada nos anos 70 na Universidade de Cornell (EUA).

- A importância directa da face associada à imagem d) é muito grande, dado que essa face está voltada para o observador, mas a sua importância indirecta é muito baixa (a cena está "escura").
- A importância indirecta da face associada à imagem c) só se manifesta de modo relevante devido à reflexão numa das faces do paralelipípedo (importância indirecta de nível um); os outros níveis de importância indirecta são baixos.
- As importâncias indirectas de nível superior a um são mais significativas nas faces associadas às imagens b) e f); isso constata-se pelo facto da cena ser mais "iluminada" nessas imagens.

Cada face do cubo comporta-se como um emissor de importância e o seu efeito na visualização da cena pode ser quantificado através da medição da importância que atinge o ponto de tomada de vista. O transporte de importância permite assim medir a influência dos diferentes objectos em função de qualquer ponto da cena, e não somente apenas para efeitos de visualização através de imagens.

4.4.1. Transporte da Importância

Apesar do transporte de radiância ser uma simplificação da realidade, a sua base física é evidente. A radiância é uma versão imaterial do fotão, que surge despido das suas características mais complexas, sobretudo as quânticas. Apesar da aparente simplicidade, permite explicar a grande maioria dos fenómenos ópticos que acontecem nos ambientes humanos complexos. Ao invés, o transporte de importância não tem suporte físico em qualquer partícula subatómica. No entanto, tal constatação não obsta a que esse mecanismo de transporte possa ser usado para melhorar o comportamento de ferramentas computacionais que processam a iluminação.

O transporte de importância, por si só, não permite obter imagens sintéticas convencionais. A noção de importância está intimamente ligada a uma entidade e descreve o modo como essa entidade influencia o ambiente que a rodeia. Apesar de poder parecer uma limitação, na realidade é um aspecto muito interessante que pode ser usado para melhorar a obtenção de resultados, desde que criteriosamente empregue. Por exemplo, como é o caso do algoritmo *Metropolis* [Veach97], em que é usada para melhorar a determinação dos percursos luminosos importantes para o observador.

A metodologia de design de iluminação baseada em objectivos está muito dependente da noção de importância, a "importância" dos objectivos. Seria desejável converter esta noção de importância abstracta em critérios quantitativos que pudessem auxiliar a pesquisa de soluções.

No caso geral de design de iluminação, os objectivos não podem ser todos convertidos em emissores de importância e não é possível definir facilmente um problema de optimização global equivalente. Mas há casos importantes de design de iluminação em que as referidas operações podem ser efectuadas e a pesquisa pode ser guiada pela importância.

4.4.2. Design de Iluminação com Recurso à Importância

Em termos de design de iluminação, uma aplicação possível da importância surge na definição dos objectivos radiométricos: associar este tipo de objectivos a "fontes emissoras de importância" e depois determinar a sua influência nos objectivos não-radiométricos do design.

Na Fig. 21 mostra-se de que modo os vários tipos de objectivos de design de iluminação são incorporáveis na metodologia que se propõe. Como foi dito anteriormente, o emprego da importância nesta metodologia permite considerar os objectivos radiométricos como fontes emissoras de importância, a qual será processada de alguma forma dentro da função custo, de

acordo com os objectivos não-radiométricos definidos pelo designer. Na figura referida, a importância está presente nos blocos sombreados:

- Bloco Início – Definição de fontes emissoras de importância.
- Bloco Função Custo – A importância é a principal quantidade radiométrica processada na função custo, cujo valor final de custo dependerá das interacções de importância na cena constituída pela geometria, materiais de superfície e fontes de importância.

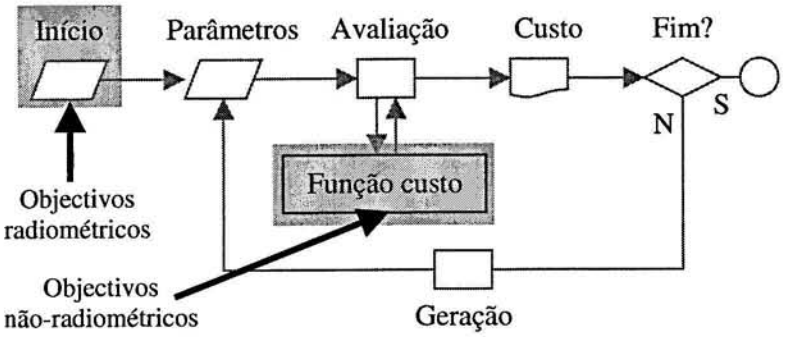


Fig. 21 – Papel da importância no design de iluminação baseado em objectivos

A título de exemplo, na Fig. 22 apresenta-se a geometria de uma célula de trabalho simplificada, comummente usada em espaços de trabalho do tipo escritório, que servirá de exemplo de definição de objectivos através de emissores de importância. Na figura destacam-se as zonas de trabalho mais importantes, principal e secundárias, assim como o ecrã. Num caso destes, a iluminação a providenciar deverá levar em conta factores locais tais como nível de iluminação adequado no tampo (iluminância superior a 500lux, por exemplo), inexistência de ofuscamento no ecrã, etc. Tipicamente, os espaços de escritório são constituídos por diversas células deste tipo, pelo que as características do conjunto de luminárias escolhidas não podem ser determinadas a partir de uma única célula.

Porém, uma análise que não leve em conta o efeito altamente direccional do material de superfície do ecrã poderá gerar resultados insatisfatórios. Para tal, devem ter-se em a conta a posição da face do utilizador em posição normal de trabalho e as luminárias. Sendo as características destas geralmente desconhecidas nas fases iniciais do design, é necessário recorrer a um processo de simulação para se destrinçarem as hipóteses favoráveis das desfavoráveis.

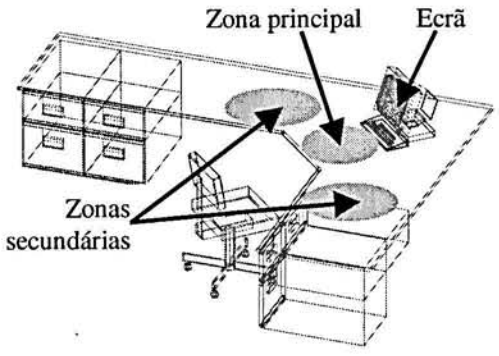


Fig. 22 – Célula de trabalho

Para ilustrar algumas das possibilidades desta metodologia e do transporte de importância, na Fig. 23 mostra-se um utilizador em posição normal de trabalho. Para além da posição da face em termos do ecrã, efeitos de sombra/penumbra poderão também ter alguma influência prejudicial sobre as zonas de trabalho, sobretudo a principal. Também se mostram os ângulos sólidos que podem afectar a tarefa visual, representados por cones com vértices nos olhos. Devido ao facto do ecrã ser reflectivo, a probabilidade de ocorrência de ofuscamentos é elevada. O ofuscamento directo deve-se à reflexão directa das luminárias no ecrã e o ofuscamento indirecto à reflexão no tampo da secretária da luz reflectida pelo ecrã. As recomendações apresentadas na secção 4.2.1.1 destinam-se precisamente a reduzir a probabilidade de ofuscamentos, mas tal poderá não ser suficiente.

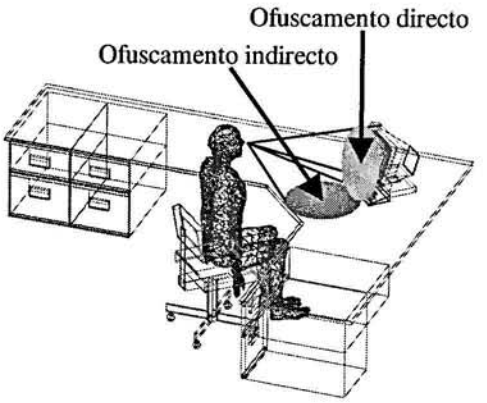


Fig. 23 – Célula de trabalho e ofuscamentos

Na metodologia de design de iluminação baseada em objectivos e com recurso ao transporte de importância, a detecção de situações problemáticas de ofuscamento pode ser efectuada através de simulações computacionais em que se definam fontes de importância associadas à face do utilizador (polígonos rectangulares, por exemplo). A posição destas fontes deverá ser ligeiramente à frente da face e a emissão de importância deverá ter ângulos sólidos adequados em torno da normal de cada polígono emissor.

A Fig. 24 mostra um exemplo de fontes de importância que modelam objectivos de iluminação.

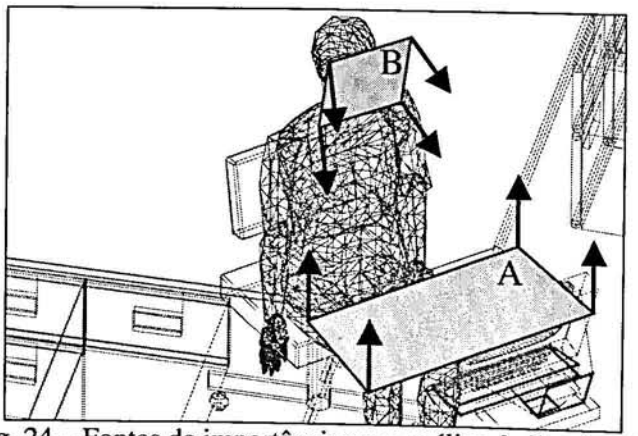


Fig. 24 – Fontes de importância para análise de iluminação

A fonte A representa um objectivo de maximização de radiância incidente no tampo, o qual corresponde tipicamente a objectivos de design em que se pretende garantir uma iluminação adequada numa certa região da cena. No caso apresentado, a região onde se situa a fonte A é uma parte do tampo de trabalho do utilizador, na qual ele irá realizar tarefas visuais relevantes e

que exigem níveis de iluminação apropriados (iluminâncias entre 500 e 1000lux, por exemplo). A fim de levar em conta a relevância desta região na definição da melhor solução de iluminação, o designer pode definir uma fonte de importância sobre essa região e atribuir-lhe um valor emissivo positivo e um ângulo sólido de emissão que melhor representem as circunstâncias que deseja modelar. Com este tipo de fontes de importância consegue-se garantir uma iluminação mínima, ie, maximizar a radiância incidente na região que as fontes representam. Por outro lado, a fonte B representa um objectivo de minimização de radiância incidente na face, o qual serve para modelar situações de design em que se pretende reduzir efeitos de iluminação de modo a evitar ofuscamento, obter níveis baixos de iluminação, etc. No caso vertente, é desejável que na face do utilizador não incidam radiâncias elevadas em ângulos sólidos pequenos vindas do tampo de trabalho, o que pode originar ofuscamentos e reduzir drasticamente a qualidade de iluminação. Para modelar este objectivo, o designer pode definir uma fonte de importância negativa com um ângulo sólido de emissão adequado sobre a posição mais provável da face do utilizador. Com este outro tipo de tipo de fontes de importância consegue-se evitar iluminação, ie, minimizar a radiância incidente na região que as fontes representam.

Para cada fonte de importância deverá ser efectuada uma simulação de transporte de importância. O estado de equilíbrio da distribuição de importâncias positivas/negativas será então usado para o controlo do processo de design, conforme se explica nas secções seguintes. O objectivo que se deseja atingir é a produção de soluções em que as regiões representadas por fontes de importância positiva recebam mais radiância e as regiões associadas a fontes de importância negativa recebam menos radiância. Para além do designer poder definir, para cada fonte de importância representativa de um objectivo de design, o valor emissivo e o ângulo de emissão, pode também correlacionar os efeitos das várias fontes de importância através da relação entre os valores absolutos dos valores emissivos. Assim, por exemplo, caso exista uma fonte de importância mais relevante do que as restantes, o designer pode aumentar o seu valor emissivo absoluto de modo a tentar condicionar a solução de iluminação no sentido de satisfazer mais o objectivo associado a essa fonte de importância.

4.5. OPTIMIZAÇÃO EM DESIGN DE ILUMINAÇÃO

O conceito de optimização do design de iluminação baseia-se na determinação dos valores de um certo conjunto de parâmetros que maximiza a satisfação de critérios associados ao próprio design. No caso particular das metodologias baseadas em objectivos quantitativos e com recurso ao transporte de importância, esta optimização pode ser quantificada e, por conseguinte, baseada em métodos de optimização global (Fig. 15). A capacidade "automática" de pesquisar e determinar as melhores soluções é uma vantagem muito importante deste tipo de metodologias, dado que liberta o designer da realização de tarefas de baixo nível conceptual.

Esta é uma visão apenas parcelar do que poderá ser a optimização do design de iluminação. Contudo, uma abordagem mais abrangente será mais difícil de implementar de forma automática: a quantificação das condições do design será mais difícil e complicada e as metodologias mais sofisticadas e complexas (Fig. 16).

Assumindo-se que o problema de design de iluminação é quantificável, no que se refere a objectivos e processo de pesquisa, falta abordar os aspectos intimamente ligados à utilização de métodos de optimização global.

4.5.1. Relevância dos Objectivos

Na metodologia de design de iluminação baseada em objectivos, estes desempenham um papel fulcral. Os objectivos de natureza radiométrica são passíveis de associação com fontes emissoras de importância, as quais são suficientemente configuráveis para acomodar quase todos os tipos de problemas reais. Porém, nem todos os objectivos podem ser modelados por fontes fictícias.

Algumas técnicas de optimização global recorrem ao conceito de função custo, a qual representa o grau de satisfação dos objectivos. O conceito de função custo, apesar de simples, encerra um enorme potencial de aproveitamento. É precisamente este potencial que se pretende manipular, a fim de poder incluir o comportamento de todos os objectivos que não podem ser associados à emissão de importância, mas que dela dependem para afectar a qualidade das soluções. Assim sendo, pode dizer-se que todos os objectivos afectam, em maior ou menor grau, o estado de equilíbrio da distribuição de importância na cena, comportando-se a importância como grandeza fundamental da pesquisa de soluções óptimas.

4.5.2. Objectivos como Fontes de Importância

A associação de fontes de importância a objectivos radiométricos pode ser realizada pela introdução de fontes emissoras de importância na geometria da cena. As características destes emissores de importância deverão reflectir adequadamente os objectivos desejados. Como representação de objectivos quantitativos de iluminação, a criação de fontes "fictícias" para emitir importância acrescenta uma complexidade adicional ao problema, situação frequente quando se transforma a representação de um problema num problema equivalente. A motivação é poder usar métodos de resolução computacionalmente mais favoráveis no problema equivalente do que no problema original. No entanto, é fundamental garantir que a transformação preserva o contexto do problema, ie, que as soluções óptimas do problema equivalente correspondem às soluções óptimas verosímeis do problema inicial.

As características das fontes de importância passíveis de uso para definição dos objectivos radiométricos são:

- Posição – A posição da fonte de importância é um aspecto fundamental. Tipicamente, os objectivos de natureza radiométrica estão fortemente associados a zonas específicas da cena (por exemplo, a iluminação horizontal num tampo de secretária, a iluminação vertical numa parede, etc).
- Tamanho – O tamanho de uma fonte de importância é também relevante. É desejável que a área da fonte de importância seja semelhante à área que se pretende iluminar.
- Ângulo sólido de emissão – Este aspecto é relativamente complexo de definir. Frequentemente deseja-se uma boa iluminação horizontal em superfícies de objectos horizontais (mesas, secretárias, chão, etc), o que significa que se atribui maior relevo à radiância que atinge essas superfícies através de direcções próximas da vertical (de cima para baixo). Assim sendo, a emissão de importância deve reflectir esse relevo e ser emitida nas direcções opostas.
- Tipo de distribuição de emissão – Normalmente deverão ser usadas distribuições de emissão constantes, ie, sem se privilegiar um conjunto de direcções. Por exemplo, caso exista uma distribuição prévia de radiância na cena (iluminação inicial), é possível modelar uma distribuição de emissão que leve em conta o efeito da iluminação inicial.

Como se pretende mostrar, os objectivos radiométricos são representáveis através de fontes de importância. No entanto, caso se utilize um algoritmo de simulação do transporte da luz que possua um operador de transporte igual para a radiância e importância (*vide* o enquadramento de

Veach referido na secção 2.1.4), então esse algoritmo pode ser usado indiferentemente para calcular os estados de equilíbrio da radiância ou da importância. Assim sendo, as fontes de importância podem ser representadas da mesma forma que fontes de radiância, em termos dos algoritmos de simulação do transporte da luz. Esta dualidade radiância/importância irá facilitar o desenvolvimento algorítmico da metodologia baseada em objectivos e a sua consequente implementação, conforme se verá nos capítulos subsequentes.

4.5.2.1. Iluminação Prévia

Em muitas situações de design de iluminação existe iluminação inicia, por exemplo, iluminação natural. Esta iluminação "prévia" tem de ser tomada em consideração na procura da melhor solução de iluminação, dado que impõe uma distribuição inicial de radiância na cena. Se esta iluminação prévia for contemplada na emissão de importância associada aos objectivos radiométricos, a metodologia baseada em objectivos leva adequadamente em conta os seus efeitos. No entanto, é importante referir que este contexto, iluminação prévia e objectivos de design, é mais complexo, porque, para além das condicionantes associadas aos objectivos, existem condicionantes extra relacionadas com a distribuição inicial de radiância, o que torna mais difícil a detecção de conflitos entre objectivos.

Na Fig. 25 apresenta-se um exemplo de uma sala contendo uma mesa, uma luminária prévia, representada pela esfera, e um utilizador. A luminária prévia é do tipo foco hemisférico e está apontada para o centro da mesa. Os materiais de superfície são ligeiramente especulares, do tipo plástico.

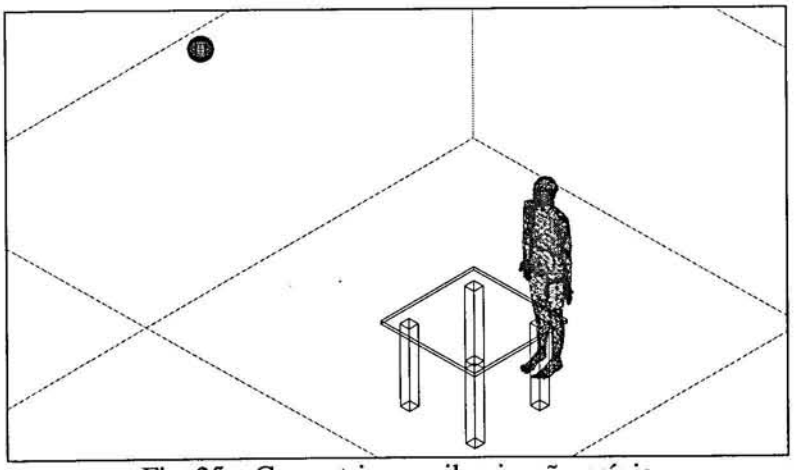


Fig. 25 – Geometria com iluminação prévia

Um método possível para levar em conta os efeitos da iluminação prévia em cada objectivo de tipo radiométrico é o seguinte:

- Distribuição de radiância[4] incidente – Em diversos pontos da fonte emissora de importância deverão ser calculadas as distribuições de radiância incidente oriundas da iluminação prévia. Caso essas distribuições sejam consideravelmente diferentes, a fonte inicial de importância deverá ser subdividida em várias fontes de importância, com o

[4] Por distribuição de radiância (importância) entende-se o conjunto de valores de radiância (importância) de raios luminosos que passam pelo ponto ao qual se refere a distribuição. Como é uma entidade angular, para a sua visualização optou-se por uma representação "esférica", em que o envelope do conjunto é representado por triângulos cuja distância em relação ao ponto central representa o valor de radiância (importância).

propósito de se obter uma distribuição de radiância incidente aproximadamente constante em cada fonte.

- Modificação da distribuição de emissão de importância – Para cada fonte de importância a usar, deverá "subtrair-se" o efeito da radiância incidente à importância a emitir. Este processo pode ser efectuado através da subtracção, à distribuição de importância a emitir, da distribuição de radiância incidente, eventualmente afectada de um factor de escala cujo valor deverá ser definido em função da relevância que se pretenda atribuir à iluminação prévia. No caso de se obterem importâncias "negativas", isso significa que existe um conflito de design, pelo que o designer deverá avaliar o problema e encontrar uma forma de o solucionar.

A distribuição de radiância provocada pela luminária no tampo da mesa (Fig. 26) é aproximadamente uniforme em todo o tampo e apresenta características angulares: um pico elevado e estreito correspondente à iluminação directa e picos "laterais" e "traseiro" correspondentes a reflexões de ordem um nas paredes, para além de um componente "contínuo" devido a reflexões de ordens superiores.

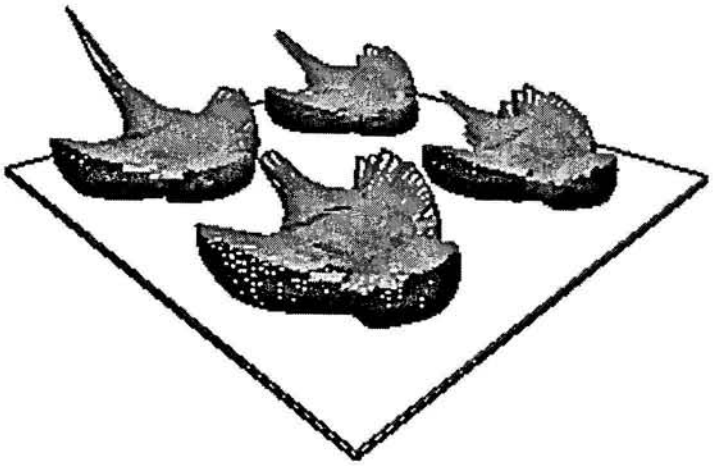
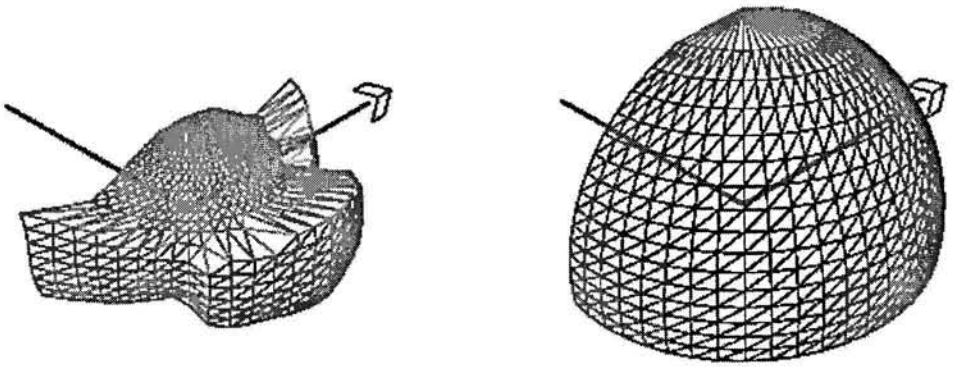


Fig. 26 – Distribuição de radiância no tampo da mesa (quatro pontos)

No caso do tampo da mesa ser um objectivo de iluminação e de se pretender levar em conta o efeito da iluminação prévia, é necessário determinar a importância que o objectivo tampo deverá emitir durante o processo de pesquisa de soluções.

A Fig. 27 mostra a distribuição prévia de radiância num dos pontos do tampo da mesa (imagem esquerda) e uma distribuição de importância uniforme pretendida (imagem direita), com um ângulo sólido equivalente a um quarto de esfera, orientado para a parede contrária à luminária, por forma a compensar a deficiência de iluminação vinda dessas direcções.

O processo descrito anteriormente permite determinar a distribuição de importância a utilizar, a qual depende da relação de escala estabelecida entre a distribuição pretendida de importância e a distribuição prévia de radiância (Fig. 27).



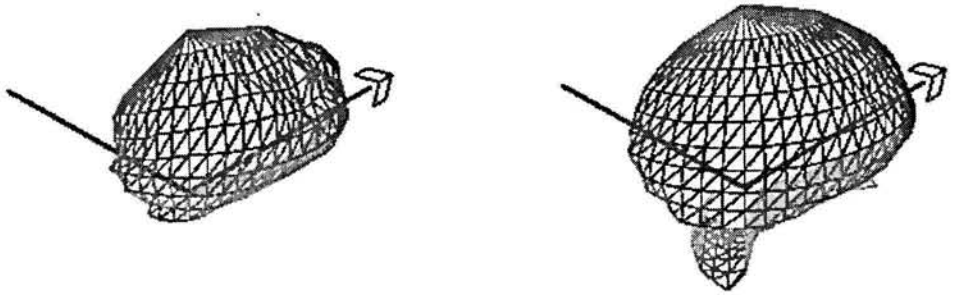
a) Distribuição prévia de radiância b) Distribuição pretendida de importância

Fig. 27 – Distribuições num ponto do tampo da mesa

Na Fig. 28 mostram-se as distribuições de importância a emitir resultantes de diferentes escalas entre a distribuição pretendida de importância e a distribuição prévia de radiância (66% no lado esquerdo e 100% no lado direito).

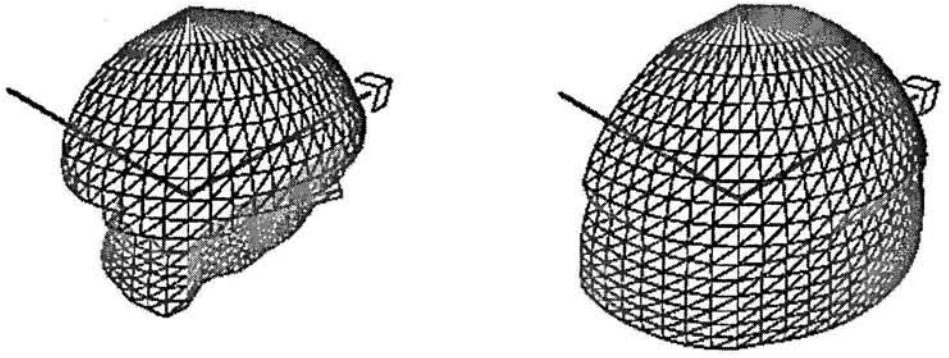
Na Fig. 29 as distribuições resultantes correspondem a escalas de 133% (lado esquerdo) e 600% (lado direito).

Da análise das Fig. 28 e Fig. 29 conclui-se que a escala escolhida tem um papel decisivo na definição da importância a emitir pela fonte associada ao objectivo de design. Se a escala é inferior a 100%, o papel da iluminação prévia é mais valorizado. Para escalas superiores a 100%, valoriza-se o papel da importância a emitir.



a) Escala 66% b) Escala 100%

Fig. 28 – Distribuições de importância a utilizar



a) Escala 133% b) Escala 600%

Fig. 29 – Distribuições de importância a utilizar

Um outro aspecto a considerar relaciona-se com a uniformidade das distribuições prévias de radiância sobre o espaço geométrico correspondente ao objectivo de iluminação. Caso estas distribuições sejam significativamente diferentes, na grandeza e/ou na forma, deverá subdividir-se a fonte de importância inicial em várias fontes de importância e definir, para cada uma, uma distribuição de importância adequada.

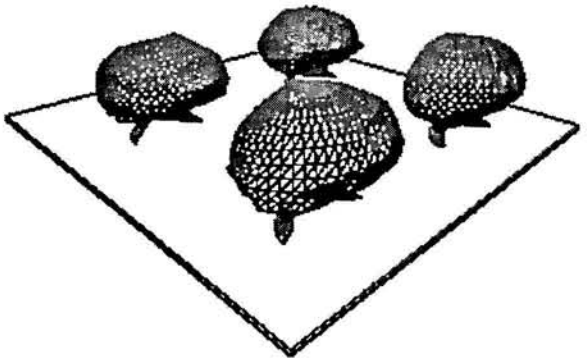


Fig. 30 – Fontes de importância a utilizar (fonte original subdividida em quatro)

A Fig. 30 apresenta um exemplo de subdivisão da fonte de importância, um objectivo radiométrico, em quatro novas fontes de importância, o mesmo objectivo radiométrico representado por essas quatro fontes de importância. Em função dos efeitos da iluminação prévia, da geometria da cena, etc, o processo de subdivisão de fontes de importância poderá ser mais ou menos complicado e necessitar do auxílio de métodos semi-automáticos de subdivisão[5].

[5] Este processo de subdivisão é semelhante, na sua essência, ao processo de subdivisão de uma área poligonal empregue pelos algoritmos de elementos finitos para simulação do transporte da luz (radiosidade, por exemplo).

4.5.3. Parâmetros do Design de Iluminação

Tipicamente, um problema geral de design de iluminação possui uma margem criativa muito grande. A liberdade de ensaiar hipóteses de solução é muito ampla e factores cognitivos, emotivos, etc, podem desempenhar um papel muito importante. Estas são algumas das razões porque uma abordagem analítica geral ao design de iluminação é considerada muito difícil ou até mesmo impossível. No entanto, em situações particulares é possível fornecer ao designer ferramentas de apoio, tendo a metodologia de design de iluminação baseada em objectivos essencialmente essa finalidade. Para conseguir tal propósito, o problema tem de ser "domesticado", ie, os graus de liberdade da exploração das soluções têm de ser passíveis de quantificação em parâmetros reais. Estes parâmetros são caracterizados pela sua gama de variação (característica intrínseca) e por relações mútuas de natureza quantitativa (características extrínsecas).

Caso seja possível identificar devidamente os graus de liberdade de um problema de design de iluminação, associar a cada grau de liberdade um parâmetro real e descrever as relações que os ligam, então poderá dizer-se que esse problema é "parametrizavel". Note-se, porém, que o facto de um problema ser parametrizavel não significa imediatamente que seja resolúvel. A resolução do problema paramétrico depende da capacidade de se produzirem soluções válidas a partir de valores discretos dos parâmetros e de ser possível estabelecer relações comparativas entre essas soluções, a fim de escolher as melhores.

4.5.3.1. Espaço de Configuração dos Parâmetros

A primeira dificuldade que surge num problema de design de iluminação ao qual se pretenda aplicar a metodologia baseada em objectivos é a identificação dos graus de liberdade do problema e consequente conversão em parâmetros.

Um grau de liberdade representa uma entidade do design que pode variar mais ou menos de modo independente em relação às outras entidades. O valor de cada entidade do design é inicialmente desconhecido, sendo a finalidade do processo de design a determinação dos valores "óptimos" dessas entidades, levando em conta o contexto do problema, as relação entre entidades, etc. De um ponto de vista computacional, os graus de liberdade são associados a parâmetros de design, cada um possuindo uma gama numérica de variação. Para além dos parâmetros propriamente ditos, poderão também existir relações mais ou menos complexas entre parâmetros.

Um problema com N graus de liberdade corresponde a um espaço N-dimensional em que os parâmetros são, no caso geral, números reais. Frequentemente, existirão parâmetros com domínio finito, o qual poderá ser ou não contínuo. Por exemplo, a determinação da posição e direcção de uma luminária do tipo foco corresponde a um problema de dimensão cinco: três parâmetros de posição no espaço e dois parâmetros de direcção. Frequentemente, a posição da luminária é restringida a um volume predefinido na cena e a direcção restringida a um ângulo sólido igualmente predefinido.

A existência de relações entre parâmetros, normalmente associadas a restrições de design, pode ser encarada como a definição de hiper-superfícies de dimensão menor ou igual a N no espaço N-dimensional de configuração dos parâmetros. Nestes casos, o domínio do problema é formado pela resultante da intersecção destas hiper-superfícies. Caso essa resultante seja nula, tal significa que as restrições do design são contraditórias entre si e não haverá solução satisfatória.

Em termos de geração de valores de parâmetros candidatos a soluções do problema, consideram-se os seguintes métodos alternativos:

- Analítico – Inicialmente arbitram-se os valores dos parâmetros que não estão sujeitos a relações e aqueles que funcionam como variáveis independentes nas relações. Finalmente determinam-se por via analítica os parâmetros dependentes usando as relações entre parâmetros. Este modo de geração de parâmetros pode ser difícil ou impossível de usar caso as relações sejam analiticamente complexas[6].
- Aceitação/Rejeição – Arbitram-se todos os valores dos parâmetros e, em seguida, analisam-se as relações entre parâmetros. Caso haja pelo menos uma relação violada, arbitram-se novos valores para os parâmetros inválidos e repete-se este processo até se obter um conjunto de parâmetros totalmente válido. Em certos casos, este modo de geração de parâmetros pode necessitar de muitas iterações até se obterem valores de parâmetros válidos, o que prejudica a sua aplicabilidade.
- Misto – Uma aplicação mista dos métodos anteriores.

Quando os parâmetros são reais e contínuos, o espaço de configuração é infinitamente denso e impossível de explorar totalmente. Estas características tornam a geração de parâmetros um aspecto crítico da metodologia em análise. Variações em pequena escala dos valores dos parâmetros podem ter uma influência muito grande na qualidade das soluções obtidas, tanto ou mais do que variações em grande escala. Nestes casos, a noção de escala de variação de um parâmetro real é também uma grandeza infinita e depende fortemente da sensibilidade do problema ao comportamento do parâmetro, a qual é frequentemente desconhecida.

4.5.3.2. Escolha do Espaço de Configuração

Em muitos problemas de design de iluminação, os graus de liberdade do design podem ser traduzidos em espaços de configuração alternativos, ie, diferentes conjuntos de parâmetros, mas igualmente capazes de descrever o contexto necessário à pesquisa de soluções. Por exemplo, a localização de uma luminária tipo foco numa cena pode ser descrita de vários modos, dos quais se salientam:

Descrição 1

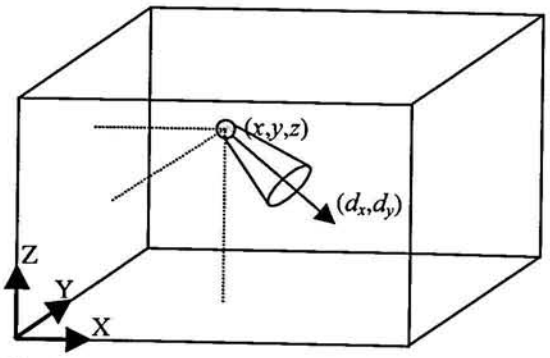


Fig. 31 – 5 parâmetros $(x,y,z,d_x,d_y;\ d_z^2=1-d_x^2-d_y^2)$

No conjunto da Fig. 31 utilizam-se 3 parâmetros de posição (x, y e z) e 2 parâmetros angulares (d_x e d_y, dois componentes do versor direcção). Este conjunto de parâmetros é apropriado para

[6] Seja "f" uma relação entre os parâmetros X_1 e X_2: $f(X_1,X_2)$. Caso não seja possível determinar as funções inversas $X_1=f_1^{-1}(X_2)$ ou $X_2=f_2^{-1}(X_1)$, então este processo não pode ser utilizado.

problemas em que a localização da luminária fique no interior de um volume paralelipipédico na cena. Neste caso, definem-se as gamas de variação adequadas em X, Y e Z para cada um desses parâmetros posicionais. A direcção da luminária define-se através de gamas de variação angular.

Descrição 2

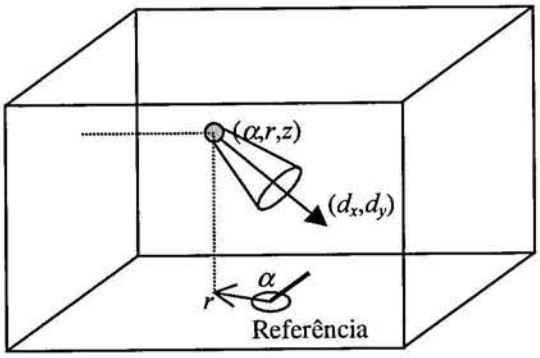


Fig. 32 – 5 parâmetros (α,r,z,d_x,d_y; d_z^2=1-d_x^2-d_y^2)

No conjunto da Fig. 32 utilizam-se 1 parâmetro angular no plano do chão (α), 1 parâmetro de distância em relação a um ponto de referência (r), 1 parâmetro de altura relativamente ao chão (z) e 2 parâmetros angulares. Este conjunto de parâmetros é útil, por exemplo, em problemas nos quais existam restrições direccionais ou de distância em relação a um ponto de referência.

Descrição 3

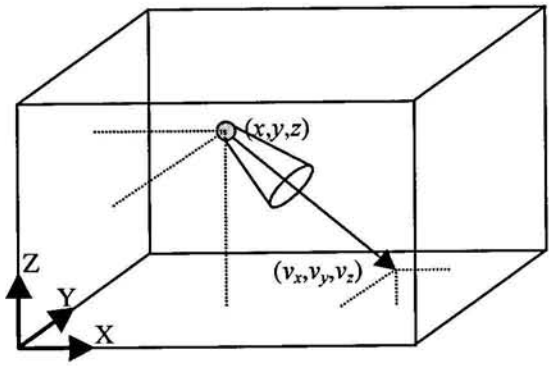


Fig. 33 – 6 parâmetros (x,y,z,v_x,v_y,v_z)

No conjunto da Fig. 33 utilizam-se 3 parâmetros de posição e mais 3 parâmetros de posição/direcção (extremidade do vector direcção). Este conjunto de parâmetros pode ser usado em problemas nos quais a direcção da luminária deva ser orientada para certas regiões da cena (um objecto a iluminar, por exemplo). Neste caso, o extremo do vector direcção será definido dentro do volume envolvente do objecto a iluminar.

Como se depreende das descrições alternativas mencionadas, o "mesmo" problema de design de iluminação, posicionar e apontar uma luminária do tipo foco, pode ser descrito por diferentes espaços de configuração de parâmetros, o que permite caracterizar apropriadamente um dado problema.

Estes exemplos simples mostram que a identificação dos graus de liberdade do design deve ser feita tendo em consideração todas as circunstâncias que rodeiam o problema de design. No

entanto, pode optar-se por conjuntos de parâmetros que não os mais óbvios. O preço eventual a pagar é ter-se uma pesquisa menos eficiente, o que se poderá traduzir num maior consumo de recursos computacionais, sobretudo de tempo de processamento.

4.5.3.3. Discretização do Espaço de Configuração

Em muitas situações do mundo real, os parâmetros do espaço de configuração podem ser discretizados, ie, podem ser associados a um subconjunto de números inteiros, deixando de existir uma densidade infinita entre dois quaisquer valores de parâmetros.

Exemplos de parâmetros que podem ser discretizados sem perda de generalidade são:

- Posições – Localizações de luminárias, etc, (a unidade poderá ser o centímetro).
- Direcções – Orientações de luminárias do tipo foco, etc, (a unidade poderá ser o grau).
- Distâncias – Espaçamentos, etc (a unidade poderá ser o decímetro).
- Quantidades – Número de luminárias, etc (números inteiros inferiores à centena).

A principal vantagem da discretização do espaço de configuração de parâmetros é transformar o problema de optimização numa versão combinatória, ie, o espaço de configuração passa a ser finito, embora demasiado extenso para explorações exaustivas, no caso geral. Uma consequência vantajosa que decorre da discretização é a possibilidade de aplicação de métodos de pesquisa de soluções para problemas de natureza combinatória.

Por exemplo, num espaço interior com 12m de comprimento, 7m de largura e 2.5m de altura, a especificação de uma luminária do tipo foco (posição e direcção), usando como unidades 5cm e 2°, pode passar por 27216 milhões de situações diferentes[7]. Caso se restrinja a localização a uma altura superior a 1.5m e a orientação seja do tipo *downlighting*, então o número de casos é aproximadamente 5443 milhões.

Como se pode facilmente concluir, os problemas de design de iluminação com discretização do espaço de configuração são muito susceptíveis de explosão combinatória. Realmente, a adição de uma luminária normalmente acarreta a introdução de novos parâmetros que vão aumentar consideravelmente a dimensão do espaço de configuração e dificultar a pesquisa de soluções. Esta sensibilidade à explosão combinatória obriga pois a uma definição adequada das condições iniciais do problema, sobretudo das gamas de variação e do nível de discretização dos parâmetros.

No contexto da metodologia baseada em objectivos, as soluções de um problema de design de iluminação são formadas pelos valores de parâmetros aos quais corresponde a satisfação máxima dos objectivos de design. Por outro lado, uma escolha grosseira dos níveis de discretização dos parâmetros pode produzir soluções óptimas "falsas", ie, soluções que, sendo óptimas na pesquisa desse espaço particular de configuração, não são as que se obtêm quando se adoptam níveis de discretização mais adequados. A solução óptima do problema de design com espaço de configuração contínuo (a verdadeira solução óptima) pode não ser encontrada quando se resolvem versões discretizadas do problema. Para reduzir as possibilidades deste evento indesejável, devem adoptar-se níveis de discretização tão finos quanto possível, mas de modo a solucionar o problema com recursos computacionais razoáveis. Em conclusão, a sensibilidade dos parâmetros ao contexto do problema é um dos aspectos mais problemáticos e difíceis de analisar.

[7] 1200/5×700/5×250/5×360/2×180/2.

4.5.4. Pesquisa de Soluções do Design de Iluminação

Assumindo-se a transformação das condições do design, objectivos, margem criativa, condicionantes, etc, num conjunto de parâmetros quantitativos bem especificados, gama de variação, tipo real/inteiro, relações entre parâmetros, etc, é necessário um processo de encontrar os conjuntos de valores de parâmetros que estão associados às melhores soluções de design. Note-se a referência a "melhores soluções" em vez de "solução óptima": se o problema original tiver sido devidamente transformado num problema de pesquisa paramétrica, é razoável supor que as melhores soluções estejam numa vizinhança relativamente pequena do espaço de configuração de parâmetros devido à coerência de soluções. Caso as melhores soluções se distribuam de forma desorganizada pelo espaço de configuração, isso poderá ser um indício que o problema foi incorrectamente transformado.

Em geral, o design de iluminação busca a satisfação de objectivos que englobam componentes técnicos, estéticos e de outras naturezas. Quando o problema de design de iluminação é susceptível de um tratamento quantitativo através da metodologia baseada em objectivos, é necessário quantificar a noção de solução, por forma a ser possível determinar as melhores. O processo mais simples de quantificar uma solução correspondente a um conjunto de valores de parâmetros é associá-la a um número. Este mapeamento de solução num escalar deve, no entanto, respeitar algumas propriedades fundamentais:

- Qualquer solução deverá ter um escalar associado.
- A mesma solução deverá ter sempre o mesmo escalar.
- Caso exista uma relação de ordem nas soluções, deverá existir uma relação de ordem entre os escalares respectivos:
  - — Solução$_A$ *melhor que* Solução$_B$ *melhor que* Solução$_C$ $\Rightarrow K_A>K_B>K_C$
    ou, pela ordem contrária,
  - — Solução$_A$ *melhor que* Solução$_B$ *melhor que* Solução$_C$ $\Rightarrow K_A<K_B<K_C$

As propriedades enunciadas garantem que todas as soluções de um problema de design de iluminação podem ser ordenadas. Os extremos dessa ordenação correspondem às "melhores/piores" soluções de design. No entanto, nada foi dito sobre o modo de encontrar uma função dos parâmetros de design que compute o referido escalar.

Seja $f(X)$ a designação genérica da função que recebe como dados de entrada um vector X, os valores dos parâmetros do espaço de configuração: X_1, X_2, X_3, etc, e que computa um escalar K, ie, $K=f(X)$. Caso o valor computado por $f(X)$ represente, de algum modo, a qualidade das soluções correspondentes, então o problema de determinação das melhores soluções do design de iluminação pode ser resolvido indirectamente através da pesquisa dos extremos de $f(X)$ no domínio de X. Qualquer função $f(X)$ que possa ser usada para controlar a pesquisa paramétrica de soluções é designada uma função custo e representa quantitativamente o custo da solução associada ao vector de parâmetros X. Tipicamente, pretende-se obter os valores de X que conduzem a um "custo mínimo", ie, que geram os mínimos de $f(X)$ dentro do domínio de X.

4.5.4.1. Funções Custo versus Soluções

Uma função custo permite medir e aferir a qualidade das soluções obtidas. A solução "óptima" corresponde ao mínimo global da função custo, no domínio de variação dos parâmetros do problema.

Seja N o número de dimensões do espaço de configuração de parâmetros X, associado a um problema de design de iluminação. O domínio de X é formado por uma hiper-superfície de dimensão menor ou igual a N. Se $f(X)$ for uma função custo adequada para o problema em causa, então $f(X)$ pode ser representada por uma hiper-superfície de dimensão $N+1$, sendo a

dimensão adicional devida à própria função custo. A resolução do problema consiste na determinação dos mínimos de $f(X)$ dentro do domínio de X. No caso geral, esta pesquisa de mínimos pode ser muito complexa.

Um processo de tornar o problema mais tratável foi descrito na secção 4.5.3.3 e emprega parâmetros discretos (inteiros) em vez de parâmetros reais. Neste caso, a hiper-superfície $f(X)$ transforma-se numa malha de pontos $N+1$-dimensionais (hiper-malha) e o problema adquire uma natureza combinatória, podendo ser explorado através de pesquisa exaustiva, pelo menos teoricamente.

Os dois exemplos seguintes mostram o efeito da discretização da função custo.

Exemplo 1

Seja X um espaço de configuração de parâmetros de dimensão 2. Os parâmetros X_1 e X_2 são reais e estão ligados através da relação $X_1^2 + X_2^2 \leq 4$, o que determina imediatamente os seus respectivos domínios, $X_1 \in [-2,2]$ e $X_2 \in [-2,2]$. Se a função custo $f(X_1,X_2)$ for definida por $Y = 2X_1^2 + X_2 + X_1X_2 + 2$, então $Y = f(X)$ é uma hiper-superfície de dimensão 3, conforme se mostra na Fig. 34, estando assinalados os extremos globais de $f(X)$ para o domínio de X especificado. Os mínimos "globais" de $f(X)$ são definidos aproximadamente por $X_1 \in [0.4,0.5]$ e $X_2 \in [-2,-1.9]$.

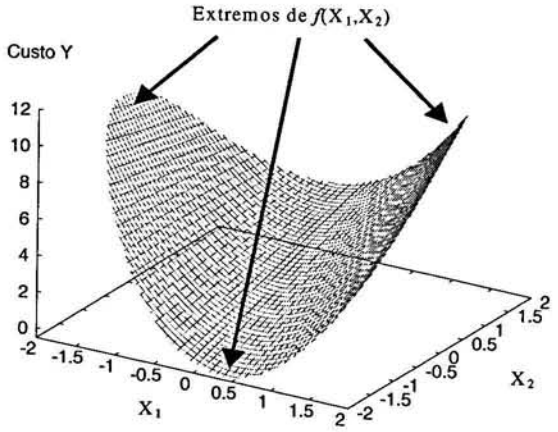


Fig. 34 – Função custo tridimensional

Caso os parâmetros X_1 e X_2 sejam discretizados em 20 valores no intervalo [-2,2], então o número de configurações de X é da ordem dos 250, ie, 400 menos o número de configurações que não respeita a relação entre X_1 e X_2. Na Fig. 35 mostra-se a hiper-malha de configurações correspondente.

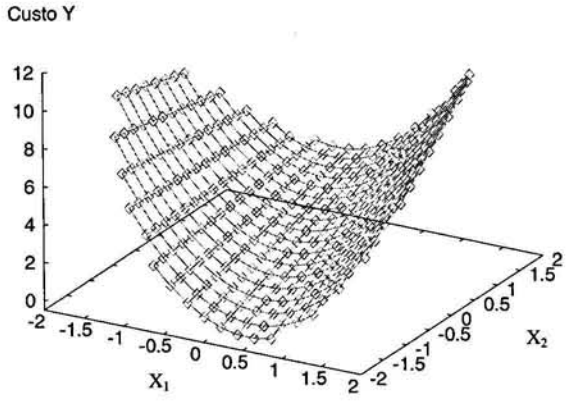


Fig. 35 – Função custo "discretizada"

Em problemas de baixa dimensão, a pesquisa exaustiva surge como primeira escolha. No entanto, a complexidade computacional da função custo pode influenciar fortemente o método de pesquisa de soluções.

No exemplo apresentado, a função custo é uma expressão analítica simples, pelo que uma pesquisa exaustiva rapidamente determina o mínimo global da hiper-malha tridimensional da Fig. 35.

Num problema de design de iluminação, a função custo relaciona-se de um modo complexo com o transporte de radiância (importância), pelo que a complexidade computacional da avaliação desta função poderá ser significativa, pois a quantidade de operações de cálculo em vírgula flutuante será muito elevada. Este aspecto de desempenho computacional torna-se ainda mais relevante quanto maior for o número de dimensões de um problema de design de iluminação, pois o número total de soluções discretas cresce muito rapidamente com o aumento do número de dimensões (secção 4.5.3.3).

Exemplo 2

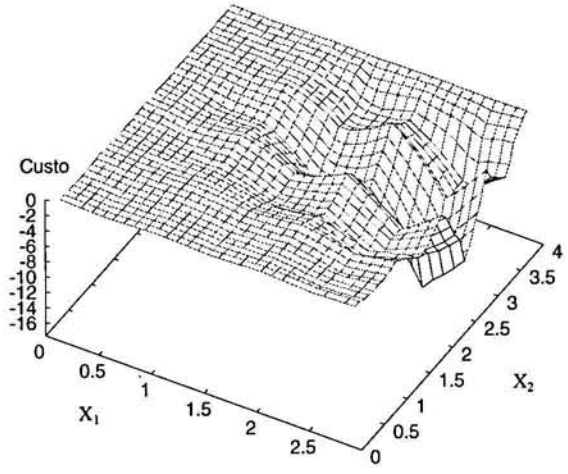


Fig. 36 – Função custo de problema de design de iluminação

A Fig. 36 mostra uma função custo discretizada de um problema simples de design de iluminação. Trata-se de uma cena constituída por uma sala com uma mesa perto do centro. O valor da função custo é inversamente proporcional à quantidade de importância recebida em dois pontos junto ao tecto, ligados por uma relação de distância, segundo um ângulo sólido predeterminado. Os pontos estão restringidos a uma localização em grelha e a fonte de importância é o tampo da mesa. Os parâmetros X_1 e X_2 representam a posição, em comprimento e largura, de um dos pontos numa parte da sala. Como se constata na figura, o custo mínimo não é numericamente fácil de determinar, dado que a função custo exibe um grau apreciável de variação local, perceptível pelas ondulações na superfície da função.

4.5.4.2. Características de Funções Custo

Como mecanismo de controlo da pesquisa de soluções, uma função custo deve quantificar a qualidade da solução em causa através de um número. Dado que uma avaliação da função custo é sempre comparada com outras avaliações da mesma função, o valor numérico absoluto não é em si importante, mas sim a sua relação de ordem com valores anteriormente calculados – isto torna a função custo indiferente a efeitos de adição de constantes e multiplicação por constantes positivas. Tipicamente, os problemas de pesquisa de extremos são formulados como problemas de mínimos. A determinação de máximos de uma função custo pode ser convertida na determinação de mínimos multiplicando a função por uma constante negativa.

Uma função custo possui uma interpretação associada ao design de iluminação, na medida em que é uma representação da qualidade das soluções correspondentes aos parâmetros especificados. Por outro lado, é um mecanismo de controlo da pesquisa dos extremos locais e globais de vários métodos de optimização global. Na vertente ligada ao design de iluminação, deve traduzir os objectivos do design pretendido, a abordar mais detalhadamente na secção seguinte. Na vertente de pesquisa global, uma função custo é uma hiper-superfície multi-dimensional. A situação é mais favorável quando a hiper-superfície é finita e discretizada (ie, uma hiper-malha finita). Pelo contrário, se a hiper-superfície for infinita e descontínua, a gama de escolha de métodos de pesquisa global é reduzida, dado que os métodos baseados em informação analítica da função (gradientes, etc) são excluídos. Além disso, uma hiper-superfície "simples" pode ser difícil de pesquisar caso o domínio dos parâmetros seja complexo ou caso existam variações complicadas de carácter local nas fronteiras da hiper-superfície, por exemplo.

Dado que uma função custo é usada como mecanismo de controlo em processos computacionais, as características de natureza computacional também são importantes: uma função custo que exija grandes recursos computacionais, por exemplo tempo de processamento, torna a pesquisa de soluções mais complicada.

4.5.4.3. Funções Custo Algorítmicas

Em muitos problemas de pesquisa global, a função custo é uma função analítica e determinística, por tratar-se de uma função descrita através de operações e funções matemáticas que produzem sempre o mesmo resultado para os mesmos valores de entrada. No entanto, a representação da função custo pode ser efectuada através de uma sequência de instruções algorítmicas designada por programa custo. A vantagem de uma representação algorítmica é a maior flexibilidade de representar condições de design, ie, uma melhor modelação dos objectivos de design.

Com um programa custo podem surgir situações em que o determinismo não exista, sem que isso ponha em causa o processo de pesquisa global. Efectivamente, quando a função custo é computacionalmente muito complexa e a abordagem determinística é ineficiente, é frequente

recorrer-se a técnicas estocásticas para calcular o valor custo. Em design de iluminação, são muito usadas técnicas estocásticas na computação do programa custo, dado que o transporte de radiância (ou de importância) emprega vulgarmente algoritmos baseados em métodos Monte Carlo (secção 2.1.5.1). Em consequência, a avaliação do programa custo com os mesmos valores de entrada nem sempre produz o mesmo resultado numérico, embora as diferenças sejam normalmente pouco significativas e não coloquem a causa a validade do processo de pesquisa. No entanto, este aspecto é importante e deve ser monitorizado, a fim de se poderem detectar eventuais diferenças significativas, cuja explicação poderá estar relacionada com uma especificação incorrecta dos dados de entrada. Outra característica do programa custo deriva da sua formulação algorítmica e dos dispositivos de programação utilizados e consiste na possibilidade de um programa custo entrar em ciclo infinito. Esta ocorrência deverá ser evitada, dado que invalida a pesquisa de soluções.

A execução de um programa custo formulado através de uma linguagem de programação necessita de um interpretador de instruções dessa linguagem, o qual realiza as funções normais de um interpretador, análise lexical e identificação de símbolos, agrupamento de símbolos em instruções da linguagem e execução das instruções. Para tal, a linguagem de custo deverá ser previamente definida através de uma gramática, a qual especifica a organização das frases da linguagem. O uso de técnicas de interpretação do tipo LALR(1)[8] [Aho86] [Levine92] é suficiente para descrever os programas custo de problemas reais de design de iluminação.

4.5.4.4. Optimização de Funções Custo Algorítmicas

No plano teórico não existe uma formulação única de uma função custo, mas uma infinidade equivalente de formulações. No entanto, os aspectos práticos fazem com que algumas formulações sejam preferíveis ou que certas técnicas computacionais sejam empregues na função custo por forma a melhorar o desempenho do processo de pesquisa, que se designa por optimização da função custo.

Sendo o programa custo um algoritmo que recebe como dados de entrada os parâmetros de pesquisa associados ao problema de design e que computa um número real que mede a qualidade da solução correspondente, podem ser empregues muitas das técnicas existentes de optimização algorítmica (arranjo de expressões, eliminação de instruções redundantes, etc). Estas técnicas de optimização da função custo são especialmente importantes em design de iluminação, pois podem evitar a redundância nos cálculos radiométricos, os quais tendem a ser computacionalmente pesados.

Além disso, estando dependente da satisfação de condições de design, é conveniente colocar as instruções de decisão associadas à verificação dessas condições no início do programa custo, por forma a terminar a sua execução tão cedo quanto possível, caso as condições não sejam respeitadas. Isto permite evitar cálculos radiométricos e acelera o processo de pesquisa.

4.5.4.5. Métodos de Pesquisa Aplicáveis

Muitos problemas de design de iluminação possuem uma ou mais das características seguintes, as quais tendem a tornar a determinação dos extremos da função custo mais complicada:

- Dimensionalidade elevada, ie, situações com mais de dez parâmetros são frequentes.
- Não existir uma formulação explícita do tipo $Y=f(X)$.
- Não haver continuidade (haver variações abruptas).
- Inexistência de derivadas ou dificuldade no seu cálculo.

[8] LALR(1) – *Look Ahead Left Recursive*; (1) – número de símbolos da linguagem lidos em avanço é 1.

- Não determinismo da função.
- Complexidade computacional elevada (gasto elevado de recursos, processamento, etc).

A existência destas características torna difícil a aplicação de métodos determinísticos de pesquisa de extremos baseados em informação intrínseca da própria função (gradientes, etc). Alguns dos métodos excluídos são o método de *Steepest Descent*, método de *Newton* e outros baseados em gradientes e derivadas analíticas ou obtidas por aproximação numérica [Conte80].

Para as situações complexas de design de iluminação, a pesquisa de extremos globais de funções custo deve ser encarada como um problema de optimização global. Sendo assim, os métodos baseados nas heurísticas descritas na secção 2.2 são a melhor alternativa para obter soluções "óptimas". Dos métodos descritos, são particularmente atraentes os que se baseiam no conceito de função custo para controlar o processo de optimização: métodos de *simulated annealing* e métodos de *tabu search.*

4.6. FUNÇÃO CUSTO NO DESIGN DE ILUMINAÇÃO

A função custo desempenha um papel fulcral na metodologia de design de iluminação baseada em objectivos e que recorre ao transporte de importância. O grau de exactidão da representação dos objectivos na função custo afecta decisivamente as soluções obtidas. Em design de iluminação, o uso de uma função custo algorítmica justifica-se frequentemente, dado que muitas situações de design possuem objectivos que só podem ser modelados desse modo. Por exemplo, quando existem restrições geométricas de localização, o uso do programa custo ajusta-se perfeitamente.

Como se referiu na secção 4.2, em design de iluminação os objectivos podem ser separados em duas grandes classes: os radiométricos, ligados à presença ou ausência de iluminação, e os não-radiométricos, todos os restantes.

4.6.1. Objectivos Radiométricos

Os objectivos radiométricos podem ser modelados através de fontes emissoras de importância, colocadas na cena pelo designer.

4.6.1.1. Fontes de Importância

O efeito das fontes emissoras de importância é medido, no programa custo, através de uma abstracção apropriada, a qual determina a importância recebida, em torno de um ponto, por exemplo.

Numa linguagem de programação da função custo com procedimentos, o efeito da emissão de uma fonte de importância pode ser obtido através da execução de uma função especializada com argumentos relacionados com os parâmetros do design e, para cada fonte emissora de importância, deverá ser invocada a respectiva função. Caso haja duas ou mais fontes de importância numa cena, os seus efeitos podem ser relacionados quantitativamente de acordo com os objectivos de design pretendidos. Por exemplo, se um objectivo é mais relevante do outros, o efeito da sua fonte emissora de importância poderá ser aumentado no cálculo da função custo, de modo a evidenciá-lo. A capacidade de relacionar os efeitos das fontes de importância deve ser totalmente controlável pelo designer.

4.6.2. Objectivos Não-Radiométricos

Os objectivos não-radiométricos devem ser processados no programa custo. Eles manifestam as suas influências na pesquisa de soluções através do modo como afectam a execução do programa custo.

4.6.2.1. Inclusão na Função Custo

A diversidade de objectivos não-radiométricos (secção 4.2.2) realça a necessidade de existência de um mecanismo flexível para poder contabilizar os efeitos desses objectivos. A sua inclusão na função custo, sob a forma de instruções algorítmicas, permite uma flexibilidade bastante elevada e pode dar ao designer um grande controlo.

Um programa custo pode ser adaptado para incorporar imensos tipos de objectivos, desde que estes sejam passíveis de uma descrição algorítmica. Por exemplo, objectivos ligados a restrições de ordem geométrica podem ser codificados através de testes simples embebidos em instruções de decisão. Caso as restrições sejam violadas, então a solução correspondente não é válida e o seu custo deve ser considerado "infinito"[9].

De um ponto de vista de desempenho, é desejável que o tratamento dos objectivos não-radiométricos seja feito antes dos objectivos radiométricos. Sendo os objectivos não-radiométricos tipicamente analisados através de testes em instruções de decisão, basta que pelo menos um teste seja violado para que o custo seja imediatamente conhecido. Deste modo, evitam-se simulações de transporte de importância, necessárias para processar os objectivos radiométricos.

4.6.2.2. Descrição da Função Custo

Uma função custo algorítmica pode assemelhar-se a um procedimento em linguagens de programação que recebe um conjunto de valores numéricos e que computa um valor escalar real como resultado. O conjunto de valores de entrada corresponde a valores dos parâmetros de design. A avaliação da função custo (programa custo) faz-se através da execução das instruções que constituem a função custo algorítmica, principiando-se pela instrução inicial, e até que surja uma instrução que provoque o fim da execução e a atribuição de um valor numérico final à função custo.

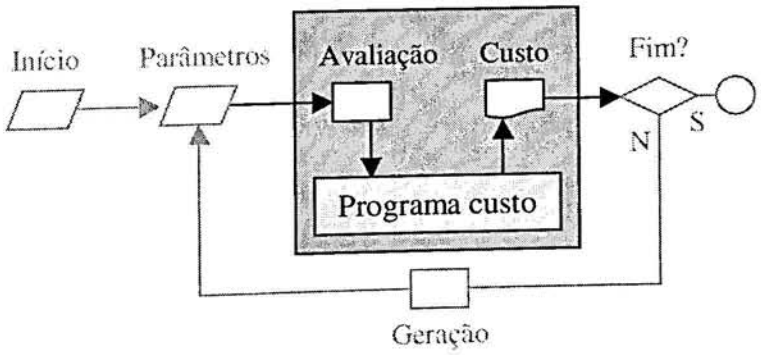


Fig. 37 – O papel da função custo

Na Fig. 37 mostra-se o papel do programa custo na metodologia de design de iluminação baseada na optimização global dos parâmetros do design. Esse papel é muito importante, dado

[9] Maior do que o valor da função custo de qualquer solução viável

ser totalmente controlável pelo utilizador e poder influenciar de forma determinante a natureza das soluções finais. O conceito de "optimalidade" das soluções está de algum modo ligado aos parâmetros de design definidos e ao conteúdo do programa custo.

4.6.3. Linguagem de Definição de Funções Custo

A definição de funções custo através de programas custo pode ser efectuada com diversos tipos de linguagens de programação, sendo o tipo mais adequado dependente de factores externos tais como plataforma de computação, sistema operativo, etc. De seguida sugerem-se algumas características consideradas úteis para uma utilização flexível de programas custo.

4.6.3.1. Descrição

Uma linguagem de descrição de programas custo deverá possuir pelo menos as seguintes características:

- Números inteiros e reais.
- Operadores de variável real.
- Expressões algébricas.
- Variáveis escalares e estruturadas.
- Instruções de atribuição.
- Instruções de decisão.
- Instruções de término.

Existem muitas linguagens de programação com as características enunciadas e capazes de representar o conceito de programa custo.

```
# (x1, x2, x3): posição
pointA = [(4, 3, 0)]
IF (distance[(x1, x2, 0), pointA] < 1.0) RETURN HUGE
pointB = [(3, 3, 1.7)]
wIL1 = importance(sceneIL1, x1, x2, x3, 0, 0, -1, 90)
RETURN -wIL1 × distance[(x1, x2, x3), pointB]
```

Fig. 38 – Exemplo de um programa custo

A Fig. 38 apresenta um exemplo de programa custo, descrito numa linguagem semelhante à linguagem de programação C. Os parâmetros de design são x_1, x_2 e x_3 e representam coordenadas espaciais de uma luminária, por exemplo. A 3ª linha representa um objectivo não-radiométrico: se a distância do ponto candidato (x_1,x_2,x_3) ao ponto predefinido A for inferior a 1, o objectivo é violado. Nesse caso, o programa custo termina imediatamente e o custo é considerado "infinito". Na 5ª linha determina-se o efeito da distribuição de importância em torno do ponto candidato (x_1,x_2,x_3), dependente das fontes de importância inicialmente definidas e o valor final da função custo será esse efeito de importância escalado pela distância a um ponto predefinido B, conforme se apresenta na 6ª linha.

4.6.3.2. Implementação

Como foi referido na secção 4.5.4.3, uma linguagem de descrição de programas custo pode ser convenientemente definida por forma a ser interpretada através de técnicas LALR(1) ou semelhantes, para as quais existem ferramentas computacionais adequadas e fáceis de usar, tais

como os programas *lex* e *yacc* [Levine92], *flex* e *bison*[10], etc. Estes programas permitem a definição de linguagens de programação através de gramáticas, que são os conjuntos de regras da linguagem, além de serem capazes de gerar código que realiza a análise lexical e a interpretação de programas escritos na linguagem. A principal desvantagem desta abordagem é a criação e depuração da gramática correspondente à linguagem que se pretende desenvolver.

Existem alternativas mais simples e que podem ser vantajosas. O uso de interpretadores preexistentes e que satisfaçam as características enunciadas anteriormente. Exemplos de ferramentas computacionais com capacidades de interpretação são:

- **awk** ou **gawk**[11] – Programas vocacionados para processamento de padrões de texto.
- **perl**[12] – Um programa de interpretação de programas (uso geral).
- **python**[13] – Outro programa de interpretação de programas (uso geral).
- *shells* UNIX.

Em situações de prototipagem rápida, a utilização de ferramentas deste tipo permite resolver problemas mais rapidamente, o que pode ser importante. As ferramentas referidas são capazes de representar os programas custo relacionados com casos reais de design de iluminação. A principal desvantagem é a interpretação do programa custo, mais lenta pelo facto desses programas não serem especializados. Em termos práticos, esta desvantagem poderá ser irrelevante, dado que as simulações de transporte de importância tendem a consumir tempos de processamento muito superiores.

4.7. SUMÁRIO

Neste capítulo estabeleceram-se as bases de uma nova metodologia de design de iluminação. Esta nova metodologia baseia-se na metodologia de design inverso, na qual os objectivos de design desempenham um papel primordial. Na sua aplicação ao design de iluminação, os objectivos de design de iluminação participam como dados adicionais de entrada e como mecanismo de escolha da melhor solução.

Também se mostrou que, caso um problema de design de iluminação possa ser descrito por parâmetros relacionados com os graus de liberdade do problema, ele pode ser transformado num problema multi-dimensional de pesquisa, passível de solução através de métodos de optimização global. Assim, a nova metodologia de design de iluminação emprega os objectivos do design e os parâmetros de exploração como entidades adicionais necessárias a uma resolução semi-automática de problemas de design de iluminação.

Mostrou-se também que a grandeza radiométrica importância pode ser usada pela nova metodologia como quantidade fundamental na pesquisa de soluções. Caso se tenham em conta as premissas previamente estabelecidas para o transporte da luz, resulta que podem ser empregues os algoritmos de transporte de radiância para realizar o transporte da importância, o que assim evita o desenvolvimento de novos algoritmos.

Finalmente, descreveu-se o papel da optimização na metodologia proposta e a relevância da função custo. Explicitou-se também o conceito de função custo algorítmica como método de flexibilizar a pesquisa e de incorporar objectivos de natureza não-radiométrica.

---

[10] Parte do projecto GNU da *Free Software Foundation*, www.fsf.org.
[11] Também parte do projecto GNU.
[12] Projecto **perl**, www.perl.org.
[13] Projecto **python**, www.python.org.

5. ALGORITMO PROPOSTO PARA DESIGN DE ILUMINAÇÃO

Neste capítulo descreve-se o algoritmo proposto para resolver problemas de design de iluminação, com base nas ideias apresentadas no capítulo anterior, e analisam-se os recursos computacionais envolvidos. O capítulo termina com a descrição de uma implementação protótipo, destinada a testar e avaliar o algoritmo proposto.

As considerações feitas nos capítulos anteriores servem de fundamento para a descrição de um algoritmo baseado na **metodologia de design de iluminação baseada em objectivos**, com recurso ao transporte de importância e optimização global (Fig. 15).

O algoritmo proposto neste capítulo resolve problemas de design de iluminação quando os objectivos são conhecidos, quantificáveis e passíveis de descrição algorítmica. A descrição do algoritmo sugere métodos e técnicas para resolver ou computar os vários subproblemas existentes, mas não refere *software* específico, ficando esta decisão de escolha a cargo do utilizador. Na secção 5.3 é descrita uma implementação do algoritmo proposto que funciona em plataformas PC com sistema operativo UNIX e que usa *software* específico de simulação do transporte da luz e de optimização global.

5.1. ALGORITMO PROPOSTO

O algoritmo descrito neste capítulo decorre da metodologia apresentada, no capítulo anterior, para abordar problemas de design de iluminação em que os objectivos podem ser quantificados, o que, conjuntamente com a identificação e definição dos graus de liberdade apropriados, permite obter um problema de optimização global intimamente relacionado com o problema original de design de iluminação. Os cálculos da função custo do problema de optimização são baseados na importância, grandeza que parece ser muito adequada às abordagens inversas. No caso de se respeitarem algumas premissas suplementares da óptica geométrica (secção 2.1.3.3), podem usar-se os algoritmos de transporte de radiância aplicados à importância, sem que isso acarrete algum tipo de erro adicional e evitando-se o desenvolvimento de algoritmos específicos para o transporte da importância.

Neste contexto, a Fig. 39 descreve o algoritmo proposto, o qual é executado em quatro fases principais.

Fase 1 – Preparação de Dados

Nesta fase definem-se todos os dados de entrada necessários. Estes são compostos pela geometria da cena, pelos materiais de superfície, pelos objectivos de design que são representados por emissores de importância, pelos objectivos de design que são incorporados na função custo, pelos parâmetros de optimização, através dos seus valores iniciais e gamas de variação, e pelos critérios de paragem da pesquisa de soluções. Caso existam luminárias prévias,

é necessário calcular o seu efeito nos emissores de importância, conforme se descreve na secção 4.5.2.1, por forma a incluir os efeitos de iluminação prévia nos dados de entrada.

Fase 2 – Ciclo de Pesquisa

Esta fase corresponde ao ciclo de pesquisa de soluções através da optimização global dos parâmetros, de acordo com o que foi definido na fase anterior. O utilizador pode, em qualquer iteração, antever as melhores soluções encontradas e decidir pela interrupção da pesquisa. Esta fase termina normalmente quando os critérios de paragem são verificados.

Fase 3 – Exploração de Resultados

Depois da pesquisa terminada, os valores dos parâmetros correspondentes às melhores soluções encontradas podem ser usados na produção de dados quantitativos para eventual confirmação dos resultados, exploração de novas ideias, etc.

Fase 4 – Decisão Final

Nesta fase toma-se a decisão final de aceitação ou recusa da solução do problema de design de iluminação. Em caso de recusa, o processo deverá ser recomeçado na fase inicial e incluir alguma modificação do contexto do problema, por exemplo, através da alteração de objectivos, do ajuste dos dados da cena.

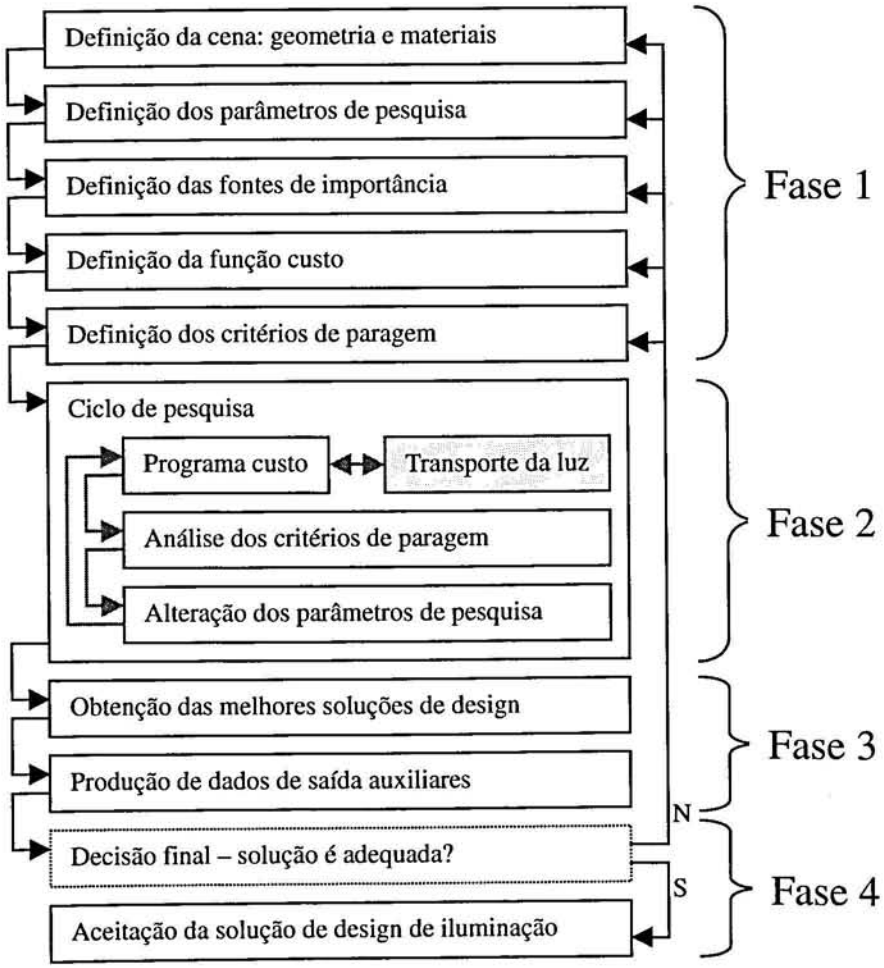


Fig. 39 – Algoritmo proposto

5.1.1. Descrição Geral do Algoritmo

Apesar do algoritmo proposto ter sido dividido em quatro fases, as duas fases iniciais são as mais críticas para a obtenção dos melhores resultados, em termos de satisfação dos objectivos de design de iluminação. Os resultados da pesquisa de soluções são produzidos no fim da segunda fase, conhecendo-se desde logo a sua repercussão no problema original de design de iluminação.

Apesar de parecerem fases menos relevantes, as duas fases finais dependem essencialmente do designer, o qual é o único responsável pela produção de dados que confirmem ou desmintam a solução obtida, pelo que essa falta de relevância é apenas aparente.

5.1.1.1. Preparação de Dados

A fase inicial corresponde à preparação do contexto do problema e é a mais complicada para o designer, dado que envolve a quantificação de objectivos e noções que frequentemente são qualitativos e até subjectivos. Seria desejável dispor de ferramentas computacionais de auxílio à conversão dos objectivos do design em objectivos radiométricos e não-radiométricos, assim como de auxílio na definição e validação da função custo.

Embora a Fig. 39 pareça apresentar um algoritmo em que os aspectos de interacção e usabilidade são ignorados, essa descrição não limita nem favorece qualquer tipo de implementação. Pela sua relevância, a preparação de dados deverá ser a fase mais sofisticada, em termos de interface, interacção e usabilidade. Esta preocupação tem as seguintes causas:

- Os designers geralmente desconhecem a teoria subjacente ao transporte da luz, os seus modelos e as suas representações. Nessa medida, é conveniente isolá-los desses contextos teóricos complexos e providenciar uma camada funcional com uma abstracção tal que lhes permita especificar adequadamente os seus objectivos, mas garantindo-se permanentemente a consistência entre os dados.
- O componente visual da preparação de dados é muito elevado, pelo que se justifica um ambiente com uma interface gráfica que permita a visualização directa da cena e a manipulação dos conceitos envolvidos na preparação de dados: objectivos radiométricos (fontes de importância), objectivos não-radiométricos (restrições, por exemplo), características de objectos e materiais de superfície, etc. As capacidades de interacção para manipulação dos objectivos, localização na cena e definição de características deverão ser significativas. As funcionalidades previstas sugerem a utilização de uma ferramenta do tipo editor de cena, capaz de visualizar a cena em diferentes tomadas de vista e de interactuar com os objectos.

A preocupação com os utilizadores e a necessidade de adaptar a interface e a interacção às suas características é um tema actual e pode ser encontrado noutras ferramentas computacionais de simulação do transporte da luz (*DESKTOP RADIANCE*[1]), que originalmente descuravam esses aspectos, mas que actualmente os levam em grande consideração. A tendência moderna é a transformação dessas ferramentas, originalmente difíceis de aprender e utilizar, em ferramentas com um elevado nível de abstracção e centradas no domínio de conhecimento do utilizador, escondendo ao máximo os detalhes matemáticos e computacionais. Um processo usado para

[1] *DESKTOP RADIANCE* é uma ferramenta computacional fotometricamente realista para design de iluminação que usa uma abordagem directa (Fig. 12), mas com um grande ênfase nos aspectos intuitivos, gráficos, de modelação e interacção. Utiliza uma aplicação comercial de modelação geométrica como editor de cena e baseia-se no pacote de simulação de transporte de luz *RADIANCE* (disponível em plataformas Windows) – *Pacific Gas and Electric Company*, www.pge.com/daylight.

efectuar essa transformação é dotar as ferramentas com interfaces gráficas intuitivas e com elevada usabilidade.

Um aspecto fulcral desta fase é a detecção de conflitos ou incoerências nos dados de entrada. Quando existem luminárias prévias, a possibilidade de ocorrência de situações contraditórias é maior, dado que a distribuição inicial de radiância na cena não pode ser ignorada e os seus efeitos podem colidir com os objectivos pretendidos.

5.1.1.2. Ciclo de Pesquisa

A fase de ciclo de pesquisa de soluções é baseada numa heurística de optimização global dos parâmetros dos design. A escolha de uma heurística é independente do algoritmo proposto, sendo possível a opção por qualquer uma das heurísticas de optimização referidas na secção 2.4.2. No entanto, o modo de controlo da pesquisa de soluções pode favorecer algumas heurísticas em detrimento de outras. Por exemplo, caso seja possível definir uma função custo, conforme o descrito na secção 4.5.4, então heurísticas do tipo *simulated annealing* ou *tabu search* são directamente aplicáveis. Na secção 3.1, a propósito de metodologias de design, apresentou-se na Fig. 16 uma metodologia baseada em objectivos, designada evolucionária, que parece ser a mais prometedora de todas as referidas. Para algoritmos decorrentes dessa metodologia serão directamente aplicáveis as heurísticas do tipo evolucionário.

Uma iteração do ciclo de pesquisa é composta por vários passos:

- Cálculo do valor da função custo – Calcula-se o valor da função custo correspondente aos valores dos parâmetros na iteração em curso, para o que se torna necessário realizar simulações do transporte da luz (radiância ou importância). A complexidade computacional intrínseca ao transporte da luz faz com que o valor da função custo seja computacionalmente difícil de calcular, o que acarreta normalmente ciclos de pesquisa com tempos de processamento prolongados. Existem formas de melhorar o desempenho do algoritmo proposto:
  - — Uso de heurísticas que minimizem o número de cálculos da função custo, por exemplo, os métodos estatísticos referidos na secção 2.4.2.6.
  - — Uso de técnicas de aceleração de cálculo em transporte da luz. Para além das técnicas de aceleração intrínsecas aos algoritmos de simulação do transporte da luz, entre a avaliação da função custo e o algoritmo de simulação do transporte da luz poderão ser incluídas outras técnicas capazes de acelerar o desempenho.
- Análise dos critérios de paragem – No caso dos critérios de paragem serem verificados, o ciclo de pesquisa de soluções termina, sendo o conjunto das melhores soluções encontradas considerado o resultado final da pesquisa. Note-se, porém, que a noção de "melhor" solução não é necessariamente igual a solução "óptima". Dado que os métodos heurísticos são, na melhor das hipóteses, estatisticamente convergentes, a definição do número máximo de iterações do ciclo de pesquisa deve ser feita por excesso, a fim de se poder ter alguma confiança nos resultados obtidos [Ingber93]. Uma forma de aumentar essa confiança é realizar vários ciclos completos de pesquisa, analisar os melhores resultados obtidos em cada ciclo e tomar como resultado final os melhores resultados parcelares. Caso haja grandes variações nos resultados entre ciclos, isso pode ser um sintoma de insuficiência de iterações por ciclo ou mesmo de problema inconvenientemente formulado.
- Alteração dos parâmetros – Dado que a pesquisa exaustiva está geralmente posta de lado, coloca-se a questão de como alterar os parâmetros a fim de se obter um novo conjunto de parâmetros para uso na iteração seguinte. Os modos como as diversas heurísticas de optimização tratam esta questão tem diferenças significativas. O

objectivo é obter um conjunto de valores de parâmetros previamente desconhecido. Os processos de obtenção de novos parâmetros são variados, podendo alterar-se desde apenas um parâmetro até ao caso em que todos são modificados. Podem empregar-se técnicas de geração aleatória baseadas em distribuições de vários tipos, técnicas baseadas no conceito de vizinhança (recorde-se que um conjunto de valores de parâmetros corresponde a um ponto num espaço N-dimensional) ou técnicas mais complexas e específicas de cada tipo de heurística de optimização.

Em problemas complexos e em que os domínios dos parâmetros são complicados, muitas vezes é impossível obter um novo conjunto de valores de parâmetros que se saiba *a priori* ser válido. Nesses casos, a validação é efectuada pela própria função custo, através de objectivos não-radiométricos adequados, o que em situações extremas pode originar ciclos de pesquisa com elevadas taxas de recusa de novos parâmetros, prejudicando gravemente o desempenho do algoritmo. Uma solução sempre possível para este tipo de problemas é o recurso à pesquisa exaustiva.

5.1.1.3. Exploração de Resultados

Nesta fase utilizam-se os resultados da pesquisa para produzir dados de diversos tipos (imagens convencionais, imagens com curvas de nível, etc), os quais podem servir para uma nova análise do problema. A análise poderá servir para confirmar os objectivos inicialmente pretendidos ou evidenciar aspectos não considerados, o que acarreta uma nova especificação do problema de design e o regresso à fase inicial.

Os processos de produção de dados auxiliares para exploração de resultados são variados, pelo que a sua incorporação no algoritmo proposto é opcional. Além disso, dependem fortemente do algoritmo de simulação do transporte da luz escolhido para produção de dados radiométricos.

5.1.1.4. Decisão Final

Na fase terminal do algoritmo proposto toma-se a decisão final de aceitação ou recusa da solução de design de iluminação encontrada. Esta fase aparentemente simples é importante, dado que a decisão incorpora um grau de subjectividade que nem sempre é possível integrar devidamente no contexto do problema. É possível que o designer, ao especificar quantitativamente o problema "real", o faça de tal modo que origine um problema "aproximado" que possui soluções que não aquelas que intuitivamente esperava.

Durante as fases precedentes, o designer pode constatar que a formulação do problema ou as soluções parcelares não são satisfatórias e recomeçar o processo de design. Em contextos de design, esta fase final parece ser inevitável. O julgamento final da solução obtida, para além dos objectivos quantitativos satisfeitos, levará em conta aspectos qualitativos que as ferramentas computacionais têm muita dificuldade em representar e simular.

A importância de uma decisão final tão "crítica" pode ser diminuída se a fase inicial de preparação do contexto do problema for cuidadosa, ie, caso os aspectos qualitativos sejam devidamente incorporados no referido contexto.

5.1.2. Dados de Entrada

Os dados de entrada do algoritmo proposto são de natureza diversificada. Apresenta-se de seguida uma descrição detalhada dos tipos de dados de entrada.

- Geometria da cena – Por geometria da cena entende-se a descrição geométrica dos objectos presentes na cena, em termos de primitivas geométricas elementares: vértices,

arestas e faces de objectos com uma representação de fronteira poligonal e valores de parâmetros analíticos para outras representações, por exemplo, esferas, elipsóides, cones, etc. A descrição geométrica da cena é fundamental na simulação do transporte da luz, tanto a nível da propagação como a nível do espalhamento. Como tal, a precisão dessa descrição é um aspecto a ter em conta, ou seja, uma precisão elevada exige que os objectos "relevantes" sejam "adequadamente" descritos:

— A relevância de um objecto relaciona-se com o seu tamanho[2] relativamente à cena, o que justifica que os objectos pequenos, com tamanho inferior a uma certa fracção do tamanho da cena, possam ser ignorados em design de iluminação, mas não noutras aplicações tais como síntese realista de imagem. No entanto, algumas características de um objecto pequeno podem fazer com que não seja desprezável: as propriedades do material de superfície (por exemplo, um material do tipo espelho), a localização na cena (por exemplo, um objecto muito perto da zona emissiva de uma luminária ou muitos objectos pequenos próximos entre si), etc. No caso geral, sugere-se a inclusão de todos os objectos na descrição da cena.

— A adequação da descrição de um objecto relaciona-se com o modo como é representado. Por exemplo, uma esfera, que tem uma descrição analítica simples, pode ser descrita por um conjunto de polígonos em que o número e a forma dos polígonos pode variar. Porém, a representação de uma esfera através de uma malha de polígonos é uma representação aproximada da verdadeira superfície de fronteira da esfera, o que pode originar erros no transporte da importância devido às deficiências das representações explícitas (secção 2.1.5.1).

- Materiais de superfície dos objectos – Os materiais de superfície são o revestimento exterior dos objectos da cena e são responsáveis pelo fenómeno de espalhamento da importância. Em termos de algoritmos de simulação do transporte da luz, o espalhamento é modelado pelo BSDF (secção 2.1.3.2), uma função que descreve o modo como a radiação se espalha (reflexão e/ou transmissão) quando uma quantidade elementar de radiação atinge a superfície. Dado que o design de iluminação inclui frequentemente objectivos relacionados com aspectos direccionais da distribuição da luz (ofuscamentos, ênfases, etc), a precisão da descrição do BSDF é um aspecto a ter em conta. Realmente, uma descrição imprecisa ou incorrecta dos BSDF's pode originar soluções de design erróneas. Por exemplo, a substituição de BSDF's complexos por outros BSDF's mais simples, uma das premissas de muitos algoritmos de simulação do transporte da luz baseados em métodos finitos, não pode ser admitida, caso se pretendam obter resultados com elevado grau de fiabilidade.
- Parâmetros de pesquisa – São a tradução quantitativa dos graus de liberdade do design, devendo ser definidos tendo em atenção as características do problema. Em geral, a variação do número de parâmetros de pesquisa origina grandes variações dos recursos computacionais necessários para determinar os valores "óptimos" desses parâmetros, pelo que parece ser desejável usar o menor número possível de parâmetros. No entanto, qualquer problema pode ser formulado de diversas formas, sendo admissíveis outras descrições através de diferentes espaços de configuração de parâmetros (secção 4.5.3.2). Os parâmetros de pesquisa são definidos pelo seu intervalo de variação e o pelo seu valor inicial.
- Objectivos de design de iluminação – Os objectivos são divididos em duas classes:
  — As fontes de importância modelam os objectivos de carácter radio ou fotométrico, directamente relacionados com a presença ou ausência de iluminação. São a

[2] O tamanho pode ser medido de vários modos: volume interior do objecto, superfície total exterior, etc.

tradução quantitativa de objectivos do tipo "iluminar esta área" ou "esta área deve receber pouca luz vinda daquela direcção", por exemplo. Caso se utilize um algoritmo de simulação do transporte da luz baseado num operador de transporte comum para a radiância e importância (enquadramento de Veach referido na secção 2.1.4), então as fontes de importância são representadas da mesma forma que as fontes de radiância convencionais[3].

— A função custo é usada para quantificar os objectivos não-radiométricos e medir a qualidade relativa de cada solução obtida. O uso de um programa custo para calcular o valor da referida função permite uma enorme flexibilidade no tratamento do problema, mas é também mais um dado de entrada a definir. Os aspectos sintácticos e gramaticais do programa dependem da linguagem escolhida para a sua definição. O aspecto semântico, ie, o significado do valor calculado, é o mais difícil de manipular, porque a flexibilidade de criação de representações alternativas do programa custo permite muitas formas incorrectas de representar a função custo "idealizada". Uma função custo mal definida produz soluções "óptimas" de um problema de design que não aquele que o designer deseja solucionar.

- Critérios de paragem – Os critérios de paragem do ciclo de pesquisa englobam os critérios de paragem do método de optimização global usado (número máximo de iterações, número mínimo de soluções, etc). No entanto, no algoritmo proposto, sugere-se a monitorização permanente das melhores soluções obtidas, por forma a permitir ao designer receber *feedback* do processo e controlar a sua evolução. A monitorização permanente poderá funcionar como um critério de paragem importantíssimo, dado que ajuda a detectar rapidamente contextos incorrectamente formulados, no âmbito da escolha de parâmetros, da definição de objectivos, da especificação do programa custo, etc.

Em problemas baseados em dados de entrada complexos e que usam modelos complicados com preocupações de validade física, a regra a seguir é "simplificar ao mínimo", pois a sensibilidade das soluções em relação aos componentes dos dados de entrada é desconhecida e qualquer alteração, mesmo que aparentemente mais inofensiva, poderá gerar modificações radicais nos resultados finais.

5.1.3. Dados de Saída

Os dados de saída directos do algoritmo proposto são os parâmetros "optimizados" representativos das soluções do problema de design. No entanto, as soluções de design de iluminação têm um impacto subjectivo na percepção visual da cena, pelo que se justifica a produção auxiliar de dados radiométricos e/ou fotométricos do tipo:

- Imagens foto realistas – São um meio muito usado para transmitir as soluções de design a observadores incapazes de compreender os aspectos técnicos da iluminação.
- Dados quantitativos sob forma gráfica – Incluem curvas de nível de grandezas relacionadas com a iluminação, imagens com tomadas de vista especiais (grandes angulares, etc), entre outras possibilidades.
- Dados quantitativos – Tabelas de grandezas de iluminação, índices qualitativos de diverso tipo (conforto visual, ofuscamento, contraste, etc) e outros.

[3] Os pormenores da representação das fontes de importância dependem do algoritmo escolhido.

Estes dados de saída são calculados por processos de simulação do transporte da luz em sentido directo que utilizam as soluções de iluminação obtidas, em contraponto com os processos de simulação em sentido inverso usados na pesquisa dessas soluções[4]. Esta produção auxiliar de dados de saída poderá permitir uma melhor compreensão do problema solucionado, dado que as complexas inter-relações da iluminação com a geometria não são facilmente traduzíveis em conjuntos reduzidos de números.

5.2. RECURSOS COMPUTACIONAIS

A implementação do algoritmo proposto deverá respeitar requisitos fundamentais que foram abordados ao longo dos capítulos anteriores. Um dos requisitos obrigatórios é a validade física da simulação do transporte de radiância, sem a qual os cálculos radiométricos não podem servir de justificação para a escolha de soluções de iluminação. Este requisito exige que o modelo da luz adoptado seja capaz de representar os fenómenos ópticos presentes em ambientes do mundo real (suporte teórico) e que o algoritmo de simulação do transporte da luz correspondente realize os cálculos radiométricos com garantias mínimas de precisão e exactidão (suporte prático). É também desejável que o suporte prático deste algoritmo satisfaça o enquadramento dos operadores de transporte proposto por Veach (secção 2.1.4), embora tal possa ser ignorado, sem se afectar a validade radiométrica, em problemas de design de iluminação em que não existam materiais de superfície com características de transmissão da luz. Como foi referido anteriormente, a satisfação desse enquadramento teórico permite utilizar o mesmo algoritmo de transporte na simulação do comportamento da radiância e da importância, assim como a abordagem de todos os tipos de problemas de design de iluminação.

Outro requisito obrigatório relaciona-se com a dificuldade da pesquisa e identificação das melhores soluções de design de iluminação (secção 4.5.4). Sendo o universo de soluções geralmente demasiado vasto para testar individualmente todas as soluções, é fundamental usar-se um mecanismo que explore razoavelmente esse universo e dê garantias de encontrar as soluções quasi-óptimas, desejavelmente as óptimas. No entanto, a flexibilidade incorporada no algoritmo proposto (secção 5.1.2) tornou mais complexa a avaliação da qualidade das soluções de design e, em consequência disso, exige-se um método de pesquisa de soluções mais robusto. Como se mostrou na secção 4.5.4, as funções custo de problemas de design de iluminação tendem a ser complicadas (hiper-superfícies com domínios complexos, existência de muitos extremos locais, etc), pelo que métodos analíticos ou que usem informação extra da função custo não são geralmente aplicáveis.

5.2.1. Dados de Entrada

Os recursos computacionais necessários para suportar devidamente os dados de entrada afectam o algoritmo de simulação do transporte da luz. A modelação dos objectivos radiométricos necessita de fontes emissoras de importância com as seguintes características:

- Geometria pontual ou de área – Na maior parte dos casos, os objectivos estão relacionados com superfícies de objectos importantes da cena (mesas, secretárias, etc) ou superfícies virtuais (planos de trabalho, planos de visão, etc).
- Distribuições arbitrárias – São necessárias para modelar todos os tipos de efeitos emissivos, sobretudo quando a cena inclui iluminação prévia (secção 4.5.2.1).

[4] "Sentido directo" relaciona-se com radiância e "sentido inverso" com importância.

Em relação aos objectivos não-radiométricos, o cálculo da função custo recorre à determinação da distribuição de radiância e/ou importância (em torno de pontos, ao longo de segmentos, em zonas poligonais, etc). Por essa razão, o algoritmo de simulação do transporte da luz escolhido deve suportar o cálculo da radiância e/ou importância em qualquer ponto arbitrário da cena, segundo qualquer direcção. Em relação à geometria dos objectos da cena e dos seus materiais de superfície, o algoritmo escolhido deve suportar os tipos de descrição geométrica referidos na secção 5.1.2, com preferência pelas descrições analíticas em relação às descrições explícitas baseadas em malhas poligonais.

5.2.2. Dados de Saída

A produção de dados de saída auxiliares pode ser efectuada pelo algoritmo de simulação do transporte da luz utilizado na fase de pesquisa de soluções, embora outros possam ser empregues. Um aspecto relevante na produção de imagens de síntese destinadas a ser vistas como fotografias é a calibração do dispositivo de visualização e a simulação das características perceptuais da visão humana. Actualmente, alguns algoritmos de simulação do transporte da luz possuem mecanismos capazes de gerar imagens perceptualmente "semelhantes" ao que o ser humano vê [Larson97].

5.2.3. Análise de Complexidade

A complexidade do algoritmo proposto deriva fundamentalmente dos dois processos computacionais que o constituem, a heurística de pesquisa de soluções e o algoritmo de simulação do transporte da luz. Apesar da designação "algoritmo", a simulação do transporte da luz é efectuada através de técnicas que incluem comportamentos determinísticos e estocásticos, para os quais não é geralmente possível obter estimativas de erro nem garantir a solução final.

A explosão combinatória que resulta de parametrizar de modo discreto o problema de design gera uma complexidade exponencial, à qual se junta a complexidade exponencial própria da simulação do transporte da luz:

- A incidência de um raio luminoso num ponto da superfície de um objecto tende a produzir muitos raios espalhados, em função das características do material de superfície.
- A propagação de um raio luminoso pode ser afectada por qualquer objecto da cena.
- A determinação do percurso óptico entre dois pontos da cena complica-se fortemente à medida que o número requerido de operações de propagação e espalhamento aumenta.

5.2.3.1. Complexidade Espacial

A complexidade espacial depende essencialmente da complexidade espacial do algoritmo de simulação do transporte da luz adoptado. Cada objectivo radiométrico, representado por uma ou mais fontes emissoras de importância, possui uma descrição geométrica própria. Existirão tantas representações geométricas cena/objectivo radiométrico quantos os objectivos radiométricos definidos, sendo cada representação constituída pela geometria da cena e pela geometria associada ao objectivo. Esta multiplicidade de representações geométricas cena/objectivo é necessária, dado que cada objectivo radiométrico produz uma distribuição particular de importância na cena e os efeitos dos diversos objectivos têm de ser calculados independentemente[5]. Para além destas representações geométricas múltiplas, alguns algoritmos

[5] Serão depois relacionados entre si na função custo.

de simulação do transporte da luz possuem técnicas de aceleração de cálculo que recorrem ao armazenamento de dados radiométricos para posterior reutilização (*caching* de dados), o qual terá de ser feito para cada conjunto cena/objectivo.

Este crescimento do espaço de dados utilizado pelo algoritmo proposto, em função do número de objectivos radiométricos, é atenuado quando alguns destes objectivos podem ser descritos por apenas uma representação cena/objectivos, embora no caso geral tal não tenda a acontecer.

Sendo N_{Cena} o número de objectos da cena e N_{ObjRad} o número de objectivos radiométricos, a complexidade espacial do algoritmo proposto é

Eq. 43 $$C_{espacial} \propto O(N_{Cena} \times N_{ObjRad})$$

5.2.3.2. Complexidade Temporal

A complexidade temporal do algoritmo proposto depende das complexidades temporais do algoritmo de simulação do transporte da luz adoptado e do método heurístico de pesquisa de soluções. Cada objectivo radiométrico será analisado através de simulações próprias de transporte da importância, baseadas na representação geométrica da cena e desse objectivo.

A simulação do transporte da luz é, em si, um processo computacional com uma complexidade temporal de natureza exponencial, dependente do número de objectos da cena, do número máximo de raios a espalhar por interacção radiante e do número máximo de propagações de raios descendentes. No algoritmo proposto, a complexidade temporal associada à pesquisa de soluções depende ainda do número máximo de iterações a efectuar, da execução do programa custo e do método de geração de valores de parâmetros, tipicamente por processos de aceitação/recusa (secção 4.5.3.1).

Sendo $N_{MaxIter}$ o número máximo de iterações de pesquisa a efectuar, N_{ObjRad} o número de objectivos radiométricos, $N_{ObjNRad}$ o número de objectivos não-radiométricos, N_{Cena} o número de objectos da cena, $N_{RaiosEsp}$ o número máximo de raios a espalhar por interacção radiante e $N_{RaiosDesc}$ o número máximo de descendentes de um raio, a complexidade temporal do algoritmo proposto é

Eq. 44 $$C_{temporal} \propto O(N_{MaxIter} \times N_{ObjRad} \times f(N_{ObjNRad}) \times O(N_{Cena}, N_{RaiosEsp}, N_{RaiosDesc}))$$

Na equação anterior, $f(N_{ObjNRad})$ representa a complexidade temporal da função custo, sendo a complexidade temporal do transporte da luz representada por $O(N_{Cena}, N_{RaiosEsp}, N_{RaiosDesc})$. Da equação apresentada pode concluir-se que o desempenho do algoritmo proposto pode ser melhorado das seguintes formas:

- Definição adequada de objectivos – redução de N_{ObjRad} e/ou $N_{ObjNRad}$.
- Método de pesquisa mais eficiente – redução de $N_{MaxIter}$.
- Algoritmo de simulação do transporte da luz mais eficiente – redução de $O(N_{Cena}, N_{RaiosEsp}, N_{RaiosDesc})$.

5.3. UMA IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO

Na secção 5.1 descreveu-se, no geral, um algoritmo para tratamento de problemas de design de iluminação, tendo como pressupostos que os objectivos são quantificáveis pelo designer e não contemplam modificações de geometria ou de características de materiais de superfície. O algoritmo recorre à simulação do transporte da importância para determinar as influências mútuas das entidades participantes no design, cena e objectivos, sendo essas influências

traduzidas em parâmetros escolhidos pelo designer e sujeitos a um processo de pesquisa e optimização dos seus valores.

A fim de avaliar experimentalmente o algoritmo proposto, foi efectuada a implementação de um protótipo com as seguintes motivações e características:

- Uso de *software* de validade reconhecida em partes críticas do algoritmo:
  - — Simulação do transporte da luz: *software RADIANCE* [Ward88] [Ward94].
  - — Pesquisa de soluções: *software ASA* [Ingber93].
- Uso preferencial de plataforma UNIX[6].
- Fases de definição e introdução de dados sem interface gráfica.
- Inexistência de canais de troca informação para além dos descritos na Fig. 39, ie, os componentes do algoritmo são tratados como "caixas negras".

A implementação realizada e descrita neste capítulo é aberta, flexível, controlável pelo utilizador e construída com ferramentas computacionais de uso livre e geral, o que permite a sua replicação e avaliação por outros utilizadores. Nessa medida, deve ser encarada como uma primeira versão, simplificada, de um sistema automático de apoio ao design de iluminação.

5.3.1. Interacção e Interface

Os aspectos de interacção e interface da implementação efectuada foram bastante simplificados, dado que o objectivo principal é a avaliação do desempenho em termos de produção de soluções correctas e adequadas. Em consequência, optou-se por uma filosofia do tipo UNIX, ie, programas que implementam funções bem definidas e que podem ser facilmente encadeados de modo a produzir os resultados pretendidos. Optou-se também por uma interface alfanumérica na manipulação e parametrização dos programas componentes, embora alguns produzam resultados de tipo gráfico.

5.3.2. Transporte da Luz

A escolha de um algoritmo adequado para a simulação do transporte da luz é muito importante, dado que a sua validade fotométrica afecta decisivamente a qualidade das soluções de design de iluminação obtidas. Por este motivo, a escolha de um pacote de *software* para funcionar como motor de cálculo radiométrico é muito limitada, dado que existem poucos pacotes de *software* com a validade radiométrica exigida.

5.3.2.1. Pacote de Simulação *RADIANCE*

O pacote de simulação *RADIANCE* [Larson98] baseia-se num método de lançamento de raios do ponto de tomada de vista para a cena (*backward ray tracing*, [Whitted80]), ou seja, em sentido contrário ao do percurso real efectuado pelos fotões. O objectivo é enviar raios simulados a partir do ponto de tomada de vista e contabilizar as interacções radiantes que esse raio sofre nas superfícies dos objectos da cena, terminando o seu percurso quando atinge uma fonte de luz ou quando certos critérios de terminação são verificados.

O *RADIANCE* assume as premissas do modelo geométrico da luz (secção 2.1.1.1) e ainda:

- O meio não participa nos fenómenos radiantes.
- Não há fenómenos dependentes de variações contínuas do índice de refracção.
- Usa uma representação tricromática da luz (modelo de cor RGB, secção 2.2.1.1).

[6] A plataforma *Windows*™ também é suportada.

O modelo óptico resultante é suficientemente flexível para simular quase todos os fenómenos ópticos comuns do mundo real. Apesar do método de representação colorimétrica do *RADIANCE* parecer algo limitado, convém referir que a grande maioria das descrições de materiais de superfície usa valores colorimétricos dos modelos tricromáticos XYZ-CIE ou RGB-CIE em vez de curvas espectrais. Na maior parte dos ambientes interiores, as cores não são saturadas, ie, as curvas espectrais de reflexão são "suaves", pelo que os efeitos de natureza espectral podem ser ignorados sem prejuízo da validade radiométrica. O *RADIANCE* também suporta diversos modelos de representação da iluminação natural (secção 2.3.3.2).

A grandeza radiométrica elementar que o *RADIANCE* processa é a radiância. Na ausência de fenómenos dependentes de índices de refracção (transmissão, etc), o *RADIANCE* respeita o enquadramento de operadores de transporte de Veach (secção 2.1.4), o que é fundamental para a sua utilização como simulador de transporte de importância. Sendo de raiz um algoritmo do tipo Monte Carlo, o *RADIANCE* utiliza algumas técnicas determinísticas para melhorar o desempenho computacional e obter resultados mais rapidamente e com menores níveis de ruído. Nessa medida, apesar de suportar um BSDF genérico com reflexão e transmissão, o qual é essencialmente processado por técnicas estocásticas, o *RADIANCE* também suporta uma vasta gama de BSDF's de materiais de superfície comuns, os quais são processados através de técnicas determinísticas ou mistas:

- Tipo especular – Estes BSDF's são processados por técnicas determinísticas (uma ou duas medições de radiância). Exemplos: espelho, dieléctrico e vidro.
- Tipo difuso isotrópico – Os BSDF's deste tipo incorporam os efeitos causados pelas fontes de luz e usam técnicas mistas para avaliar a reflexão e a transmissão difusa. Exemplos: plástico, metal e translúcido.
- Tipo difuso anisotrópico – Semelhante ao anterior, mas dependente de um sistema de coordenadas local ao ponto em que ocorre a interacção radiante.

Pelo facto de ser um pacote com código fonte disponível, foi possível adaptar o *RADIANCE* para usar a radiância básica (Eq. 29) em vez da radiância convencional no tratamento dos BSDF's, o que alarga a sua utilização a cenas com fenómenos dependentes de índices de refracção e aumenta a sua aplicabilidade no algoritmo proposto.

O pacote *RADIANCE* utiliza um sistema de coordenadas tridimensional cartesiano para a descrição da cena, sendo a unidade desse sistema independente de unidades de comprimento do mundo real. Sendo o *RADIANCE* um conjunto de programas independentes, estes podem ser classificados em várias categorias de acordo com a sua função:

- Geradores de cena – Estes programas geram descrições de objectos a partir de parâmetros analíticos (cubos, esferas, cones, etc) ou fazem transformações de objectos ou cenas, eventualmente descritas em formatos diferentes do formato nativo do *RADIANCE*.
- Motores radiométricos – São os programas que usam como dados de entrada uma cena e uma tomada de vista, e que produzem resultados de natureza radiométrica, tipicamente sob forma numérica. Alguns destes programas também produzem imagens, embora sem serem perceptualmente ajustadas.
- Processadores de dados radiométricos – Estes programas auxiliares permitem processar as distribuições de radiância correspondentes a tomadas de vista e gerar novas representações ou determinar critérios de diversa natureza (visual, fotométrica, etc). Distinguem-se:
  - — Processadores perceptuais – São programas que transformam uma distribuição de radiância de uma tomada de vista (uma imagem radiométrica) numa distribuição de luminância (uma imagem fotométrica), de acordo com parâmetros de carácter

perceptual definidos pelo utilizador; o uso destes programas é recomendável na produção de imagens visual e perceptualmente realistas [Larson97].

— Analisadores – Estes programas calculam índices numéricos que permitem a avaliação quantitativa ou qualitativa simplificada dos resultados obtidos (índices de conforto visual, ofuscamentos, níveis de iluminação, etc).

— Conversores – Programas que produzem representações da distribuição de radiância em formatos alternativos, adequados a programas exteriores ao *RADIANCE*.

Apesar da vasta panóplia de programas que compõem o *RADIANCE*, a sua utilização como motor de cálculo radiométrico no algoritmo de design de iluminação proposto implica uma sequência adequada desses programas, de acordo com a Fig. 39: geradores de cena – motores radiométricos – processadores de dados.

5.3.3. Optimização

Na implementação do algoritmo proposto, a escolha adequada de um método de optimização é muito importante, dado que o desempenho deste método afecta significativamente o tempo total de processamento. Em relação aos métodos expostos na secção 2.4.2, analisaram-se os mais utilizados para resolver problemas de optimização global com constrições, combinatórios ou contínuos. Dessa análise resultou a escolha de um método e de um pacote de *software* que o implementa.

5.3.3.1. Análise de Métodos de Optimização

Os métodos que usam *branch and bound* (por exemplo, métodos de intervalos) são geralmente mais fiáveis por fornecerem garantias de convergência, mas, por outro lado, são de aplicação mais difícil porque necessitam de informação global pormenorizada sobre o problema.

Em contrapartida, os métodos heurísticos tendem a ser de aplicação mais fácil porque encaram a função objectivo como uma "caixa negra", ie, só necessitam do valor correspondente a um determinado vector de parâmetros de optimização[7]. O preço a pagar nestes métodos é uma menor certeza na obtenção da solução óptima.

Na escolha de um método de optimização de funções objectivo envolvendo cálculos de transporte da luz, as seguintes características da função objectivo devem ser levadas em conta:

- Custo computacional da função objectivo – Esta característica é determinante, pois uma única avaliação da função objectivo pode exigir muitos cálculos de transporte da luz, os quais dependem fortemente das propriedades da cena (complexidade, detalhe de modelação dos materiais de superfície, etc). Nos mais complexos problemas de design de iluminação analisados, o número de cálculos de radiância por avaliação da função objectivo situou-se entre 1000 e 10000.
- Impossibilidade de obtenção de informação adicional sobre a função objectivo – Esta característica elimina muitos métodos de optimização que necessitam de informação adicional, como, por exemplo, gradientes. Existem métodos que são capazes de obter essa informação através de avaliações adicionais da função objectivo. Porém, a sua eficiência é baixa e o seu desempenho é bastante prejudicado, de acordo com as considerações anteriores.
- Complexidade da função objectivo – Em problemas reais de design de iluminação, a função objectivo exibe um comportamento matemático complexo (descontinuidades,

[7] Embora possam tirar partido de informação de gradientes, caso seja possível obter tal informação.

variações bruscas, existência de muitos extremos locais, etc), o que também condiciona a aplicação dos métodos de optimização existentes.

- Constrições complexas – A existência de constrições complexas dificulta o desempenho dos métodos e reduz as garantias de obtenção de soluções "óptimas". Essas constrições podem ser no domínio da função objectivo (gamas de valores dos parâmetros) ou relações complexas entre parâmetros (uma possível fonte de não-linearidades da função objectivo).

De acordo com as características enunciadas, os métodos de optimização local são desaconselhados, excepto se integrados com um método inicial "grosseiro" de optimização global, capaz de identificar a região do espaço de configuração de parâmetros onde se situa o extremo óptimo. Porém, devido à complexidade da função objectivo, parece mais prudente adoptar-se um método genérico de optimização global.

5.3.3.2. Métodos de *Branch and Bound*

Uma vantagem importante destes métodos (intervalos, *clustering*, etc) é fornecerem mais garantias de optimização da função objectivo, mas à custa de maiores necessidades, em termos de informação sobre o problema. À falta dessa informação adicional, realizam um maior número de avaliações da função objectivo para a gerar indirectamente. Por consequência, uma desvantagem que possuem relaciona-se com o número elevado de avaliações da função objectivo que têm de efectuar.

Além disso, no caso mais desfavorável, estes métodos têm uma complexidade de execução exponencial, embora nos problemas mais comuns esta situação não se verifique.

5.3.3.3. Métodos de *Simulated Annealing*

Na sua formulação original, estes métodos parecem ser convergentes para a solução óptima (num sentido probabilístico), muito embora a velocidade de convergência seja frequentemente muito lenta. Diversos melhoramentos podem acelerar significativamente essa convergência, embora não assegurem a obtenção da solução global óptima num número baixo de iterações. O papel da diminuição lenta da temperatura no processo de têmpera de um metal, que permite atingir estados de energia mais baixa, é frequentemente modelado através de leis de decaimento do tipo exponencial.

Uma das maiores dificuldades na aplicação destes métodos reside na compreensão do papel da "temperatura" em problemas que nada têm directamente a ver com a têmpera de um metal. Leis inadequadas de decaimento da "temperatura" podem fazer com que a convergência seja rápida demais, e portanto, sem garantias razoáveis de se obter uma solução "óptima", ou, pelo contrário, demasiado lenta , mas com maior probabilidade de se obter uma solução "óptima". A escolha de uma lei de decaimento da "temperatura" adequada depende do tipo de problema e do seu grau de conhecimento.

Estes métodos têm a vantagem de não efectuar tantas avaliações da função objectivo como os métodos anteriormente referidos, mas a sua convergência lenta obriga a que sejam repetidos várias vezes, a fim de se aumentar a confiança nos resultados obtidos.

5.3.3.4. Métodos de *Tabu Search*

Estes métodos parecem apresentar algumas vantagens interessantes sobre os métodos de *simulated annealing*, essencialmente pelo facto de possuírem níveis de memória, de curta e longa duração, os quais são usados para acumular conhecimento sobre o comportamento da

função objectivo. Permitem evitar seguir percursos de pesquisa anteriormente trilhados e que poderiam conduzir a um desperdício de processamento, ou acelerar os percursos de pesquisa conhecidos.

A sua principal desvantagem é introduzirem uma maior complexidade no processo de optimização, dado ser muito importante o planeamento adequado dos níveis de memória. Além disso, o desempenho destes métodos tem de ser afinado para cada tipo de problema de optimização.

5.3.3.5. Métodos de Algoritmos Evolucionários

Estes métodos heurísticos, baseados em analogias da biologia, parecem ter uma capacidade interessante de abandonar regiões de extremos locais, inclusive superior aos métodos de *simulated annealing*, no caso das regras de recombinação serem bem escolhidas. No entanto, a eficiência destes métodos depende fortemente da selecção adequada destas regras e de outros critérios, pelo que a afinação das implementações destes métodos exige bastante intuição e conhecimento do problema em causa, ao contrário dos métodos de *simulated annealing*, por exemplo.

5.3.3.6. Escolha do Método de Optimização

Os métodos de *simulated annealing* e de algoritmos evolucionários parecem ser os mais fáceis de compreender e de implementar, aspectos que convencem frequentemente os utilizadores de optimização global a empregar esses algoritmos na resolução dos seus problemas.

Os métodos de *simulated annealing* funcionam com quase todos os tipos de problema e são particularmente apropriados para situações em que o objectivo primário é determinar rapidamente soluções quasi-óptimas. Pelo facto de tratarem a função objectivo como uma "caixa negra" e de não necessitarem de informação adicional, estes métodos não são penalizados quando a função objectivo tem um custo computacional elevado e existem muitas constrições complexas.

Os métodos de *branch and bound* podem dar mais garantias qualitativas acerca das soluções obtidas, mas apenas no caso de se verificarem condições suficientes de existência de extremos globais. O seu desempenho é insatisfatório quando a função objectivo tem um custo computacional elevado e/ou existem muitas constrições complexas.

Na optimização aplicada ao design de iluminação, em que as constrições tendem a ser complexas e em número significativo, para além de uma função objectivo com um custo computacional elevado, os métodos heurísticos de *simulated annealing* são os mais apropriados.

5.3.3.7. Pacote de Optimização *ASA*

O pacote de optimização *ASA* permite desenvolver rapidamente um programa de optimização global baseado num método de *simulated annealing*. Apesar da facilidade de aplicação, alguns aspectos deste método podem ser configurados a fim de se melhorar a eficiência sem sacrificar a convergência estatística [Ingber93].

As fases iniciais do método efectuam, em geral, uma pesquisa global distribuída, de modo a poder explorar regiões "óptimas" alternativas. Nestas fases, é muito importante avaliar a sensibilidade da pesquisa global em relação à temperatura inicial. Em contrapartida, as fases finais concentram-se em fazer convergir localmente para os extremos globais. Em alguns casos, pode até justificar-se a mudança para algoritmos locais de optimização, eventualmente mais

eficientes. Se existir informação extra, esta poderá ser usada para definir critérios adicionais de convergência.

Para além das características gerais de *simulated annealing*, o método *ASA* dispõe de algumas possibilidades adicionais:

- *Reannealing* – Permite ajustar as gamas de variação dos parâmetros menos sensíveis ao *annealing*, de modo a melhorar a pesquisa dos parâmetros mais sensíveis. O método *ASA* escala periodicamente as gamas de sensibilidade dos parâmetros por forma a concentrar-se nos mais sensíveis e acelerar o desempenho do método.
- Auto-optimização de parâmetros – Permite ao *ASA* analisar os parâmetros de pesquisa e, através de um pré-processamento automático, corrigir e optimizar as opções de optimização global.
- *Quenching* – Consiste na aceleração dos critérios de redução da temperatura e das gamas de variação dos parâmetros, por forma a concentrar-se mais rapidamente numa região do espaço de configuração. Porém, o uso de *quenching* anula a garantia de convergência estatística.

No entanto, a aplicação destas possibilidades depende fortemente do conhecimento existente sobre o problema em causa.

5.3.4. Dados de Entrada

Os dados de entrada, cuja composição é descrita na secção 5.1.2, podem ser obtidos de vários modos. Na implementação actual, em que não existe uma interface global própria, têm sido utilizados os seguintes métodos:

- Geometria – Através do uso de modeladores geométricos ou, em casos mais simples, através da edição directa da geometria via editores de texto. Em alguns dos casos apresentados no capítulo 6, utilizou-se o modelador geométrico *AutoCAD*™[8] para criar e manipular a cena, tendo em seguida sido usado um programa tradutor para o formato nativo de cena do *RADIANCE*.
- Materiais de superfície – Definidos com recurso a editores de texto.
- Objectivos radiométricos – Este tipo de objectivos define-se com recurso a editores de texto e descrevem-se através de geometria e de valores radiométricos.
- Função custo – A função custo é representada por um programa custo, a definir pelo utilizador em cada problema de pesquisa. O programa custo incorpora os objectivos não-radiométricos.
- Critérios de paragem – Estes critérios são definidos num ficheiro de configuração do programa *ASA*.

Para além dos dados de entrada referidos, existem outros dados de entrada relacionados com o *RADIANCE* (parâmetros de configuração do motor radiométrico, etc), inerentes ao algoritmo de simulação do transporte da luz adoptado.

5.3.5. Pesquisa de Soluções

A fase de pesquisa de soluções é totalmente implementada através de um programa baseado no pacote *ASA*, o qual necessita apenas da definição da função custo. O *ASA* utiliza a linguagem de programação C, pelo que a versão operacional do programa de pesquisa de soluções tem de ser compilada por qualquer compilador de C homologado. A fim de se evitar a edição frequente do

[8] *AutoCAD* é uma marca registada da *Autodesk*.

programa *ASA* e subsequente compilação, optou-se por implementar uma função custo simples, em linguagem C, cuja única função é invocar um programa externo que determina o valor custo. Deste modo, o programa de pesquisa de soluções *ASA* permanece inalterado. O programa externo de computação da função custo pode ser implementado de diversas formas, como será descrito adiante.

5.3.5.1. Ciclo de Pesquisa

O ciclo de pesquisa, implementado através de um programa do pacote *ASA*, pode ser controlado por diversos parâmetros, os quais afectam, em última análise, a qualidade das soluções obtidas. Os parâmetros de configuração mais relevantes são:

- Nº máximo de iterações a efectuar antes de terminar.
- Nº máximo de soluções aceites antes de terminar.
- Nº máximo de estados inválidos repetidos – A pesquisa termina se a função custo gerar um número sucessivo de estados inválidos superior ao valor definido.
- Precisão do valor custo – Precisão admitida para o valor da função custo.
- Período de soluções aceites – Representa o número de soluções aceites após as quais a escala de variação dos parâmetros de pesquisa é reduzida (corresponde a um "arrefecimento" do sistema).

Sendo o *ASA* uma implementação de um método heurístico, a convergência para a solução óptima é apenas garantida estatisticamente. Assim sendo, é preferível repetir várias vezes o ciclo de pesquisa com um número máximo de iterações da ordem dos milhares e tomar como "óptimas" as melhores soluções encontradas, ie, não é recomendável realizar apenas um ciclo de pesquisa com um número máximo de iterações muito elevado.

5.3.5.2. Computação da Função Custo

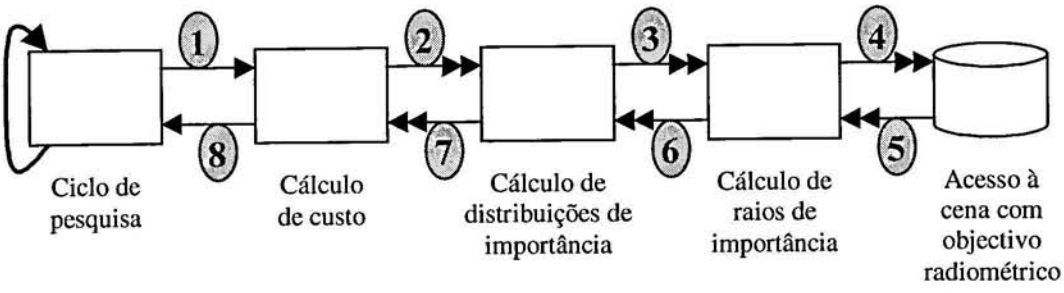


Fig. 40 – Cadeia de cálculos por iteração de pesquisa

Em cada iteração do ciclo de pesquisa é necessário determinar o valor da função custo para o conjunto particular de valores dos parâmetros de pesquisa. A Fig. 40 mostra a cadeia de cálculos que se inicia no programa *ASA* (ciclo de pesquisa), vai até cada conjunto cena/objectivo radiométrico[9] e regressa ao ponto de partida. Os números na Fig. 40 representam as entidades envolvidas entre cada par de processos:

[9] Recorde-se que cada conjunto cena e objectivo radiométrico funciona como um cena individual, em termos de determinação da distribuição da importância emitida pelas fontes associadas a esse objectivo radiométrico.

1. Parâmetros de pesquisa do problema de design de iluminação.
2. Pontos ou áreas em que se calculam distribuições de importância.
3. Ponto de partida e direcção de raio para cálculo de importância elementar.
4. Acesso às estruturas de dados de cada conjunto cena/objectivo radiométrico.
5. Valores parcelares de importância por cada interacção radiante associada ao raio em causa.
6. Importância de um raio.
7. Distribuição de importância.
8. Valor de custo.

Como se depreende da cadeia anteriormente referida, uma avaliação da função custo implica uma quantidade elevada de cálculos de importância, para a determinação da qual se efectua uma quantidade muito elevada de operações de espalhamento e de propagação (as operações fundamentais de transporte da luz).

5.3.6. Dados de Saída

Os dados de saída podem ser de vários tipos:

- Numéricos – Tabelas de evolução das soluções obtidas, etc. Este tipo de dados de saída não permite acompanhar facilmente a evolução do processo de pesquisa, embora sirva de base para representações mais elaboradas, particularmente as representações gráficas.
- Representações da cena ou dos objectos mais relevantes em malha de arame e das soluções obtidas, como se mostra na Fig. 41. Quando os parâmetros representam características de luminárias, estas são visualizadas de forma simplificada através de primitivas geométricas simples (esferas ou cones com vector). Em termos gráficos, este tipo de representação é simples e adequado para acompanhar a evolução da pesquisa de soluções.

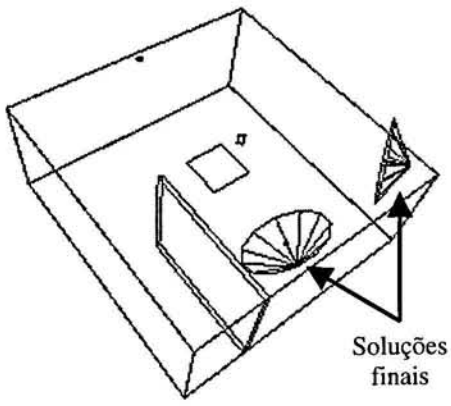


Fig. 41 – Cena e soluções em representação "malha de arame"

- Representações da cena sombreada e da sucessão de soluções obtidas. Este tipo de representação é adequado para a observação de parâmetros associados a características de luminárias, sendo uma sofisticação do anterior.
- Representações da cena sombreada e de todas as soluções obtidas. Este tipo de representação serve para mostrar a disposição espacial das soluções, o que ajuda a concluir se a formulação do problema é apropriada. Caso as soluções se espalhem demasiado na cena, pode ser um indício de formulação incorrecta.

- Representações da cena sombreada com modelação dos objectivos através das soluções finais obtidas, como se mostra na Fig. 42; este tipo de representação é excelente para visualizar o problema "solucionado", embora os recursos computacionais necessários recomendem a sua utilização apenas em fases finais do design.

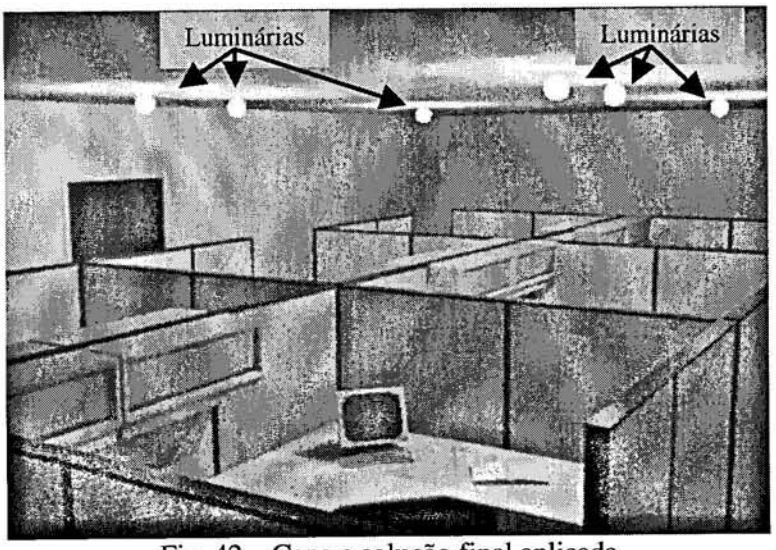


Fig. 42 – Cena e solução final aplicada

- Representações da cena sombreada com modelação dos objectivos através das soluções finais obtidas e dados quantitativos, como se mostra na Fig. 43; este tipo de representação é excelente para a análise final do problema, embora as considerações anteriores sobre recursos computacionais também se apliquem.

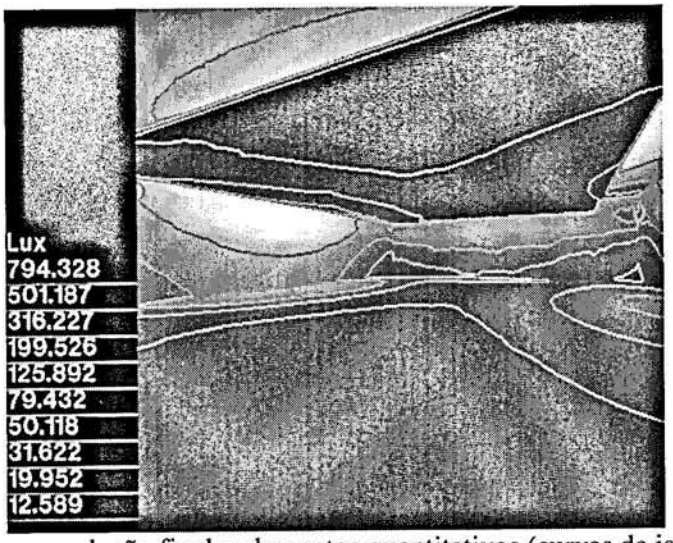


Fig. 43 – Cena com solução final e elementos quantitativos (curvas de iso-iluminância)

5.3.7. Complexidade e Desempenho

A elevada complexidade da implementação efectuada, decorrente da complexidade inerente ao algoritmo proposto, justifica que sejam analisados os tipos de dados intermédios manipulados, no sentido de se detectarem pistas que permitam a introdução de mecanismos de reaproveitamento desses dados intermédios, o que poderá levar a benefícios em termos dos recursos computacionais consumidos. Destaca-se particularmente a "necessidade" de redução dos tempos de processamento, conforme se verá adiante no capítulo 6.

A título de exemplo, considere-se o seguinte problema de design de iluminação: determinar a posição de N luminárias do tipo foco junto ao tecto e com espaçamentos horizontais dentro de uma gama predefinida, produzindo iluminação adequada e homogénea nos tampos de secretárias mas evitando ofuscamentos na posição sentada. Este é um problema com $4\times N$ graus de liberdade, ie, $4\times N$ parâmetros de pesquisa (4 por cada luminária: posição no plano horizontal do tecto e direcção para baixo).

Os objectivos de iluminação podem ser representados por 2 objectivos radiométricos (iluminação nos tampos e ofuscamento nas faces), sendo os espaçamentos a respeitar incluídos na função custo. Supondo-se que a gama de variação discreta das posições é P_x e P_y, sendo D_α e D_θ para as direcções, o espaço de configuração de parâmetros resultante é de dimensão $(P_x \times P_y \times D_\alpha \times D_\theta)^N$. Se N=4, P_x=100, P_y=100, D_α=45 e D_θ=180 obtém-se o valor 4.305e+31 para o número total de configurações!

Cada avaliação da função custo implica a determinação de $2\times N$ distribuições de importância (N luminárias vezes 2 conjuntos de fontes de importância). Se cada distribuição for calculada com cerca de K_{imp} raios de importância, serão efectuados $2\times N\times K_{imp}$ cálculos de raios de importância por iteração do ciclo de pesquisa. Assumindo que o *RADIANCE* faz, em média, K_{esp} operações de espalhamento de importância e K_{pro} operações de propagação por raio a determinar, o número total de operações de transporte por iteração é $2\times N\times K_{imp}\times(K_{esp}+K_{pro})$.

Caso o programa *ASA* encontre soluções "óptimas" em 1000 iterações, o número total de operações de transporte realizadas é $1000\times 2\times N\times K_{imp}\times(K_{esp}+K_{pro})$. Se N=4, K_{imp}=600, K_{esp}=20 e K_{pro}=200 obtém-se o valor 2112 milhões (os valores arbitrados para K_{imp}, K_{esp} e K_{pro} são valores médios em cenas com dezenas de milhar de primitivas geométricas).

5.3.7.1. Dados Intermédios

De entre os dados intermédios, a entidade mais relevante é a distribuição de importância. Em problemas de design de iluminação que envolvam a determinação do comportamento da importância em torno de um ponto, é necessário calcular essa distribuição. Também podem existir outros tipos de distribuições (lineares, malhas de pontos, etc), mas a pontual é a mais comum.

A distribuição de importância em torno de um ponto é, no caso geral, uma função escalar esférica de duas variáveis (latitude e longitude, por exemplo). No entanto, a determinação da importância para todas as direcções em torno de um ponto é impraticável, pelo que é necessário efectuar essa determinação num conjunto discreto de direcções, ie, amostrar a distribuição. As condições que afectam a definição do conjunto discreto de amostras mais adequado são:

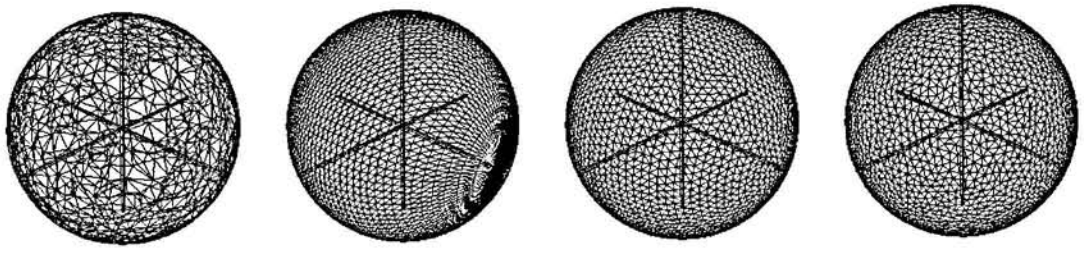
- Quantas mais amostras melhor – Tende a reduzir o erro de aproximação.
- Quantas menos amostras melhor – Reduz os tempos de processamento.
- As amostras deverão contemplar razoavelmente todas as direcções em torno do ponto. Esta condição é importante para evitar o cálculo de distribuições tendenciosas ou erróneas.

As duas primeiras condições são contraditórias, pelo que é necessário encontrar um valor de compromisso que satisfaça ambas de um modo razoável. Testes efectuados mostraram que cerca de 4096 amostras de importância permitem aproximar adequadamente a distribuição de importância. No entanto, qualquer que seja o valor adoptado, há sempre alguma probabilidade de fenómenos direccionais que se manifestam em ângulos sólidos pequenos não serem devidamente captados (por exemplo, iluminação directa ou efeitos especulares). Em situações mais problemáticas, 8192 amostras mostraram ser um número mais adequado, na falta de esquemas adaptativos de controle do número de amostras.

A terceira condição também é relevante, dado que as amostras devem cobrir o mais uniformemente possível o conjunto de direcções em torno do ponto, a fim de se evitar amostragens tendenciosas e potencialmente geradoras de erros. O problema de determinar as N "melhores" direcções distribuídas em torno de um ponto é equivalente ao problema de encontrar os N "melhores" pontos distribuídos sobre a superfície da esfera unitária [Saff97]. A noção de "melhor" está normalmente associada a um espaçamento harmonioso entre os pontos sobre a superfície da esfera unitária, usando-se uma métrica geodésica[10] de distância para avaliar o espaçamento. No entanto, um problema aparentemente tão simples não tem solução analítica, pelo que foi implementada uma heurística de geração de N pontos distribuídos sobre a esfera unitária, usando-se como critério de distribuição a minimização da variância da distância geodésica entre pontos. Essa heurística utiliza uma versão especializada do método de *simulated annealing* para gerar distribuições quasi-óptimas de N pontos.

A Fig. 44 mostra algumas distribuições de pontos sobre a superfície da esfera unitária; os pontos, processados através de um algoritmo do tipo *convex hull* [Barber97], definem uma malha de triângulos de fácil visualização. A distribuição a), cujos pontos são gerados aleatoriamente sobre a superfície da esfera, tem como defeito principal o facto dos pontos não cobrirem regularmente a superfície da esfera. Na distribuição b) os pontos são gerados por um algoritmo que usa coordenadas polares (latitude e longitude) para os colocar na superfície da esfera, o que provoca uma aglomeração de pontos nos pólos (latitudes próximas de –90° e 90°), sendo tal aglomeração uma desvantagem. A distribuição c), apesar de também ser algorítmica, não apresenta os inconvenientes da distribuição anterior, embora exiba uma regularidade passível de se manifestar aquando do cálculo da distribuição de importância (o arranjo em espiral dos pontos gerados provoca *aliasing*). A distribuição d) obtém-se através da heurística anteriormente referida, na qual os pontos são inicialmente gerados de forma aleatória sobre a superfície da esfera e depois iterativamente movidos sobre a superfície, como se estivessem sujeitos a forças atractivas ou repulsivas dependentes da distância geodésica.

As melhores distribuições são a c) e a d), mas a distribuição c) apresenta uma regularidade que tende a manifestar-se negativamente no cálculo da importância, visível sob a forma de *aliasing*. Por isso, a distribuição escolhida é a do tipo d); no entanto, é necessário um número muito elevado de iterações para se obter uma distribuição "óptima".



a) Aleatória b) Lat./Longitude c) Espiral d) Distância

Fig. 44 – Distribuições de pontos sobre a superfície da esfera unitária (4096 pontos)

Na implementação efectuada foram pré-calculadas algumas distribuições de pontos para valores de N=1024, 2048, 4096 e 8192, as quais são reutilizadas sempre que é necessário. Assim, evita-se a repetição do cálculo de distribuições de pontos sobre a superfície da esfera unitária.

[10] Geodésica significa que as medições são efectuadas sobre a superfície da esfera unitária, o que acarreta que a menor distância entre dois pontos seja representada por um arco de circunferência.

5.3.8. Aceleração da Pesquisa

Uma forma de acelerar o desempenho é através do uso de *quenching* em vez de *annealing* no programa *ASA* (secção 5.3.3.7), conforme se mostra na Fig. 45.

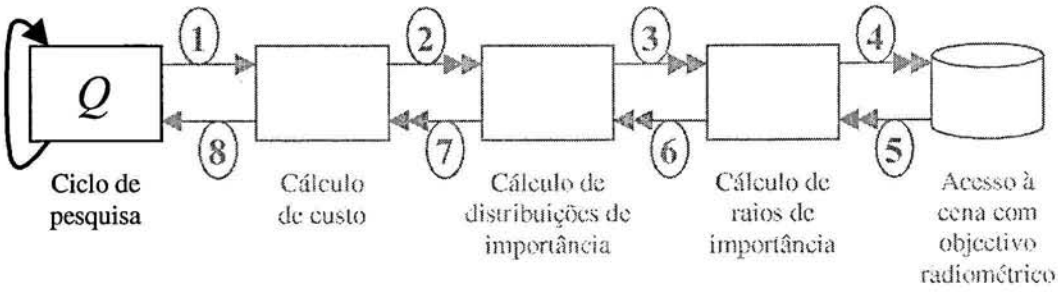


Fig. 45 – Aceleração da pesquisa através de *simulated quenching*

Nos métodos de optimização global baseados em *simulated annealing* ou *quenching*, efectua-se periodicamente uma análise da convergência das iterações realizadas, o que leva, em determinadas circunstâncias, à redução da temperatura do processo e à redução das gamas de variação dos parâmetros de pesquisa, sendo o resultado a concentração da pesquisa numa região do espaço de configuração de parâmetros. Tipicamente, as circunstâncias que ditam essas reduções estão relacionadas com o número de iterações realizadas ou com o número de melhores soluções encontradas (por exemplo, a cada 500 iterações ou a cada 50 soluções), embora outras condições possam também ser usadas.

A substituição do *annealing* pelo *quenching* pode gerar ciclos de pesquisa mais curtos, dado que o ritmo de convergência para a região do extremo supostamente global é acelerado. No entanto, a perda da garantia estatística de convergência para a solução óptima faz com que esta técnica tenha de ser adaptada caso a caso, não sendo possível obter conclusões gerais. A consequência prática da perda de convergência estatística é a possibilidade da concentração da pesquisa se fazer numa região de extremo local, sem possibilidade de se escapar desta região. Pelo contrário, o *annealing* tem sempre uma probabilidade não-nula de escape de qualquer região do espaço de configuração de parâmetros.

A dificuldade de analisar o efeito do *quenching* na pesquisa de soluções deve-se ao facto de ser uma técnica eminentemente empírica e dependente de parâmetros adicionais tais como dimensionalidade do problema e outros. De acordo com [Ingber93], o uso de *quenching* justifica-se em problemas complexos e com restrições complicadas nos quais se pretenda apenas obter soluções razoáveis com um gasto moderado de recursos computacionais, o que é aplicável a muitos problemas de design de iluminação.

5.3.9. Exploração de Coerência

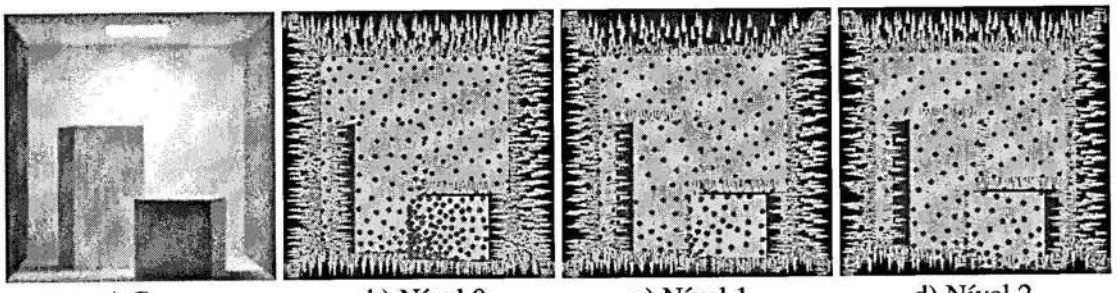
Em termos do transporte de importância, a complexidade descrita na Fig. 40 (secção 5.2.3) e evidente no exemplo apresentado na secção 5.3.7 foi investigada com o objectivo de se obter um aumento de desempenho da implementação proposta.

Uma forma de se aumentar teoricamente o desempenho é através do reaproveitamento de dados em cada um dos níveis da Fig. 40, supondo para tal que esses dados possuem alguma propriedade que justifique essa intenção. Esta propriedade existe em alguns níveis, designa-se coerência e está relacionada com a variação lenta de informação na vizinhança de um ponto.

No transporte da luz, a abordagem convencional no tratamento do espalhamento radiante consiste em usar um número baixo de raios luminosos para calcular o componente especular e um número elevado para o componente difuso. O *RADIANCE* emprega esta abordagem, mas, para evitar o crescimento descontrolado da computação associada ao componente difuso, usa estruturas de dados especializadas para poder reutilizar a informação em pontos geometricamente próximos, ie, implementa uma *cache* de dados para explorar a coerência do componente difuso do espalhamento. Assim, os componentes de espalhamento com variação rápida, contribuições de fontes de luz e componente especular são processados por técnicas determinísticas ou estocásticas sem recurso a *caches* de dados.

Apesar dos efeitos da interreflexão difusa (componente difuso do espalhamento) serem subtis, não podem ser ignorados, pois são relevantes para uma simulação correcta do transporte da luz e podem mesmo ser fundamentais em cenas com pouca ou nenhuma iluminação directa. Visto ser impossível calcular exactamente o valor da interreflexão difusa em todos os pontos da cena, o *RADIANCE* recorre a técnicas estocásticas para obter um valor aproximado [Ward88b] [Ward92]. A *cache* de dados usada no cálculo da interreflexão difusa armazena, para cada nível de espalhamento, valores de irradiância indirecta (integral da radiância que não emana directamente de fontes de luz) ou de grandezas equivalentes em termos de importância.

A título de exemplo, a Fig. 46 apresenta uma imagem da cena "Caixa de Cornell" e as amostras de irradiância indirecta armazenadas nos três níveis iniciais da *cache* de espalhamento difuso. O número total de amostras de irradiância indirecta é 9897, sendo 4468 do nível 0, 3501 do nível 1 e 1928 do nível 2 (cada amostra de irradiância indirecta é representada por um pequeno cone localizado na posição da amostra).



a) Cena b) Nível 0 c) Nível 1 d) Nível 2

Fig. 46 – Amostras de irradiância indirecta por nível de reflexão

As vantagens da exploração da coerência da interreflexão difusa são aplicáveis a todos os tipos de cenas e produzem reduções significativas dos tempos de processamento. Em termos da implementação do algoritmo proposto na Fig. 39, o uso desta técnica de *cache* de dados do *RADIANCE* permite reduzir a complexidade computacional da função custo ao nível dos cálculos radiométricos (entidades 4 e 5 da Fig. 47).

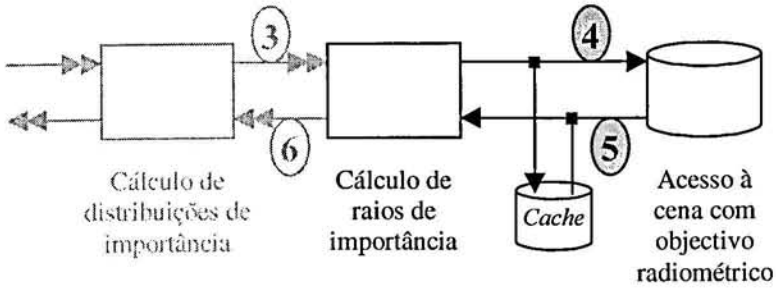


Fig. 47 – Cálculos por iteração de pesquisa (*cache* de importância integral indirecta)

A exploração de um mecanismo de coerência (*cache* de dados) a nível dos cálculos radiométricos elementares, efectuada pelo *RADIANCE* (Fig. 47), permite acelerar o desempenho da implementação proposta.

Dada a natureza do algoritmo proposto para o design de iluminação, outras formas de coerência podem ser adicionalmente aplicadas noutros níveis. Por esse motivo, foi desenvolvido outro mecanismo de exploração de coerência através de reutilização de dados ao nível do cálculo de importâncias individuais (entidades 3 e 6 da Fig. 48), o qual é descrito de seguida.

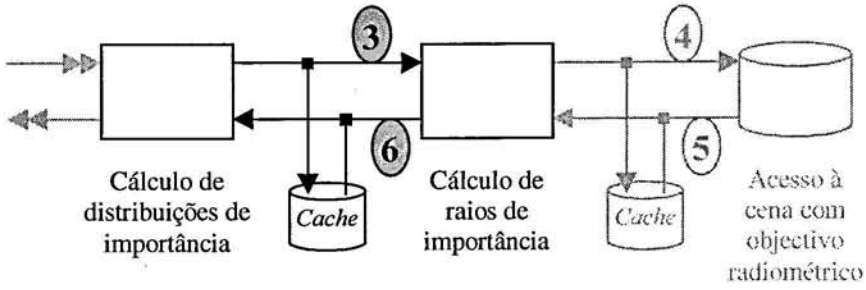


Fig. 48 – Cálculos por iteração de pesquisa (*cache* de importância individual)

O algoritmo implementado utiliza a determinação de distribuições de importância em torno de um ponto, a fim de se poder computar o valor da função custo. Dado que dois raios de importância paralelos e próximos entre si têm grande probabilidade de representar a mesma importância, então duas distribuições de importância em dois pontos próximos têm igualmente uma grande probabilidade de serem semelhantes. Esta coerência de distribuições de importância pode ser explorada através de uma *cache* de dados, em que cada elemento da *cache* é uma distribuição de importância em torno de um ponto.

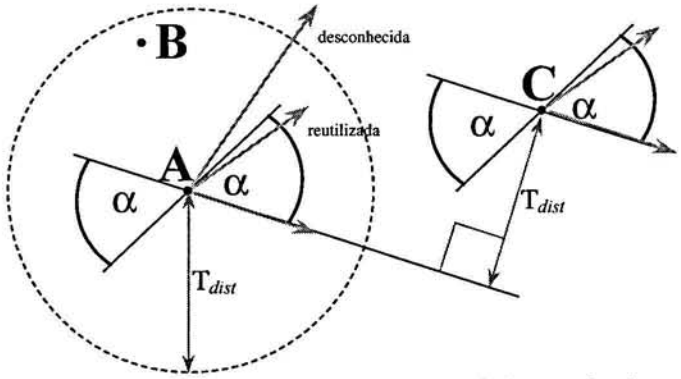


Fig. 49 – Coerência de distribuições de importância

Nota: α é o ângulo de reaproveitamento de raios de importância, função de T_{dist} e de |AC| [11]

Na Fig. 49 apresenta-se um exemplo bidimensional ilustrativo. O ponto A possui uma distribuição previamente calculada, sendo as distribuições dos pontos B e C desconhecidas. O parâmetro de proximidade T_{dist} define a distância máxima para a qual duas distribuições são consideradas semelhantes. No caso do ponto B, pelo facto de estar a uma distância inferior a T_{dist} do ponto A, considera-se que a sua distribuição de importância é a mesma que a do ponto A, evitando-se o recurso ao cálculo de importância. No caso do ponto C, que está a uma distância superior a T_{dist} do ponto A, apenas as amostras de importância dentro do ângulo α são reutilizadas, dado que quaisquer dois raios de importância paralelos, um passando por A e o

[11] $\alpha = 2\ arcsen\ (T_{dist} / |AC|)$

outro por C, distam entre si de uma distância inferior a T_{dist}. Caso existam mais pontos próximos de C com distribuições de importância conhecidas, pode repetir-se este processo para os ângulos com importâncias desconhecidas. Finalmente, as importâncias desconhecidas que restem no ponto C são determinadas através do algoritmo de simulação do transporte de importância. As amostras de importância reutilizadas são devidamente assinaladas, de modo a evitar-se a sua reutilização mais de que uma vez.

A técnica de reaproveitamento de raios de importância anteriormente descrita depende do parâmetro T_{dist} e da distância entre o ponto a determinar e o ponto da *cache* de dados em causa. Na Tab. 3 mostra-se de que modo o reaproveitamento de raios de importância varia com a razão dessas duas quantidades. Note-se que, mesmo quando a distância entre pontos é muito superior ao parâmetro T_{dist}, ainda se conseguem obter índices de reaproveitamento superiores a 1%. Assim sendo, quando o número de pontos na *cache* de dados for significativo, será de esperar que esta técnica permita reaproveitar muitos raios de importância previamente calculados e, desse modo, acelerar consideravelmente o desempenho do algoritmo proposto.

Razão distância/T_{dist}	Reaproveitamento (%)	Razão distância/T_{dist}	Reaproveitamento (%)
<=1	100.00	15	4.25
2	33.33	20	3.18
3	21.63	25	2.55
5	12.82	50	1.27
10	6.38	100	0.64

Tab. 3 – Índices de reaproveitamento da técnica de *cache* de importância

Quando um novo ponto a determinar está dentro da região de influência de um ponto previamente calculado (ie, dista menos de T_{dist}), o mecanismo de exploração de coerência também funciona ao nível das distribuições completas de importância, conforme se mostra na Fig. 50.

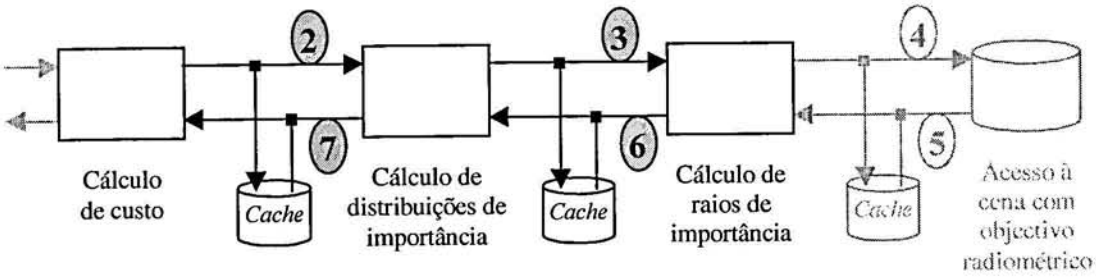


Fig. 50 – Cálculos por iteração de pesquisa (*cache* de distribuições de importância)

Para além de tirarem partido do facto da importância se manter constante ao longo de um trajecto desobstruído (em meios não-participantes), os mecanismos ligados à importância exploram dois tipos de coerência:

- Coerência espacial da importância – Pontos próximos tendem a partilhar muitos raios de importância.
- Coerência iterativa – Os métodos de optimização global vão reduzindo as regiões do espaço de configuração onde concentram a sua pesquisa, o que se traduz geralmente em volumes tridimensionais sucessivamente mais pequenos, pelo que a probabilidade dos novos pontos a gerar estarem mais próximos de pontos anteriormente gerados aumenta durante o decurso da pesquisa iterativa.

```
calcular_DI(ponto,direcção,T_dist)
  se DI(ponto,direcção) já existe
    devolve DI(ponto,direcção)
  inicializa esta_DI
  define lista_DI com DI mais próximas (distância < T_dist) da cache de DI
  para cada candidato_DI na lista_DI
    se amostras de importância de candidato_DI servem e não foram usadas
      acrescenta amostras de importância de candidato_DI a esta_DI
  se esta_DI está completa
    devolve esta_DI(ponto,direcção)
  senão
    assinala as amostras de importância como usadas
  calcula as amostras em falta através do RADIANCE
  assinala essas amostras como não usadas
  acrescenta essas amostras a esta_DI
  guarda esta_DI na cache de DI
  devolve esta_DI(ponto,direcção)
```

Fig. 51 – Pseudo-código de cálculo de distribuições de importância

A Fig. 51 descreve o mecanismo de exploração de coerência empregue para calcular distribuições de importância (abreviadas por DI), mecanismo esse associado às entidades 2/7 da Fig. 50.

A introdução de três mecanismos de *cache* para reutilização de dados tem por objectivo a aceleração do desempenho, em virtude de substituir a realização de cálculos complexos por acessos a estruturas de dados especializadas. Assim sendo, é de esperar um aumento real de desempenho da implementação proposta, caso os parâmetros de exploração das coerências sejam adequadamente definidos (parâmetros intrínsecos do *RADIANCE* e o parâmetro T_{dist}).

5.3.10. Paralelização do Cálculo Radiométrico

Para além das técnicas anteriormente referidas, existe também a possibilidade de distribuir a computação associada à simulação do transporte da luz por diversos dispositivos computacionais, tipicamente computadores interligados em rede. Tradicionalmente, a essa computação é realizada por um programa radiométrico "sequencial", ie, um programa que recebe uma tarefa de cada vez, só aceitando outra tarefa depois de ter completado a anterior.

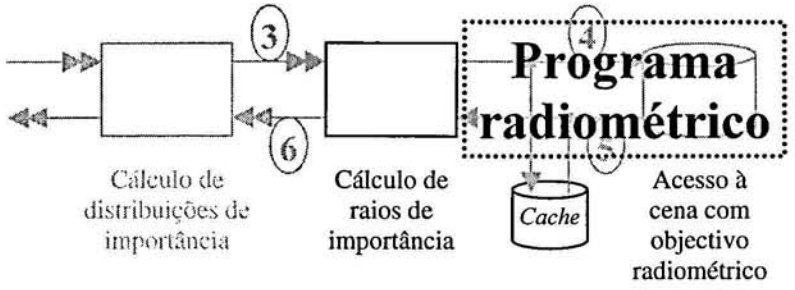


Fig. 52 – Motor radiométrico de simulação do transporte da luz

Este modelo sequencial é muito conveniente para dispositivos computacionais uni-processador, sendo utilizado pelo pacote *RADIANCE* no programa motor radiométrico e, por consequência, na implementação efectuada (Fig. 52).

No entanto, com o advento e vulgarização de ambientes computacionais baseados na interligação de computadores através de redes de comunicação, a disponibilidade de poder de cálculo computacional alterou-se significativamente. Assim, quando um computador ligado numa rede não está a ser usado, justifica-se a sua utilização na realização de outras tarefas computacionais complexas (Fig. 53), o que constitui uma forma de computação "distribuída".

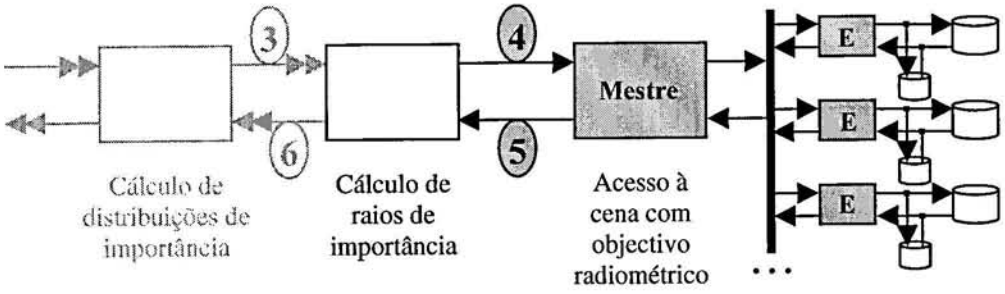


Fig. 53 – Motor radiométrico "distribuído"

Desta forma, é como se existisse um dispositivo computacional virtual formado por dispositivos computacionais convencionais. Idealmente, esse dispositivo virtual deverá ser capaz de se adaptar dinamicamente à entrada e saída de dispositivos convencionais na sua esfera de influência, sem perda de informação previamente calculada. Outras características desejáveis são a independência em relação aos sistemas operativos, capacidade de tolerância a falhas e de re-submissão de tarefas, balanceamento dinâmico da carga computacional em função das características de cada máquina, entre outras.

O pacote *PVM* (*Parallel Virtual Machine*[12]) tem por objectivo a implementação de programas computacionais capazes de operar numa rede de dispositivos heterogéneos, de acordo com as características anteriormente descritas [Geist94]. Através do *PVM* é possível executar uma tarefa computacional numa rede formada por máquinas heterogéneas, tirando-se partido das características intrínsecas de cada uma. Este tipo de computação é comummente designado por computação paralela.

O paradigma mais usado em aplicações *PVM* é a computação em grupo (*crowd computing*), ie, um conjunto de processos relacionados entre si, normalmente semelhantes, que computam diferentes partes do trabalho computacional total e trocam frequentemente mensagens. Dentro deste paradigma, o modelo mestre-escravo é bastante promissor. Neste modelo, existe um programa distinto, o mestre, que é responsável pela activação, configuração, comando e recolha de dados dos programas escravos. Normalmente, são apenas os escravos que realizam a computação. O trabalho pode ser atribuído aos escravos, pelo mestre, de forma estática ou dinâmica, em função do modo como a computação progride.

No caso vertente, o motor radiométrico do *RADIANCE* é eminentemente sequencial, embora a capacidade de funcionar em modo "persistente" lhe confira alguma flexibilidade adicional, o que pode ser explorado em termos de paralelização.

A implementação de uma versão paralela do motor de cálculo consistiu no desenvolvimento de um módulo que emula o funcionamento do programa radiométrico do *RADIANCE*, mas que na realidade actua como um programa mestre. Este programa, após a validação do contexto de cálculo radiométrico, lança em execução os programas escravos, um por cada máquina real incluída na máquina virtual de processamento. Cada programa escravo, após uma fase de configuração inicial, entra num ciclo de espera de comandos de cálculo radiométrico, os quais lhe serão eventualmente comunicados pelo programa mestre. Nessa altura, o programa escravo prepara os dados e invoca localmente o programa radiométrico do *RADIANCE* para executar a tarefa atribuída. Quando esta estiver terminada, o programa escravo recolhe e prepara os dados computados a fim de os comunicar de volta ao programa mestre, ficando logo de seguida pronto para mais uma tarefa. Na Fig. 53, o bloco designado "Mestre" representa o programa mestre,

[12] *PVM* - http://www.epm.ornl.gov/pvm/pvm_home.html

existindo em cada máquina presente na computação o programa escravo (bloco "E"), o programa radiométrico do *RADIANCE* e todos os dados necessários à realização dos cálculos.

A implementação baseada na versão mestre-escravo do motor de cálculo radiométrico, com recurso ao pacote *PVM* 3.4.2, foi testada num sistema de computação paralela de arquitectura *Beowulf*[13]. O sistema usado é constituído por 22 computadores PC (processador PIII-500MHz) com sistema operativo *Linux* 2.2 e interligados em rede privada a 100Mbps.

Para se aquilatar da capacidade de tal sistema, recorreu-se à síntese convencional de uma imagem com dimensões 354 linhas por 512 colunas, baseada na geometria descrita na secção 3.3 (Fig. 17), o que demorou 124.6s num só computador. Caso se empreguem todos os computadores com a versão paralela do motor de cálculo radiométrico, para valores de raios/tarefa entre 70 e 700 obtêm-se os tempos de cálculo mais curtos, da ordem dos 6.4s. Este tempo total de cálculo é cerca de 5.1% do tempo total de cálculo de apenas um computador, o que equivale a dizer que o sistema *Beowulf* de 22 computadores foi 19.5 vezes mais rápido a calcular os pixels da imagem. Os tempos de comunicação rondaram os 0.2s para valores de raios/tarefa entre 70 e 700 e nunca excederam os 0.7s. Tal permite dizer que o custo das comunicações é irrelevante.

5.4. SUMÁRIO

Neste capítulo descreveu-se uma proposta de algoritmo para implementar a metodologia de design de iluminação baseada em objectivos, enunciada no capítulo anterior. Esta proposta é analisada em termos das suas fases constituintes, dos dados envolvidos e dos recursos computacionais necessários.

Na parte final deste capítulo descreveu-se uma implementação efectuada com recurso a pacotes de *software* reputados, os quais foram usados como blocos construtivos. Relativamente a esta implementação, foram analisados detalhadamente os seus aspectos de complexidade e desempenho. O resultado dessa análise foi a definição de diversas técnicas de exploração da coerência dos dados processados, técnicas essas conducentes a acelerações de desempenho nos vários níveis de avaliação da função custo.

Algumas das técnicas de exploração da coerência são desenvolvimentos originais, particularmente ao nível das distribuições de importância em torno de pontos. A integração de todas essas técnicas também constituiu um valor acrescentado da implementação efectuada. Assinale-se ainda a integração de técnicas de paralelização para execução em máquinas virtuais, formadas por computadores heterogéneos ligados em rede.

[13] *Beowulf* - http://cluster.fe.up.pt/

6. AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo descrevem-se os aspectos técnicos da implementação efectuada, apresentando-se vários casos demonstrativos das potencialidades do algoritmo proposto e discutindo-se os resultados obtidos em termos qualitativos e quantitativos, com ênfase particular nos aspectos de desempenho e validade.

A implementação proposta foi aplicada a alguns problemas de design de iluminação com o objectivo de se avaliar o seu desempenho e identificar aspectos relevantes. Nesse sentido, foram produzidos registos pormenorizados das operações efectuadas e produzidos dados de saída diversificados, o que permitiu analisar qualitativamente as soluções encontradas e quantificar as características computacionais da implementação.

6.1. ASPECTOS TÉCNICOS DA IMPLEMENTAÇÃO

O ambiente de experimentação utilizado foi composto por dois computadores ligados em rede, com sistema operativo *Linux* (PC com processador P5-200MHz e 64MB-RAM; PC com processador AMD-K6/2-333MHz e 128MB-RAM). Esta configuração permite o funcionamento do *RADIANCE* em modo "paralelo", em que a cada plataforma pode ser atribuída uma tarefa específica de cálculo radiométrico. Porém, a diferença de desempenho das plataformas referidas limita a aplicabilidade da paralelização apenas a problemas de design de iluminação simples (nos quais o peso computacional dos cálculos radiométricos não seja muito elevado).

Dado que o algoritmo proposto necessita de efectuar grandes quantidades de cálculos de transporte de importância, foram empregues todos os mecanismos do *RADIANCE* que pudessem reduzir o peso computacional desses cálculos, mas sem se pôr em causa a validade radiométrica dos cálculos e dos resultados finais. Assim sendo, a nível da optimização do *RADIANCE*, foram utilizadas as seguintes técnicas de aceleração [Larson98]:

- Uso de *cache* de interreflexão difusa (Fig. 47), a qual é implementada através de ficheiros específicos.
- Uso do programa de cálculo radiométrico em modo "persistente". O programa é activado com todos os parâmetros necessários, ficando em seguida à espera de comandos de cálculo de importância passados através de ficheiros especiais. A principal vantagem reside no facto da leitura dos dados geométricos e dos materiais de superfície ser efectuada apenas uma vez, no início do ciclo de pesquisa. Em cenas cuja geometria possui mais do que alguns milhares de primitivas geométricas, os benefícios do uso do modo persistente são evidentes.

A *cache* de distribuições de importância (DI's, Fig. 51) foi implementada através de uma lista circular duplamente ligada. Quando o tamanho da *cache* se torna considerável, a determinação do conjunto de pontos mais próximos de um dado ponto através de pesquisa sequencial tende a ser ineficiente. Para evitar tal ineficiência, foi implementada uma técnica de pesquisa de pontos

vizinhos (*nearest neighbour search*) e de pontos dentro de uma região (*range search*) que permite obter esse conjunto com complexidade temporal $O(n \times \log n)$, sendo n o número total de pontos ou DI's [Samet90] [Skiena97b]. Outro aspecto que afecta a eficiência da *cache* é a presença de DI's que, tendo sido incluídas na *cache* nas fases iniciais da pesquisa, não sejam depois utilizadas para acelerar a determinação de DI's noutros pontos. Para reduzir essa potencial ineficiência, foi implementada uma técnica de remoção de DI's baseada na utilização durante as mais recentes N iterações, ie, uma política do tipo *LRU*[1].

A *cache* utilizada permitia armazenar 512 DI's, das quais apenas as 64 mais próximas eram pesquisadas para reutilização de importância previamente calculada. O limiar de remoção de DI's não-utilizadas foi definido como sendo 400 iterações. Todos estes valores foram obtidos após testes experimentais com casos de complexidade variável, sendo por isso valores médios de compromisso. As posições espaciais foram discretizadas em unidades de 5cm. O limiar de distância empregue (parâmetro T_{dist} da Fig. 49) variou entre 3.5 e 5cm. Nos Anexos apresenta-se uma gramática da linguagem utilizada na descrição de programas custo.

6.2. APRESENTAÇÃO DE CASOS

Os casos a seguir apresentados servem de exemplos de aplicação do algoritmo proposto, mas também permitem avaliar a implementação particular efectuada, nomeadamente as técnicas de aceleração de desempenho. Apesar dos resultados qualitativos serem independentes das ferramentas de suporte (pacotes *RADIANCE* e *ASA*) e das técnicas de aceleração implementadas, do ponto de vista quantitativo não é possível efectuar uma avaliação independente das referidas ferramentas, dado que se procurou tirar o máximo partido das funcionalidades que elas disponibilizam. Este aspecto é particularmente relevante na medição dos tempos de processamento, que para além do significado absoluto que possuem (do ponto de vista do utilizador é provavelmente o factor mais importante), também têm um significado relativo, função da potência de cálculo da plataforma usada e das ferramentas escolhidas. Nessa medida, apresentam-se os tempos de processamentos apenas relativos à plataforma PC AMD-K6/2-333MHz, o que permite comparações directas entre os vários casos.

O Caso 1 é um caso "teórico" que serve para apresentar resultados obtidos com as diferentes técnicas de aceleração de desempenho, de modo a aferir-se o desempenho individual de cada uma e o desempenho relativo de todas as técnicas. Sendo um caso simples, é possível prever a solução óptima de design de iluminação, o que facilita a avaliação dos resultados.

O Caso 2, igualmente um caso "teórico", permite compreender a relevância do papel desempenhado pela função custo, através do programa custo, e a necessidade desta ser devidamente formulada, dado que a qualidade dos resultados finais depende fundamentalmente do comportamento desta função.

No Caso 3, um caso "realista" simples, mostra-se em que medida o algoritmo proposto consegue abordar situações de design de iluminação em que existe uma iluminação prévia na cena e exploram-se vários tipos de objectivos de design derivados desse contexto.

O Caso 4, baseado no estudo real elaborado pelo *Institute for Research in Construction* do *National Research Council* do Canadá (IRC-NRC) e descrito na secção 3.3, permite aferir as possibilidades do algoritmo proposto quando aplicado a problemas reais, para os quais os especialistas não conseguem obter soluções satisfatórias consensuais. Dado ser um caso com dados de entrada realistas (geometria complicada, grande diversidade de materiais de superfície

[1] LRU – *least recently used.*

e objectivos de design de iluminação complexos), também serve para analisar aspectos quantitativos da implementação, permitindo-se assim a comparação com desempenhos obtidos em problemas simples (Caso 1).

Finalmente, o Caso 5 descreve um problema de design de iluminação baseado numa geometria de um espaço real, o qual, pela sua originalidade e pelo desafio que coloca às convenções arquitectónicas tradicionais, permite aferir da possibilidade de aplicação do algoritmo proposto a espaços "vanguardistas", nos quais a iluminação é totalmente realizada de formas indirectas, o que está fora de alcance dos métodos empíricos de design de iluminação.

6.2.1. Caso 1

Este problema permite analisar os efeitos das diversas técnicas aplicadas à implementação baseada no *ASA* e no *RADIANCE*. Para testar o comportamento das diversas técnicas de aceleração, foi usada uma cena simples, composta por uma sala fechada (chão, tecto e quatro paredes) e um tampo à altura do plano de trabalho, localizado perto de um dos cantos da sala. Os materiais de superfície são do tipo plástico (segundo a nomenclatura do *RADIANCE*, essencialmente difusos mas com um pequeno componente especular).

O objectivo de design de iluminação era determinar a posição (junto ao tecto) e orientação de uma luminária do tipo foco (ângulo sólido 120°), de modo a maximizar a iluminação no tampo. A pesquisa de soluções foi efectuada com 3 parâmetros posicionais e 2 direccionais; a gama de posições admitida englobava todo o tecto da sala e a orientação estava restringida para o chão. Os parâmetros posicionais foram discretizados em unidades de 5cm e os direccionais em unidades de 2°. Foi definido um objectivo radiométrico como fonte de importância (o tampo). A função custo utilizada calculava a importância recebida no ponto em análise e dentro do ângulo sólido associado.

Os ensaios realizados foram os seguintes:

- NAC – Pesquisa sem optimizações adicionais para além das incluídas no *RADIANCE*; em cada iteração de pesquisa realizam-se invariavelmente 1022 cálculos de importância elementar (raio), função do ângulo sólido predefinido.
- NAC/Fila – Semelhante ao anterior, mas com uma fila para armazenamento de DI's, o que permite obtê-las imediatamente caso já tenham sido computadas (evita repetições desnecessárias de cálculos de distribuições completas de importância, mas não reutiliza raios de importância).
- AC/T_{dist}=0.04 – Pesquisa com *cache* de importância (Fig. 50), sendo o limiar de distância da *cache* igual a 4cm.
- AC-Q/T_{dist}=0.04 – Semelhante ao anterior, mas usando *quenching* em vez de *annealing* no programa *ASA*, por forma a tentar atingir a solução final mais rapidamente (menos iterações).
- NAC-Q/Fila – Pesquisa com *quenching*, sem *cache* de importância e com uma fila para armazenamento de DI's.
- B_{22}-AC-Q/T_{dist}=0.04 – Semelhante a AC-Q/T_{dist}=0.04, mas usando o motor radiométrico mestre-escravo num sistema *Beowulf* de 22 computadores.

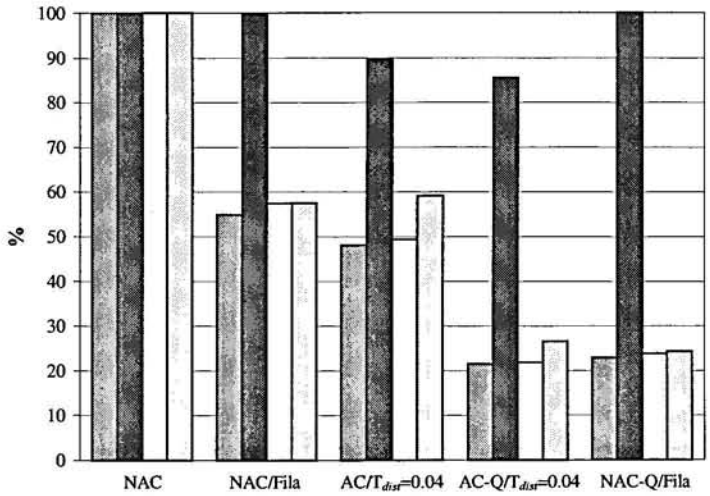
Na Tab. 4 apresentam-se alguns resultados de pesquisas de soluções para o contexto previamente referido. Cada tipo de pesquisa (ensaio) foi repetido várias vezes, tendo sido posteriormente efectuada a média dos resultados quantitativos referentes a desempenho. Do ponto de vista qualitativo, foi sempre obtida a solução "óptima", que era antecipadamente conhecida.

Nome do ensaio	Cálculos de importância	Cálculos de imp./iteração	Tempo de cálculo de imp.	Uso médio da *cache*	Tempo total
NAC	2060000	1022	782s	-	983s
NAC/Fila	1130000	1021	449s	-	565s
AC/T_{dist}=0.04	991000	915	386s	18.5	581s
AC-Q/T_{dist}=0.04	**443000**	**873**	**171s**	18.7	261s
NAC-Q/Fila	471000	1022	186s	-	**239s**
B_{22}-AC-Q/T_{dist}=0.04	***443000***	***873***	***13s***	*18.7*	***22s***

Tab. 4 – Tabela de ensaios

Da análise da Tab. 4 ressalta que o ensaio mais rápido (em média) foi o NAC-Q/Fila, ie, uma pesquisa baseada em *quenching* e com uma fila simples. No entanto, se for ignorado o "Tempo total", o ensaio que apresenta melhores resultados é o AC-Q/T_{dist}=0.04, como seria de esperar. O ensaio AC/T_{dist}=0.04 também apresenta resultados interessantes, mas o facto de se usar *annealing* tem o seu preço. Porém, apenas o *annealing* dá garantias de obtenção de soluções "óptimas", o que é um aspecto a ter em conta. Quando se utiliza um sistema de computação *Beowulf* com 22 computadores, o desempenho é cerca de 10.9 vezes mais rápido.

A Fig. 54 apresenta os resultados da Tab. 4 através de gráficos de barras verticais e permite notar os benefícios da exploração de coerência da importância e do *quenching* (colunas AC-Q/T_{dist}=0.04).



Colunas: Cálculos de importância (esquerda)
Cálculos de importância/iteração
Tempo de cálculo de importância
Tempo total (direita)

Fig. 54 – Gráficos de ensaios

Uma das razões porque a *cache* de importância parece ter poucos efeitos na redução do tempo total de pesquisa deve-se ao facto da cena ser muito simples e, por conseguinte, os cálculos radiométricos serem demasiado rápidos para se notarem os benefícios dessa *cache*. Uma forma de evidenciar esses benefícios potenciais pode ser simulada escalando-se o valor da coluna "Tempo de cálculo de importância" relativamente ao "Tempo total", o que corresponde a simular que os cálculos radiométricos são mais lentos, situação que tenderá a acontecer em cenas de geometria mais complexa. Na Tab. 5 apresentam-se algumas simulações de desempenhos relativos, em que K=*N* significa que os cálculos radiométricos são *N* vezes mais lentos do que no caso correspondente da Tab. 4. A negrito assinala-se o melhor ensaio para cada valor de K.

Nome do ensaio	K=2	K=5	K=10	K=100	K=1000	K=∞
NAC	100%	100%	100%	100%	100%	100%
NAC/Fila	57.4%	57.4%	57.4%	57.4%	57.4%	57.4%
AC/T_{dist}=0.04	54.8%	51.7%	50.5%	49.5%	49.4%	49.3%
AC-Q/T_{dist}=0.04	24.5%	**23.0%**	**22.5%**	**22.0%**	**21.9%**	**21.9%**
NAC-Q/Fila	**24.1%**	23.9%	23.9%	23.8%	23.8%	23.8%

Tab. 5 – Tabela de simulação de desempenhos

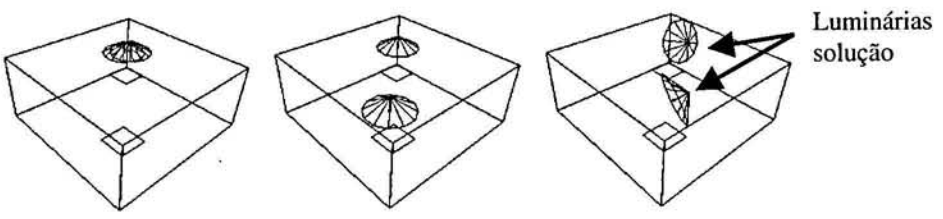
A análise da Tab. 5 permite concluir que os benefícios da *cache* de importância apenas se manifestam quando os cálculos de importância representam uma fatia significativa do tempo total de processamento, que foi a motivação para desenvolver a técnica de *cache* baseada na exploração da coerência de importância.

Extrapolando para problemas de design de iluminação em que a geometria seja composta por mais do que uma dezena de milhar de primitivas geométricas e haja vários objectivos radiométricos, o desempenho relativo entre os diferentes ensaios estará algures entre valores de K superiores a 5 e inferiores a 100. No entanto, estes valores dependem de factores externos relacionados com a plataforma (características de E/S de ficheiros, memória física e virtual, etc), além de variarem em função do tipo de problema de design de iluminação.

6.2.2. Caso 2

Este problema evidencia a importância da função custo na obtenção de soluções credíveis, ie, soluções que tenham aplicabilidade prática. Esta noção de "aplicabilidade" tem de ser expressa de algum modo na função custo, tipicamente através de restrições adequadas, as quais se destinam a evitar soluções formalmente correctas, mas que não são úteis no mundo real. Além disso, evita-se o desperdício de recursos computacionais a pesquisar soluções indesejadas ou impraticáveis.

A geometria da cena é formada por uma sala paralelipipédica contendo dois polígonos representando tampos de secretária à altura convencional de trabalho. O objectivo do design de iluminação é determinar a localização de duas luminárias do tipo foco perto do tecto, orientadas para baixo, de modo a iluminar preferencialmente os tampos. O problema de design resultante possui dez parâmetros de pesquisa (três parâmetros de posição e dois de orientação por cada luminária, assumindo-se fixo o ângulo de emissão). Para modelar o objectivo de iluminar adequadamente os tampos de secretária, ambos os tampos foram considerados fontes de importância com a mesma emissão hemisférica (apenas para cima). O espaço da cena foi discretizado em unidades de 5cm e os ângulos em unidades de 2°. A Fig. 55 apresenta três soluções diferentes, correspondentes a três funções custo particulares (cada luminária solução é representada por um cone e uma pequena flecha localizados no ponto determinado).



a) Solução "inútil" b) Solução útil c) Solução com restrição

Fig. 55 – Soluções de localização de luminárias do tipo foco

Solução a)

Esta solução (Fig. 55a) foi obtida com uma função custo simples.

```
# (x1, x2, x3), (x6, x7, x8): posições - (x4, x5), (x9, x10): direcções
z1 = getz[dir(x4, x5)]; z2 = getz[dir(x9, x10)]
wIL1/DL1 = importance(sceneIL1, x1, x2, x3, x4, x5, z1, 60)
wIL2/DL1 = importance(sceneIL2, x1, x2, x3, x4, x5, z1, 60)
wIL1/DL2 = importance(sceneIL1, x6, x7, x8, x9, x10, z2, 60)
wIL2/DL2 = importance(sceneIL2, x6, x7, x8, x9, x10, z2, 60)
RETURN -(wIL1/DL1 + wIL1/DL2 + wIL2/DL1 + wIL2/DL2)
```

Fig. 56 – Programa custo associado à Fig. 55a

Dado que não se restringiu a localização relativa de uma luminária em relação à outra, a pesquisa produziu uma solução em que ambas se localizam por cima do mesmo tampo, o que não é uma solução correcta em termos dos objectivos abstractos anteriormente formulados. Este "bom senso" de natureza prática tem de ser incorporado na função custo, a fim de se concentrar a pesquisa em soluções realmente aplicáveis.

Solução b)

A solução obtida (Fig. 55b) está de acordo com a solução empírica esperada. Para obter soluções deste tipo, foi necessário introduzir na função custo um factor de penalidade ou restrição de parâmetros posicionais semelhantes (ie, luminárias próximas). Este objectivo de ordem prática pode ser atingido de várias formas:

- Penalizar as soluções cujas contribuições da mesma fonte de importância sejam semelhantes.
- Penalizar as soluções em que os parâmetros posicionais de cada luminária sejam semelhantes.
- Restringir cada luminária a um volume por cima de cada tampo.

O programa custo da Fig. 57 corresponde à função custo com penalização de contribuições de importância semelhantes.

```
# (x1, x2, x3), (x6, x7, x8): posições - (x4, x5), (x9, x10): direcções
z1 = getz[dir(x4, x5)]; z2 = getz[dir(x9, x10)]
wIL1/DL1 = importance(sceneIL1, x1, x2, x3, x4, x5, z1, 60)
wIL2/DL1 = importance(sceneIL2, x1, x2, x3, x4, x5, z1, 60)
wIL1/DL2 = importance(sceneIL1, x6, x7, x8, x9, x10, z2, 60)
wIL2/DL2 = importance(sceneIL2, x6, x7, x8, x9, x10, z2, 60)
dif1 = abs(wIL1/DL1 - wIL1/DL2)
dif2 = abs(wIL2/DL1 - wIL2/DL2)
RETURN -dif1 × dif2
```

Fig. 57 – Programa custo associado à Fig. 55b

Solução c)

Esta solução (Fig. 55c) satisfaz o problema original acrescido de uma restrição adicional: os focos não podem estar directamente orientados para os tampos. Esta restrição é um objectivo não-radiométrico incluído na função custo e dificulta a pesquisa de soluções, dado que muitas configurações de parâmetros são ignoradas por não verificarem a restrição (rejeição de

configurações através de valor muito elevado de custo). Esta restrição é um exemplo de objectivo que não pode ser definido através das gamas de variações dos parâmetros, pelo que resta apenas a sua verificação durante o processo de pesquisa.

A função custo usada para solucionar este problema é descrita pela Fig. 58. Note-se a presença de instruções que codificam a restrição direccional no início do programa custo, por forma a evitarem-se cálculos de importância desnecessários.

Em termos de desempenho computacional, as três variantes do problema consomem aproximadamente os mesmos recursos, o que se explica pelo facto dos cálculos radiométricos serem simples (geometria com poucos objectos e sem obstruções de visibilidade). No problema associado ao programa custo da Fig. 58, a convergência é mais lenta devido ao mecanismo de rejeição de configurações presente na função custo.

```
# (x1, x2, x3), (x6, x7, x8): posições - (x4, x5), (x9, x10): direcções
# (il1x, il1y, il1z), (il2x, il2y, il2z): centros dos tampos
il1x = -1.5; il1y = -1.5; il1z = 0.8; il2x = 1.5; il2y = 1.5; il2z = 0.8
vl1 = [dir(x4, x5)]; vl2 = [dir(x9, x10)]
v = [(il1x – x1, il1y – x2, il1z – x3)]
IF (angle[v, vl1] < radian(45)) RETURN HUGE
v = [(il1x – x6, il1y – x7, il1z – x8)]
IF (angle[v, vl2] < radian(45)) RETURN HUGE
v = [(il2x – x1, il2y – x2, il2z – x3)]
IF (angle[v, vl1] < radian(45)) RETURN HUGE
v = [(il2x – x6, il2y – x7, il2z – x8)]
IF (angle[v, vl2] < radian(45)) RETURN HUGE
wIL1/DL1 = importance(sceneIL1, x1, x2, x3, x4, x5, getz[vl1], 60)
wIL2/DL1 = importance(sceneIL2, x1, x2, x3, x4, x5, getz[vl1], 60)
wIL1/DL2 = importance(sceneIL1, x6, x7, x8, x9, x10, getz[vl2], 60)
wIL2/DL2 = importance(sceneIL2, x6, x7, x8, x9, x10, getz[vl2], 60)
dif1 = abs(wIL1/DL1 - wIL1/DL2)
dif2 = abs(wIL2/DL1 - wIL2/DL2)
RETURN -dif1 × dif2
```

Fig. 58 – Programa custo associado à Fig. 55c

A Tab. 6 apresenta os valores de desempenho médios na pesquisa de soluções para os problemas anteriormente descritos.

	NAC	AC/T_{dist}=0.05
Iterações efectuadas	5000	
Soluções encontradas	25	
Raios de importância usados	10000000	3500000
Redução de raios devida à *cache*		65%
Pontos repetidos na *cache*		4400
Pontos pesquisados na *cache*		15600
Pontos completados na *cache*		700
Pontos vizinhos usados		45
Tempo de processamento	85 minutos	45 minutos

Tab. 6 – Desempenho médio

Os benefícios da exploração da coerência no transporte de importância são significativos e permitem reduções de tempo de processamento da ordem dos 50%. Em pesquisas de soluções com 20000 iterações a redução de raios devida à *cache* aumenta para cerca de 70% e o tempo de

processamento reduz-se para cerca de 45%. O limiar de distância empregue neste caso foi T_{dist}=0.05 (5cm). O uso médio de 45 pontos vizinhos na aceleração dos cálculos de importância permite concluir que a *cache* foi bem utilizada.

6.2.3. Caso 3

Este problema de geometria simples serve para ilustrar a flexibilidade da metodologia proposta quando existe iluminação prévia. A Fig. 59 mostra que existe um tampo de secretária perto do centro da cena à altura do plano de trabalho e uma luminária hemisférica junto ao tecto e na parte central superiora de uma parede. O objectivo qualitativo é iluminar devidamente o tampo através da colocação de uma ou mais luminárias na parede oposta àquela em que se situa a luminária prévia.

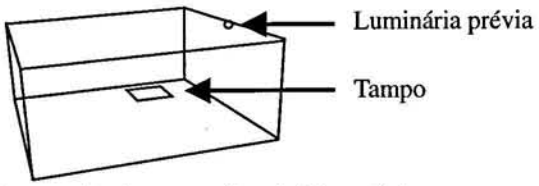
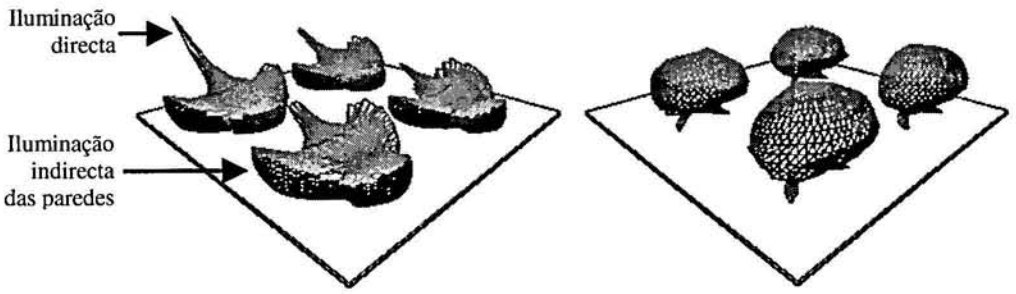


Fig. 59 – Geometria da cena e luminária prévia

Devido à existência da luminária prévia, é necessário determinar os seus efeitos no tampo e incorporar esses efeitos na definição de uma fonte de importância apropriada para determinar as características das luminárias pretendidas (posição e orientação, assumindo-se do tipo pontual hemisférico). Dado pretender-se iluminar o tampo, o procedimento a seguir é determinar distribuições de radiância no tampo e definir qual a importância final a emitir, descontando-se o efeito da radiância prévia. Supondo que a importância inicial a emitir pelo tampo é do tipo hemisférico, o resultado da subtracção da radiância prévia (afectada de um factor de escala definido pelo utilizador, Fig. 60a) gera as distribuições finais de importância a emitir (Fig. 60b).



a) Radiância prévia b) Importância final a emitir

Fig. 60 – Distribuições de radiância prévia e importância final

O factor de escala anteriormente referido permite controlar a influência que a luminária prévia exerce na satisfação dos objectivos de iluminação: um valor baixo reduz os efeitos de iluminação da luminária prévia, ao passo que um valor elevado aumenta a sua influência na cena.

Em objectos com dimensões relativas apreciáveis ou nos quais as distribuições de radiância apresentam variações significativas, como é o caso do tampo ilustrado na Fig. 60, recomenda-se a subdivisão do objecto emissor de importância por forma a representar melhor a referida

variação na distribuição de importância resultante. No caso de objectos poligonais, qualquer método de subdivisão que produza polígonos "filhos" convexos e com boas razões de aspecto[2] pode ser empregue. A Fig. 60 mostra quatro distribuições, o que significa que o tampo (quadrado) foi subdividido em quatro quadrados, possuindo cada um a sua própria distribuição de importância a emitir.

Os resultados da pesquisa dos cinco parâmetros de uma luminária do tipo foco (com um ângulo sólido de 120° e situada no semi-volume da cena oposto ao da luminária prévia) são mostrados na Fig. 61. Cada seta representa uma nova solução (melhor do que as anteriores), sendo apresentado na figura a evolução das sucessivas soluções. Foram usadas quatro fontes de importância com as distribuições da Fig. 60b, sendo a solução final correspondente a uma posição quase simétrica da luminária pretendida, em relação ao tampo e à luminária prévia.

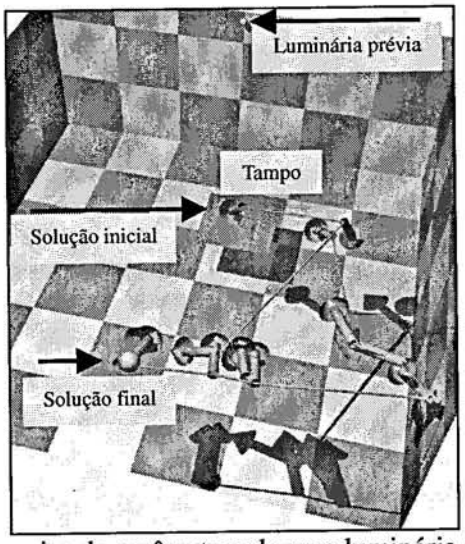


Fig. 61 – Pesquisa de parâmetros de uma luminária do tipo foco.

Para ilustrar a versatilidade da metodologia proposta, a geometria da Fig. 59 foi usada para analisar variantes do problema geral de complementar a iluminação do tampo, considerando duas luminárias com diversas restrições. Os dois cenários de pesquisa diferem essencialmente na função custo, nas gamas de variação e valores iniciais dos parâmetros de pesquisa. Em todos os cenários fixaram-se as seguintes condições:

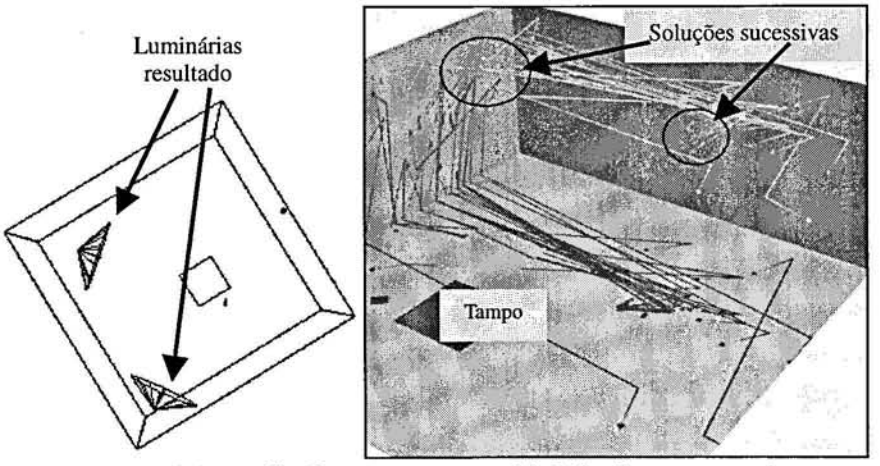
- Quatro fontes emissoras de importância (Fig. 60b).
- Dez parâmetros de pesquisa (cinco por luminária).
- Posições discretizadas em unidades de 5cm.
- Ângulos discretizados em unidades de 2°.
- Luminárias perto do tecto (acima de 2.4m, sendo a altura da sala 2.5m).
- Luminárias do tipo foco (ângulo sólido de emissão 120°).
- Posição de cada luminária restringida à metade do tecto oposta à luminária prévia.

Cenário 1

Foi imposto que as luminárias distassem entre si 1.5m, mantendo-se as restantes condições. Na Fig. 62a visualizam-se as luminárias obtidas e na Fig. 62b as sucessivas soluções encontradas durante o ciclo de pesquisa.

[2] As razões entre dois quaisquer comprimentos de lados serem próximas de 1.

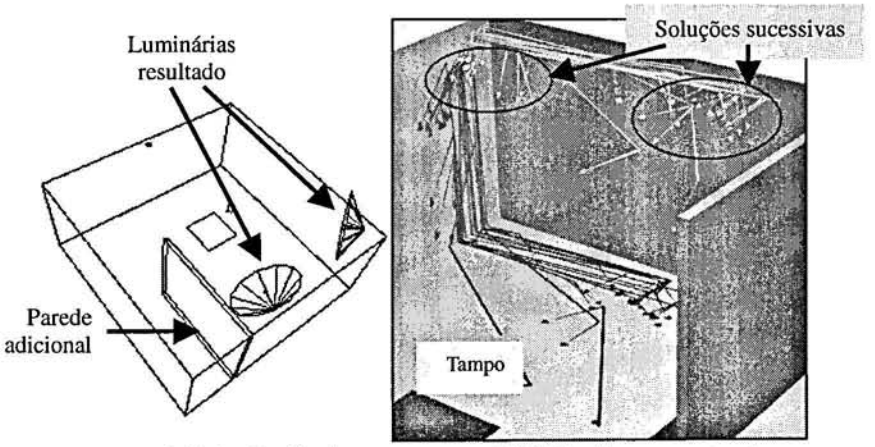
No entanto, o desempenho foi inferior ao obtido no cenário anterior, devido ao facto de o problema de optimização ter dez dimensões em vez de apenas cinco e também por se ter empregue um método de aceitação/recusa na definição das configurações de parâmetros (em cada iteração do ciclo de pesquisa verificava-se se a distância entre ambas era superior ao limiar de 1.5m; caso não fosse, rejeitava-se essa configuração). Dado que a distância mínima era cerca de 50% da dimensão horizontal do volume definido para a localização das luminárias, a taxa inicial de recusa de configurações aproximou-se desse valor, decaindo progressivamente no decurso do ciclo de pesquisa, à medida que a pesquisa se concentrou na região das melhores soluções.



a) Solução final b) Soluções encontradas

Fig. 62 – Resultados do cenário 1

Na Fig. 63 mostram-se os efeitos de se adicionar uma parede, o que dificulta a resolução do problema de design de iluminação. Mantiveram-se as gamas de posicionamento das luminárias, o que fez com que, em muitas configurações, uma das luminárias ficasse impossibilitada de iluminar directamente o tampo, facto devidamente contemplado através da função custo.



a) Solução final b) Soluções encontradas

Fig. 63 – Resultados do cenário 1 com parede adicional

De um ponto de vista qualitativo, as soluções obtidas são verosímeis e fisicamente aplicáveis.

Cenário 2

Neste cenário pesquisavam-se luminárias semelhantes às anteriores, mas orientadas para cima (sem alteração da orientação) e mantendo-se a restrição de distância mínima entre luminárias superior a 1.5m.

O problema de design passou a ter apenas seis dimensões (as três coordenadas espaciais de cada luminária, desaparecendo os parâmetros direccionais). No entanto, apesar de em termos de optimização global o problema ser "mais simples" (dado haver menor número de graus de liberdade do que no cenário anterior), do ponto de vista radiométrico este cenário é mais complexo. Esse aumento de complexidade deve-se ao facto da iluminação pretendida ser produzida principalmente através de reflexão difusa no tecto, pelo que a pesquisa de soluções vai originar cálculos radiométricos em que o transporte de importância também tem de passar por uma reflexão difusa de importância no tecto. Assim sendo, a pesquisa da solução deste cenário "resume-se" a determinar os pontos perto do tecto que possuem a melhor captação da importância emitida pelas quatro fontes de importância do tampo após reflexão difusa no tecto. A Fig. 64 mostra as luminárias resultado. Considerações geométricas simples permitem concluir que a solução encontrada é verosímil e aplicável.

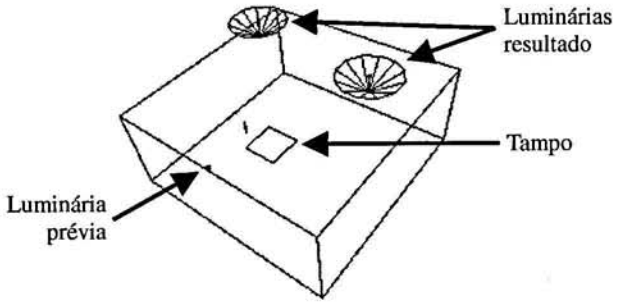


Fig. 64 – Resultados do Cenário 2

A existência da restrição de distância mínima entre as luminárias faz com que a localização final de cada luminária não seja a óptima em termos individuais. Aliás, caso não existisse nenhuma restrição entre os parâmetros de ambas as luminárias, o problema de design de iluminação deste cenário poderia ser decomposto em dois problemas de dimensão três. Em cada um desses subproblemas, determinar-se-ia apenas a localização de uma luminária, o que exigiria menos recursos computacionais simultâneos. No entanto, o tempo total de processamento seria aproximadamente o mesmo.

6.2.4. Caso 4

Este caso baseia-se no espaço interior usado nos estudos de iluminação do *Institute for Research in Construction* (IRC-NRC, secção 3.3). O IRC-NRC tem-se destacado pela quantidade e qualidade dos estudos relacionados com energia e iluminação, sobretudo porque envolve muitos designers na tentativa de compreender e definir o que são o design e a qualidade da iluminação.

A geometria foi previamente apresentada na Fig. 17, mostrando-se na Fig. 65 uma célula de trabalho das seis existentes: painéis verticais a quase toda a volta, uma secretária com tampo em

L (à altura do plano de trabalho[3]), um ecrã de computador, um armário sobre o tampo, gavetas em ambas as extremidades da secretária e mais alguns pequenos objectos sobre o tampo.

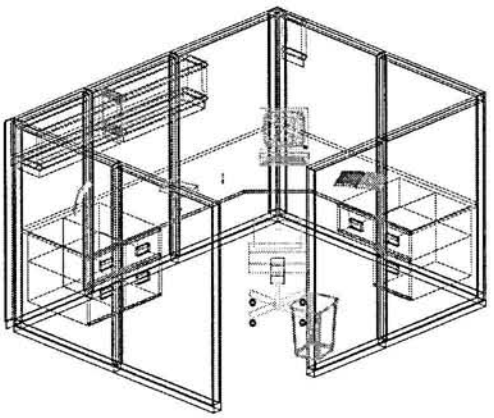


Fig. 65 – Geometria de uma célula de trabalho

A Fig. 66 é uma fotografia da sala de trabalho IRC-NRC com um esquema de iluminação empírico (5×13 luminárias embutidas no tecto).

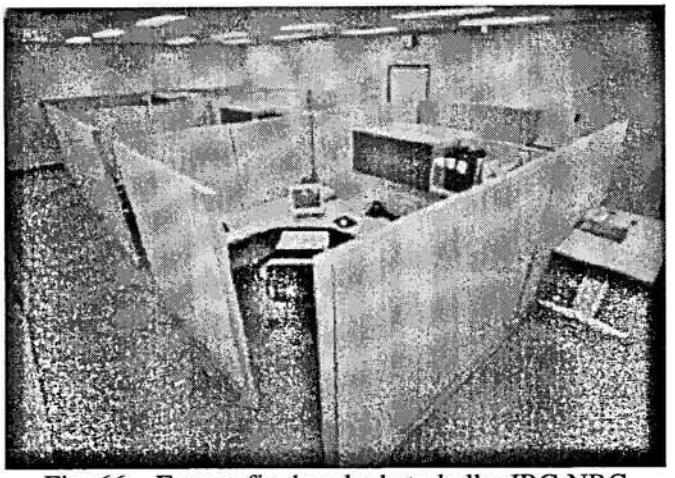


Fig. 66 – Fotografia da sala de trabalho IRC-NRC

Na Fig. 67 mostra-se uma imagem gerada pelo *RADIANCE* com a geometria previamente descrita e um esquema de iluminação composto por duas filas de cinco luminárias (arranjo 2×5), embutidas no tecto, sendo cada luminária composta por duas fontes de luz fluorescentes e revestida na face inferior por um material plástico translúcido, de modo a funcionar como um difusor. Na referida figura surgem também luminárias do tipo candeeiro, cujo objectivo é complementar a iluminação ambiente e gerar iluminação localizada para tarefas visuais de pormenor.

Tipicamente, os métodos empíricos baseados em fórmulas e equações dependentes das dimensões principais, de características médias dos materiais de superfície e de uma definição abstracta do tipo de espaço não levam em conta as especificidades geométricas, ópticas e estéticas, podendo resultar um desfasamento muito grande entre a iluminação produzida e a desejada, à qual o designer tem de dar uma resposta nem sempre fácil de encontrar.

[3] Superfície virtual a 0.8m de altura usada para a quantificação de tarefas visuais na posição sentada.

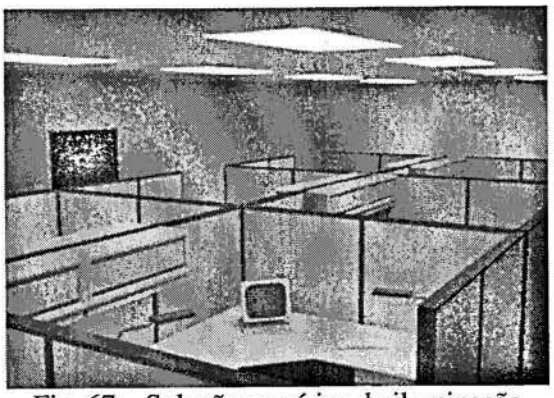


Fig. 67 – Solução empírica de iluminação

No caso em análise, a motivação subjacente às disposições em arranjo rectangular de luminárias perto do tecto é gerar iluminação horizontal homogénea no plano de trabalho. No entanto, a maior parte dos métodos empíricos não contempla o efeito de obstruções verticais, exceptuando-se [Lupton96], que incorpora um factor de correcção empírico dependente da altura dos painéis verticais ou outros objectos acima do plano de trabalho. Na geometria da Fig. 65 os painéis verticais atingem uma altura de 1.6m, ie, 0.8m acima do plano de trabalho. A existência de painéis e armários acima do plano de trabalho produz modificações da luminância e da iluminância no tampo das secretárias complicadas de prever. Na Fig. 68 visualizam-se algumas curvas de iso-iluminância [lux] em função de uma tomada de vista num dos cantos da sala (a cerca de 1.9m de altura).

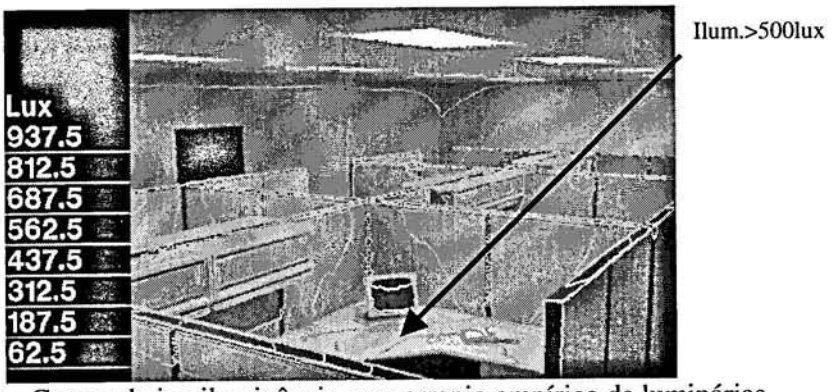


Fig. 68 – Curvas de iso-iluminância para arranjo empírico de luminárias

Uma solução de iluminação adequada para um espaço do tipo escritório com objectos especulares (ecrãs, espelhos, painéis de vidro, etc) deve ser obtida levando em conta os seguintes aspectos de design:

- Localização adequada das luminárias a fim de se gerar uma boa iluminação ambiente.
- Geração de níveis de iluminação adequados no plano de trabalho, em termos de iluminância (intensidade e homogeneidade).
- Redução de efeitos de carácter especular (reflexões de fontes de luz ou manchas intensas de luz em objectos especulares).
- Redução de efeitos de ofuscamento no campo visual (existência de direcções em que a radiância é muito mais elevada do que em direcções vizinhas).
- Reduções de contraste no plano de trabalho (transições abruptas de iluminância, fronteiras de sombra, etc).
- Escolha adequada de tipos de luminárias.

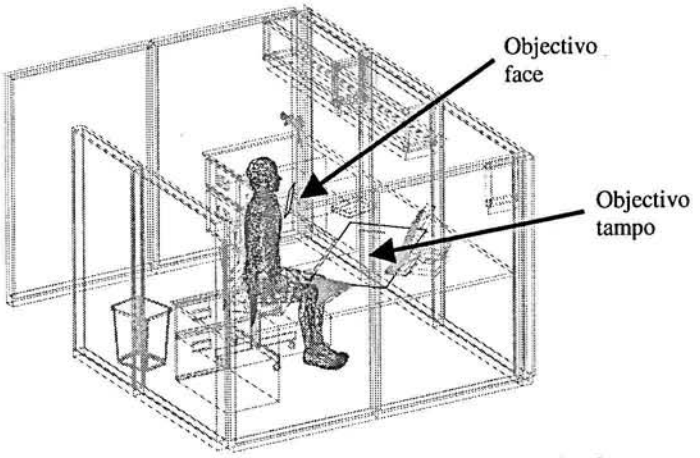


Fig. 69 – Objectivos de iluminação e fontes de importância

A inclusão de objectivos de design relacionados com os aspectos anteriormente referidos pode ser efectuada da seguinte forma (Secção 4.5.2):

- Maximização da iluminação nos tampos – Através de fontes de importância rectangulares sobre os tampos (objectivo tampo da Fig. 69).
- Minimização de ofuscamento e contraste excessivo – Através de fontes de importância rectangulares sobre as faces humanas em posição de trabalho sentado (objectivo face da Fig. 69).
- Localização de cada luminária – Através de restrições geométricas incluídas na função custo (volume de localização de cada luminária, etc).
- Localização das luminárias – Através de restrições geométricas incluídas na função custo (espaçamentos relativos, tipo de arranjo, etc).

A Fig. 70 representa uma "imagem" da distribuição de importância gerada pelas fontes de importância tampos e correspondente à tomada de vista anteriormente referida.

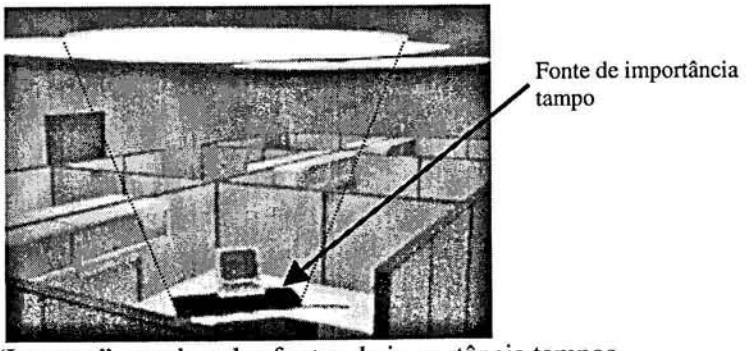


Fig. 70 – "Imagem" gerada pelas fontes de importância tampos

As fontes de importância tampos emitem com um ângulo sólido de 45°. As fontes de importância faces emitem com um ângulo sólido de 25°, a fim de representarem melhor o carácter direccional do ofuscamento. Em todos os cenários apresentados de seguida utilizou-se uma discretização espacial de 5cm e uma discretização angular de 2°.

Cenário 1

Neste cenário usaram-se luminárias do tipo esfera omnidireccional (luminárias globo). Esta escolha de luminárias de dimensões reduzidas é desaconselhada pelos regulamentos e normas de espaços do tipo escritório. As razões para tal devem-se à produção de muitas sombras no plano de trabalho e a uma susceptibilidade elevada para efeitos visuais perturbadores (ofuscamento,

etc). Os graus de liberdade do design foram traduzidos nos seguintes parâmetros de pesquisa (Fig. 71):

- x_1, y_1 – Posição perto do tecto da luminária mais à esquerda e da fila mais próxima do observador.
- x_2, y_2 – Posição perto do tecto da luminária mais à esquerda e da file mais distante do observador.
- d_{11}, d_{12} – Espaçamentos entre luminárias sucessivas na fila mais próxima.
- d_{21}, d_{22} – Espaçamentos entre luminárias sucessivas na fila mais distante.

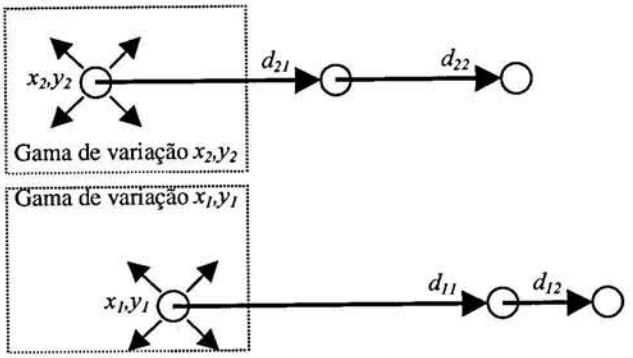


Fig. 71 – Relações entre parâmetros de pesquisa do cenário 1

Os objectivos radiométricos de design foram representados por fontes de importância nos tampos (maximizar os seus efeitos) e em faces (minimizar os seus efeitos). Dado pretender-se determinar as características de 6 luminárias, em cada iteração do ciclo de pesquisa efectuaram-se 12 cálculos de distribuição de importância em torno de 6 pontos (cada ponto representa a localização de uma luminária e tem de se avaliar separadamente a importância dos tampos e das faces, o que perfaz as mencionadas 12 distribuições de importância).

Os resultados obtidos permitem confirmar que, mesmo para a localização optimizada patente na Fig. 72, existem muitas fronteiras de luz e sombra no plano de trabalho, o que se deve essencialmente à dimensão reduzida das luminárias. Além disso, em luminárias afastadas do observador, a razão "radiância emitida pela luminária versus área projectada da luminária segundo a direcção de visão" tende a assumir valores significativamente altos, dando origem a efeitos de ofuscamento.

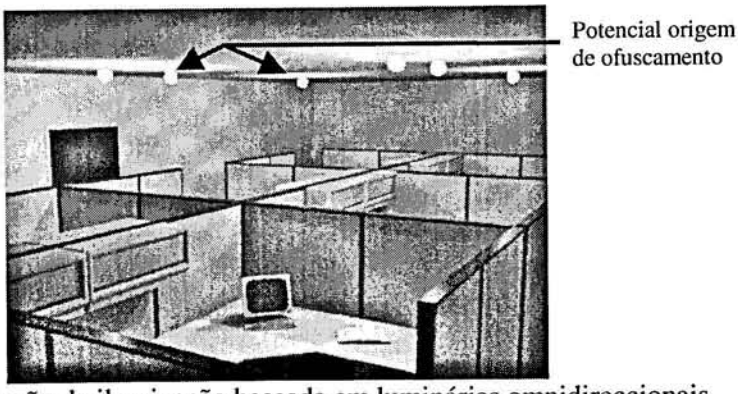


Fig. 72 – Solução de iluminação baseada em luminárias omnidireccionais

De um ponto de vista qualitativo, esta solução não serve porque a escolha prévia de luminárias é inadequada. No entanto, a solução obtida é quantitativamente correcta, o que mostra que o algoritmo proposto também pode ser usado para avaliar a qualidade de soluções de design de iluminação e julgar as escolhas prévias de design (neste cenário, o tipo de luminárias).

Cenário 2

Neste cenário optou-se por luminárias embutidas no tecto, com uma grande área de emissão e do tipo reflector difuso (luminárias iguais às da solução empírica da Fig. 67, com dimensões 0.8m×0.4m). Pretendeu-se determinar a localização junto ao tecto de 6 luminárias, sujeitas aos objectivos radiométricos modelados pelos tampos e pelas faces, e dispostas em arranjo 2×3. Dado que cada luminária não pode ser determinada adequadamente através de apenas um ponto em virtude da sua área, usaram-se duas distribuições de importância para realizar essa determinação, em pontos ao longo do eixo maior da luminária e perto das extremidades. Assim sendo, em cada iteração do ciclo de pesquisa efectuaram-se 24 cálculos de distribuição de importância em torno de pontos.

Foram usados os seguintes parâmetros de pesquisa (Fig. 73):

- x_1, y_1 – Posição perto do tecto da luminária mais à esquerda e mais próxima do observador.
- d_{11}, d_{12} – Espaçamentos entre luminárias sucessivas ao longo de uma fila.
- d_2 – Espaçamentos entre as duas filas.

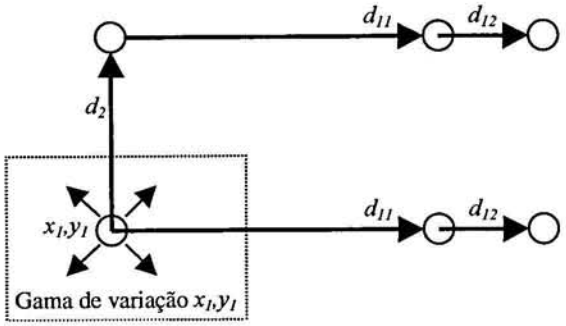


Fig. 73 – Relações entre parâmetros de pesquisa do cenário 2

A Tab. 7 apresenta o desempenho médio obtido na optimização das 6 luminárias referidas (sem recurso à técnica de aceleração descrita em 5.3.8).

NAC	
Iterações efectuadas	2000
Soluções encontradas	250
Tempo de processamento	8 horas

Tab. 7 – Desempenho médio sem aceleração

Na Tab. 8 apresenta-se o desempenho médio obtido com recurso à técnica de aceleração citada (limiar T_{dist} igual a 4cm).

Na Tab. 9 são visíveis os benefícios do uso do *quenching* em vez do *annealing* como método de optimização global. No entanto, num conjunto alargado de repetições da pesquisa para este cenário, somente em cerca de 60% dos casos se obteve a mesma solução "óptima" obtida através de *annealing*. Isto quer dizer que o esquema de redução da temperatura e das gamas de variação dos parâmetros do *quenching* também pode conduzir a pesquisa para regiões de extremos locais sem possibilidade de escape dessas regiões, impossibilitando a obtenção da solução "óptima". Esta possibilidade reforça ainda mais a necessidade de se repetirem sempre as pesquisas.

AC/T_{dist}=0.04	
Iterações efectuadas	2000
Soluções encontradas	229
Redução de raios devida à *cache*	57.6%
Pontos repetidos na *cache*	24902
Pontos pesquisados na *cache*	23505
Pontos vizinhos usados	12
Tempo de processamento	3.2 horas

Tab. 8 – Desempenho médio com aceleração via *cache* de importância

Esta falha de convergência é mais provável em problemas cuja função custo é complexa, o que se pode dever a geometrias complexas, materiais de superfície com componente especular significativo, objectivos radiométricos de acção contrária, instruções de restrição no programa custo, etc. A resultante da interacção destes factores é uma hiper-superfície pouco "suave", ie, com muitos extremos locais envolvendo o extremo global, o que dificulta a localização da região óptima.

AC-Q/T_{dist}=0.04	
Iterações efectuadas	2000
Soluções encontradas	189
Redução de raios devida à *cache*	78.2%
Pontos repetidos na *cache*	35992
Pontos pesquisados na *cache*	11935
Pontos vizinhos usados	11
Tempo de processamento	1.8 horas

Tab. 9 – Desempenho médio com aceleração via *cache* de importância e *quenching*

A Tab. 10 mostra que os desempenhos melhoram consideravelmente quando se emprega a cache de importância e mais ainda se for usado *quenching* em vez de *annealing*. As relações entre tempos totais de processamento aproximam-se razoavelmente dos valores previamente apresentados na Tab. 5, referentes a um problema de design de iluminação bastante mais simples.

Quando se usa o sistema *Beowulf* de 22 computadores com um ensaio do tipo AC-Q/T_{dist}=0.04 (B_{22}-AC-Q/T_{dist}=0.04), o tempo total de cálculo passa de 1.8 horas para 19 minutos, 17% do tempo com apenas um computador, o que corresponde a uma aceleração próxima de 5.7 vezes.

Nome do ensaio	% Raios de importância	% Tempo total
NAC	100	100
AC/T_{dist}=0.04	42.4	39.1
AC-Q/T_{dist}=0.04	21.8	22.6
B_{22}-AC-Q/T_{dist}=0.04	21.8	4

Tab. 10 – Tabela de desempenhos (IRC-NRC)

A Fig. 74 mostra a evolução do valor máximo da função custo para um dos ensaios AC/T_{dist}=0.04 (semelhante nos outros ensaios AC/T_{dist}=0.04). Destaca-se o facto de serem atingidos valores muito próximos do máximo ainda antes das 500 iterações iniciais, o que pode indiciar um número exagerado de iterações por ensaio; uma alternativa poderia ser realizar mais ensaios com menos iterações por ensaio.

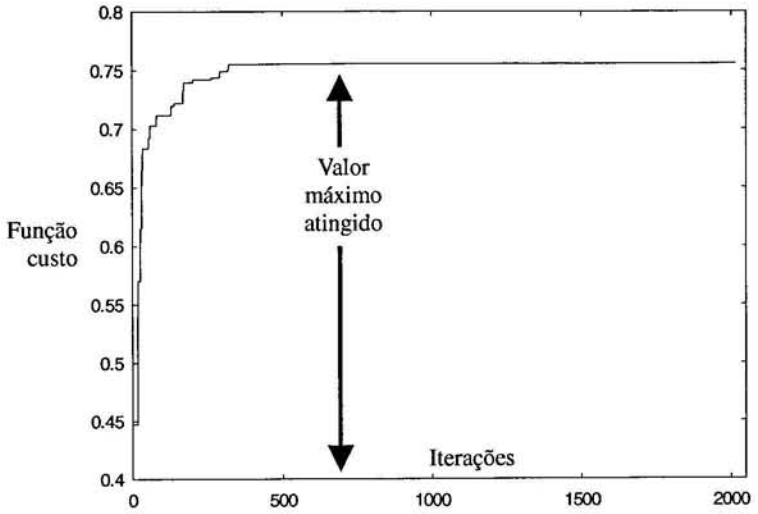


Fig. 74 – Evolução do valor máximo da função custo por iteração

Na Fig. 75 mostra-se a evolução dos valores "óptimos" dos parâmetros num dos ensaios AC/T_{dist}=0.04. Constata-se novamente que os valores quasi-óptimos dos parâmetros são alcançados antes das 500 iterações, diferindo muito pouco dos valores finais.

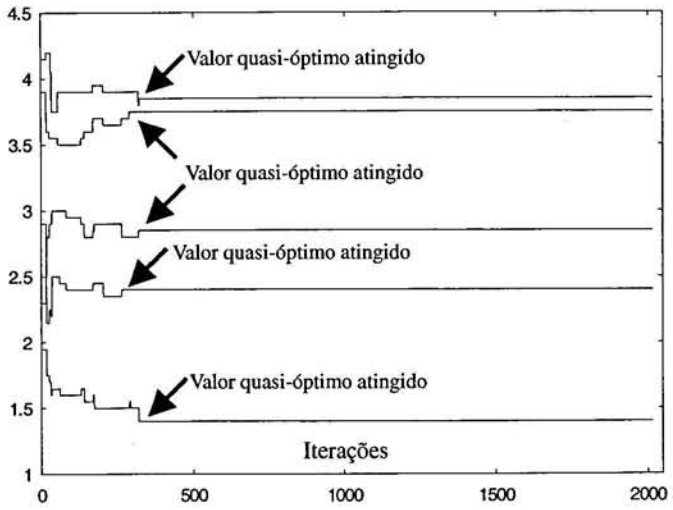


Fig. 75 – Evolução dos valores "óptimos" dos parâmetros por iteração

Nas Fig. 76 e Fig. 77 o eixo horizontal representa as sucessivas distribuições de importância calculadas devido a uma das duas fontes de importância (num total de cerca de 24000: 2000 iterações × 1 fonte de importância × 6 luminárias a determinar × 2 amostras por luminária).

A Fig. 76, relativa a um dos ensaios AC/T_{dist}=0.04, mostra que a utilização da *cache* de importância estabilizou em média perto dos 12 pontos vizinhos, ie, aquando do cálculo de uma nova distribuição de radiância em torno de um ponto, foram usados em média 12 pontos vizinhos próximos para obter directamente raios de importância necessários à nova distribuição.

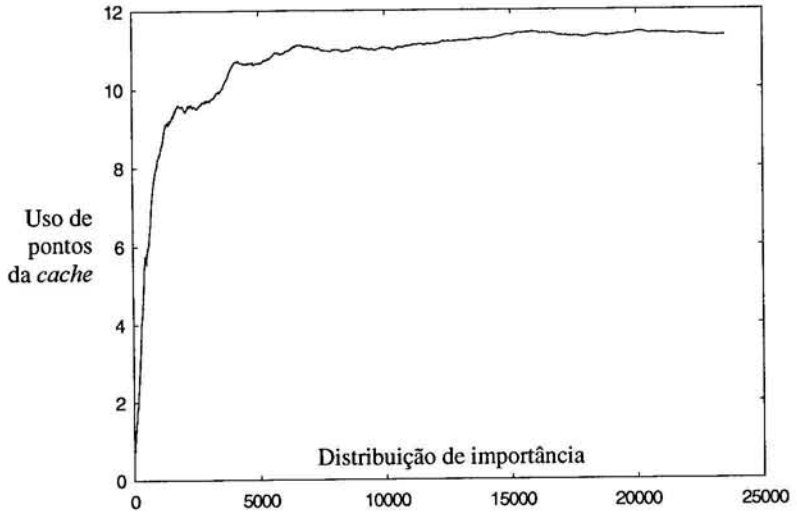


Fig. 76 – Evolução do nº médio de pontos vizinhos usados no cálculo de importância

A Fig. 77 permite constatar que o número médio de cálculo de raios de importância por distribuição de importância baixou progressivamente até ao valor 1754, o que representa um claro benefício em relação aos 2009 raios por distribuição quando não se emprega a *cache* de importância.

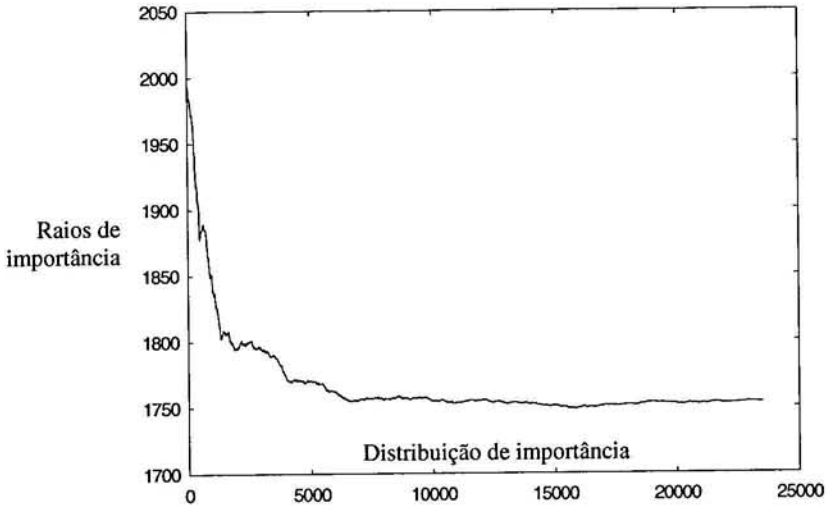


Fig. 77 – Evolução do nº médio de cálculos de importância elementar

A Fig. 78 apresenta uma imagem gerada com as luminárias finais, correspondente à solução do problema de design de iluminação, conforme foi especificado no início desta secção. Como seria de esperar, as luminárias ficaram na vertical dos tampos de trabalho, posição na qual o risco de ofuscamento e de reflexões de luminárias nos ecrãs é quase inexistente.

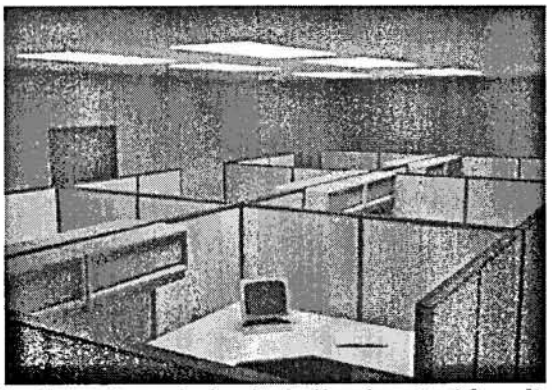


Fig. 78 – Solução optimizada de iluminação (*downlighting*)

A fim de se analisar quantitativamente a solução de design obtida, a Fig. 79 mostra uma imagem com curvas de iso-iluminância. Pode constatar-se que os níveis de iluminância nos tampos junto ao computador estão dentro das gamas recomendadas (aproximadamente 500lux), não se notando transições bruscas de iluminância ou sombra perturbadoras.

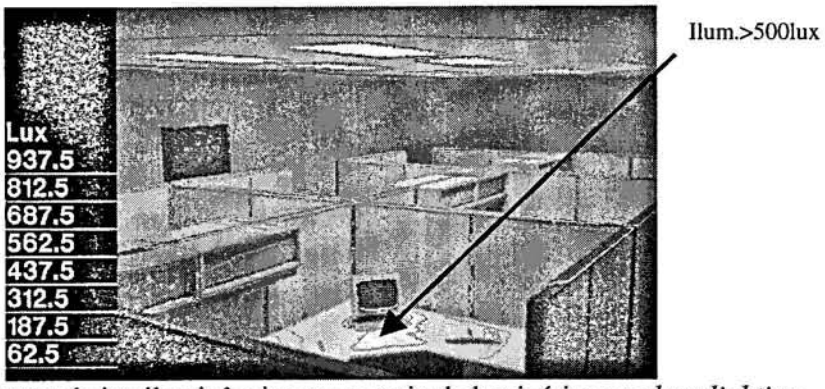


Fig. 79 – Curvas de iso-iluminância para arranjo de luminárias em *downlighting*

Na Fig. 80 apresenta-se uma solução optimizada alternativa para o mesmo problema, mas em que a altura das luminárias foi predefinida a 2.2m de altura e com orientação para o tecto (*uplighting*). Este cenário é mais exigente do ponto de vista computacional, dado que a luz só atinge o plano de trabalho junto ao computador após uma reflexão difusa no tecto, nunca através de iluminação directa. Por esse motivo, a simulação do transporte obriga à definição de parâmetros do *RADIANCE* bastante mais exigentes, a fim de se capturar convenientemente, no mínimo, as reflexões difusas de nível um (tecto) e nível dois (paredes, painéis, etc). Em média, um ensaio do tipo $AC/T_{dist}=0.04$ para *uplighting* demora mais 60% a completar do que um ensaio $AC/T_{dist}=0.04$ para *downlighting*.

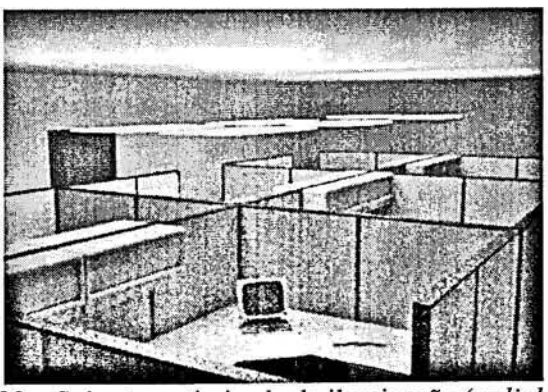


Fig. 80 – Solução optimizada de iluminação (*uplighting*)

Na Fig. 81 visualizam-se as curvas de iso-iluminância, sendo de realçar que a localização das luminárias, embora afastadas da vertical do tampo de trabalho junto ao computador, permite iluminar adequadamente os tampos de trabalho. O facto de estarem mais próximas do eixo maior da sala permite que iluminem mais do que um tampo, o que também é vantajoso.

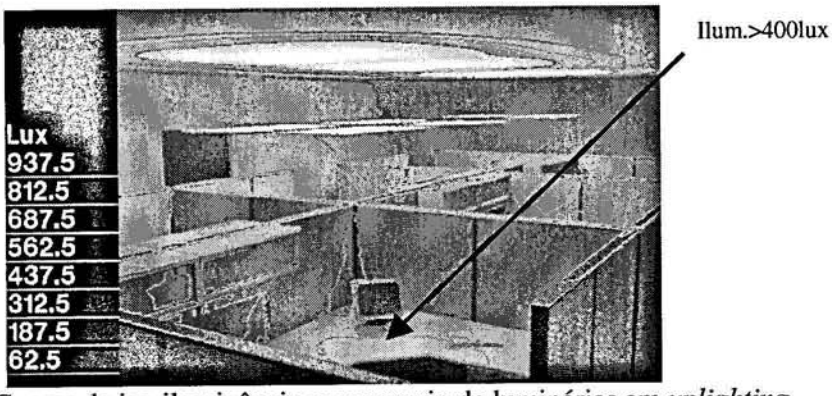
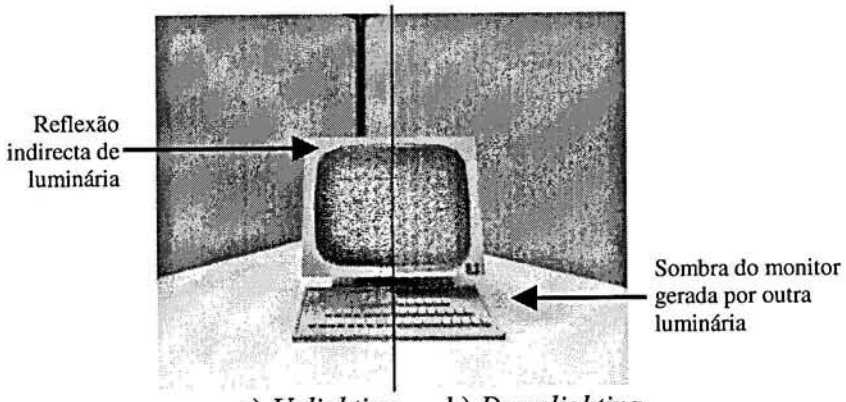


Fig. 81 – Curvas de iso-iluminância para arranjo de luminárias em *uplighting*

A Fig. 82 é uma composição de imagens obtidas de uma tomada de vista em posição sentada, olhando directamente para o ecrã. A imagem da Fig. 82a corresponde à solução de luminárias em *uplighting*, sendo a imagem da Fig. 82b da solução de *downlighting*. Da comparação podem extrair-se as seguintes conclusões:

- A iluminação nos tampos parece homogénea, embora na Fig. 82b se note a sombra projectada pelo monitor no tampo e causada por uma luminária de outra célula de trabalho (efeito de iluminação directa).
- A iluminação nos painéis verticais parece não ter transições bruscas, potencialmente geradoras de perturbação visual.
- Não se apercebe qualquer tipo de ofuscamento ou contraste excessivo.
- Notam-se sombras nas teclas e na parte inferior do ecrã (Fig. 82b) devidas à iluminação directa gerada pela luminária localizada por cima. Contudo, essas sombras não têm influência visual significativa.



a) *Uplighting* b) *Downlighting*

Fig. 82 – Composição de soluções optimizadas

De um ponto de vista qualitativo, as soluções apresentadas na Fig. 78 e Fig. 80 são aceitáveis e aplicáveis porque satisfazem os objectivos de iluminar "adequadamente" os tampos das secretárias e evitar perturbações visuais. A justificação desta afirmação baseia-se nas análises quantitativas com validade física garantida proporcionadas pelo algoritmo proposto. Nessa medida, a decisão final do designer pode concentrar-se na avaliação dos factores qualitativos do

design e deixar o cálculo dos elementos numéricos da iluminação a cargo de ferramentas computacionais do tipo daquela que se descreve neste trabalho.

Cenário 3

Este cenário é semelhante ao anterior, luminárias embutidas no tecto, mas pretendeu-se determinar a localização das 6 luminárias, sujeitas aos mesmos objectivos radiométricos, usando outras restrições. Como no cenário anterior, em cada iteração do ciclo de pesquisa efectuaram-se 24 cálculos de distribuição de importância em torno de pontos.

Em vez do arranjo anterior em grelha, definiram-se os parâmetros de pesquisa sem impor relações geométricas entre as coordenadas das luminárias pretendidas, mas tão somente através de gamas apropriadas de variação dos parâmetros (Fig. 83):

- x_1, y_1 – Posição perto do tecto da luminária mais à esquerda e mais próxima do observador.
- x_2, y_2; x_3, y_3; x_4, y_4; x_5, y_5; x_6, y_6 – Posição perto do tecto das restantes luminárias.

A consequência de não existirem restrições entre as entidades do design é um aumento dos graus de liberdade na exploração do problema – neste cenário existem 12 parâmetros a optimizar, em vez dos 5 anteriores. No entanto, atendendo à disposição geométrica das fontes de importância e de alguns objectos luminotecnicamente mais significativos (sobretudo os painéis verticais), é de esperar que a solução deste cenário seja semelhante à do cenário 2.

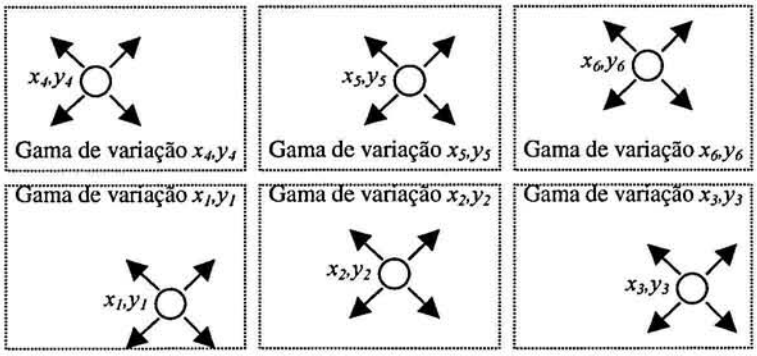


Fig. 83 – Relações entre parâmetros de pesquisa do cenário 3

Na coluna central da Tab. 11 apresenta-se o desempenho médio obtido com recurso à técnica de aceleração de *cache* de importância e *quenching* (limiar T_{dist} igual a 4cm) para este cenário. Na coluna da direita mostram-se os dados de desempenho médio obtido para o cenário anterior, em condições de pesquisa idênticas.

AC-Q/T_{dist}=0.04	N=12	N=5 (cenário 2)
Iterações efectuadas	2000	2000
Soluções encontradas	60	189
Uso da *cache*		
Pontos repetidos na *cache*	33054	35992
Pontos pesquisados na *cache*	15281	11935
Pontos vizinhos usados	10	11
Tempo de processamento	2.2 horas	1.8 horas

Tab. 11 – Comparação de desempenhos médios dos cenários 2 e 3

A análise da Tab. 11 mostra que a pesquisa com 5 parâmetros é mais rápida e eficiente, como seria de esperar. Devido ao "arranjo ordenado" dos elementos mais influentes no design de

iluminação (tampos e painéis verticais), as soluções tendem a organizar-se por forma a reflectir essa regularidade. A Tab. 12 mostra que as soluções, em ambos os casos, são qualitativamente semelhantes.

Cenário	Posições finais das luminárias pretendidas					
	Lum. 1	Lum. 2	Lum. 3	Lum. 4	Lum. 5	Lum. 6
Cenário 2	3.7,2.3	6.2,2.3	7.95,2.3	3.7,3.85	6.2,3.85	7.95,3.85
Cenário 3	3.75,2.5	6.55,2.35	8,2.45	3.75,3.9	6.55,3.85	8.05,3.9

Tab. 12 – Comparação de soluções dos cenários 2 e 3

Em jeito de conclusão, a semelhança das soluções referidas evidencia a necessidade de uma análise inicial do contexto do problema, no sentido de detectar "características intrínsecas" que possam ser usadas para influenciar qualitativamente a pesquisa de soluções. A introdução dessas propriedades nos dados de entrada, através de parâmetros e restrições adequadas, poderá conduzir a ciclos de design mais rápidos e eficientes. De qualquer modo, a decisão de usar ou não estas características subjacentes ao problema é sempre do designer, pelo que a sua margem criativa não é diminuída.

Cenário 4

Neste cenário de luminárias embutidas no tecto, semelhantes às do cenário anterior, pretendeu-se determinar a localização junto ao tecto de 5 luminárias, sujeitas aos objectivos radiométricos modelados pelos tampos e pelas faces, e dispostas em fila. Em cada iteração do ciclo de pesquisa efectuaram-se 20 cálculos de distribuição de importância em torno de pontos.

Foram usados os seguintes parâmetros de pesquisa (Fig. 84):

- x_1, y_1 – Posição perto do tecto da luminária mais próxima do observador.
- $d_{11}, d_{12}, d_{13}, d_{14}$ – Espaçamentos entre luminárias sucessivas ao longo da fila.

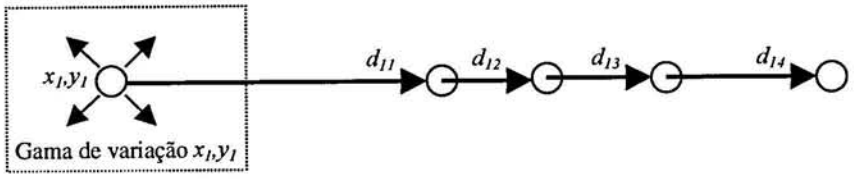


Fig. 84 – Relações entre parâmetros de pesquisa do cenário 4

Na Fig. 85 apresenta-se uma imagem gerada com as luminárias finais, correspondente à solução do problema de design de iluminação com luminárias em fila única.

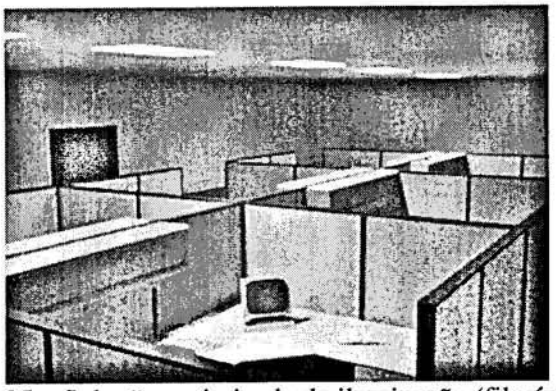


Fig. 85 – Solução optimizada de iluminação (fila única)

Como seria de esperar, as luminárias ficaram na vertical dos painéis situados no eixo maior da sala, a meio dos tampos de trabalho, posição na qual a iluminação das tampos é maximizada e o risco de ofuscamento e de reflexões de luminárias nos ecrãs é quase inexistente.

Na Fig. 86 visualizam-se as curvas de iso-iluminância. A localização das luminárias, apesar de centradas no eixo maior da sala, permite a iluminação adequada dos tampos de trabalho. Neste cenário, a partilha da iluminação directa de cada luminária é essencial para se atingirem os melhores resultados.

Fig. 86 – Curvas de iso-iluminância para arranjo de luminárias em fila única

Em termos de qualidade do design de iluminação, a solução apresentada na Fig. 85 respeita os objectivos predefinidos e parece realmente aplicável. A fim de melhorar os níveis quantitativos de iluminação, visto estar-se em presença de menos luminárias do que nos cenários anteriores, poderia aumentar-se a emissão das luminárias (por exemplo, duplicando o seu valor de lúmens) sem qualquer influência qualitativa na solução encontrada. Esta flexibilidade adicional de design deve-se ao facto do transporte da luz ser um fenómeno linear.

6.2.5. Caso 5

Este problema de design de iluminação tem por objectivo definir a iluminação ambiente de um espaço do tipo *hall*, inspirado por um espaço real[4].

Os aspectos mais interessantes da sua geometria são as paredes verticais curvas e o tecto bastante alto, formado por dois planos inclinados em cunha; no espaço real, as paredes junto ao tecto possuem pequenas aberturas que permitem a entrada de iluminação natural, embora existam plataformas horizontais muito elevadas que podem ser usadas para colocação de luminárias destinadas a gerar iluminação ambiente. Os materiais são essencialmente difusos, embora não totalmente.

No espaço real, o resultado desta combinação dos factores arquitectónicas, estéticos e luminotécnicos é a obtenção de uma iluminação indirecta muito suave, em que a presença de sombras e variações bruscas de contraste é muito reduzida. A Fig. 87 mostra uma representação da geometria do espaço do tipo *hall*.

[4] *Hall* existente na Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto.

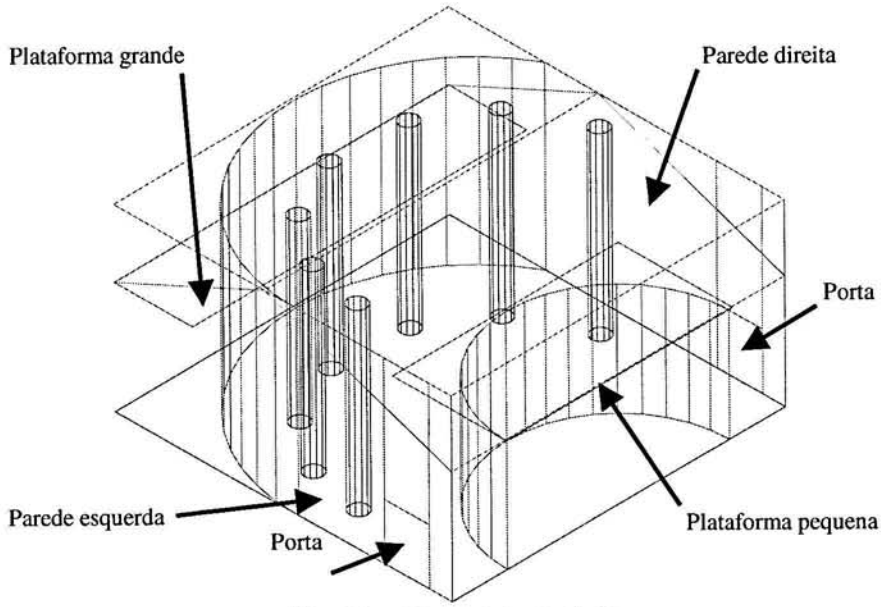


Fig. 87 – Geometria de *hall*

Este é um exemplo interessante de um problema de design de iluminação baseado numa geometria que, pela sua originalidade e pelo desafio que coloca às convenções arquitectónicas tradicionais, permite avaliar a aplicação do algoritmo proposto a espaços "vanguardistas" iluminados de formas totalmente indirectas. A análise de problemas de design de iluminação com espaços formados por geometrias não-paralelipipédicas e iluminação predominantemente indirecta está fora de alcance dos métodos empíricos de design de iluminação, cujas premissas são precisamente a existência de uma geometria paralelipipédica, iluminação essencialmente directa e espaços desobstruídos.

Na impossibilidade de aplicar os métodos empíricos neste tipo de espaços, as alternativas são os métodos de projecto analógico (secção 3.2.1) e os métodos computacionais (secção 3.2.3), de que o algoritmo proposto é um exemplo.

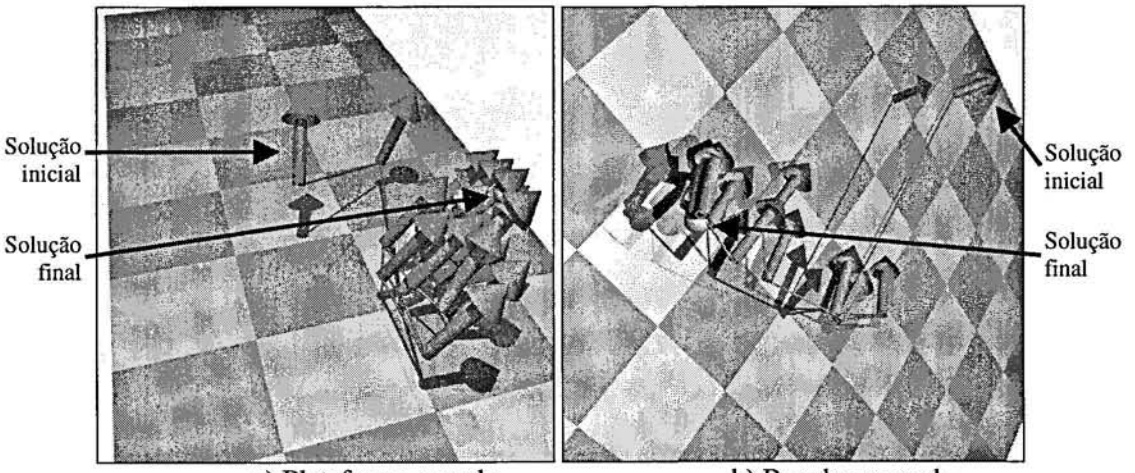
A fim de se obter um nível de iluminação homogéneo no centro do *hall* e a uma altura próxima de 1.7m (altura média da face humana em relação ao solo), definiram-se vários objectivos radiométricos representados por diversas fontes de importância rectangulares a 1.7m do chão e no centro da sala.

Para se obter uma iluminação totalmente indirecta, foi pesquisada uma solução com 4 luminárias do tipo foco: duas luminárias colocadas por cima das plataformas designadas "pequena" e "grande" da Fig. 87 e as restantes luminárias nas paredes "esquerda" e "direita". Todas as luminárias foram restringidas a uma orientação vertical predominante para cima, sendo a sua abertura angular de cerca de 45° (ângulo sólido de 90°). Pelo facto da iluminação ser totalmente indirecta, a potência das luminárias deverá ser mais elevada do que num caso de iluminação directa em *downlighting*, pelo que se torna necessário evitar a visualização directa das fontes de luz (senão corre-se o risco de haver problemas de contraste excessivo ou ofuscamento).

A pesquisa de soluções é baseada em 5 parâmetros por luminária pretendida, o que totaliza 20 parâmetros – 12 posicionais e 8 direccionais, assumindo-se que cada luminária é representada por uma posição no espaço e uma orientação. A fim de se respeitar a orientação vertical para cima que as luminárias devem ter, as gamas dos parâmetros direccionais são definidas apropriadamente, ie, a direcção de cada luminária faz um ângulo inferior a 45° com a direcção vertical para cima. A função custo calcula a importância recebida a partir da fonte de

importância, objectivo radiométrico no centro do *hall*, em 4 pontos dentro do volume de localização predefinido de cada luminária e dentro do ângulo sólido correspondente.

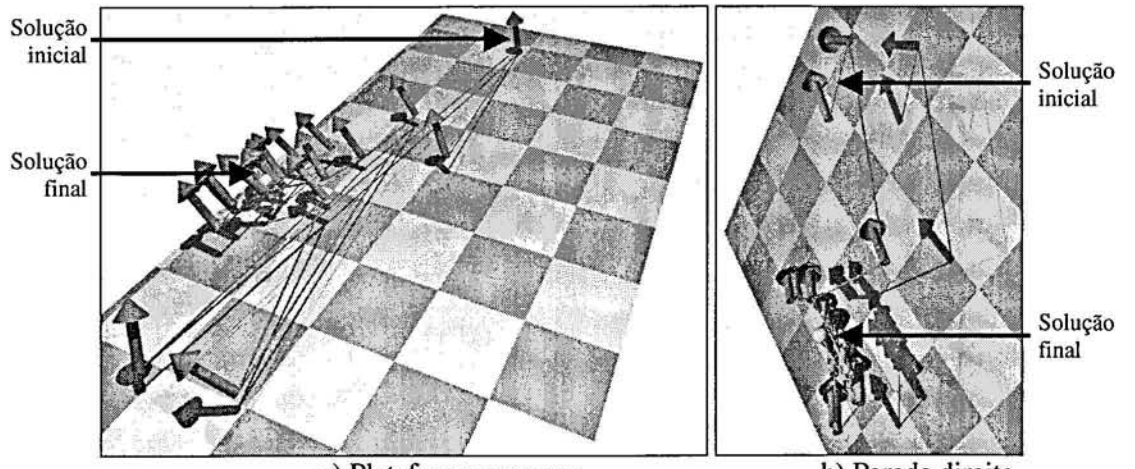
A Fig. 88a mostra as sucessivas soluções encontradas ao longo de 2000 iterações de pesquisa da luminária situada na plataforma grande da Fig. 87. Na Fig. 88b mostram-se as soluções para a parede esquerda. Cada seta 3D representa uma solução melhor do que as anteriores, sendo a posição da base da seta representativa da posição da luminária procurada e a orientação da seta igual à orientação da luminária procurada.



a) Plataforma grande b) Parede esquerda

Fig. 88 – Evolução de soluções (plataforma grande e parede esquerda)

As Fig. 89a e Fig. 89b mostram as soluções para plataforma pequena e parede direita, respectivamente, obtidas com o mesmo ciclo de pesquisa de 2000 iterações.

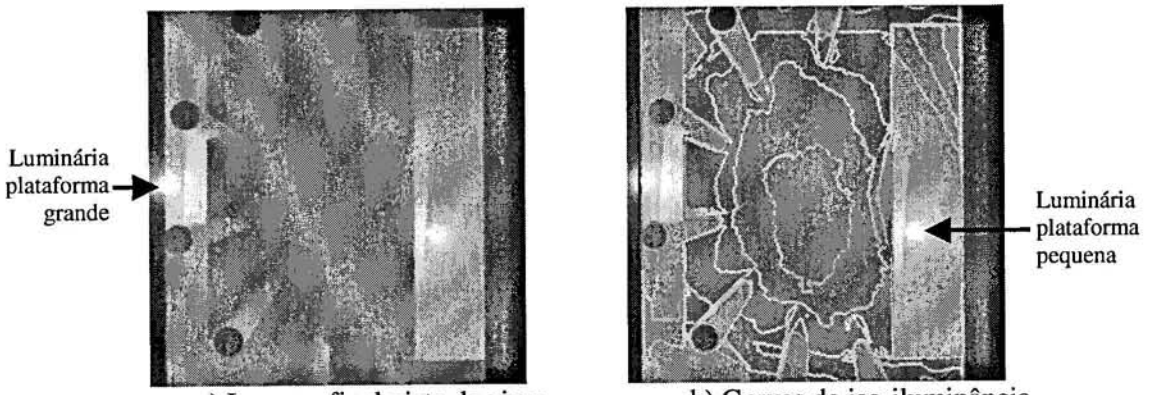


a) Plataforma pequena b) Parede direita

Fig. 89 – Evolução de soluções (plataforma pequena e parede direita)

Da análise da Fig. 88 e Fig. 89 ressalta que as soluções se vão concentrando sucessivamente em regiões cada vez mais pequenas do espaço de configuração de parâmetros, o que corresponde, em termos das imagens, à sobreposição das setas 3D que representam as diversas soluções. Esta constatação é importante, visto tratar-se de um problema de design de iluminação indirecta, baseada em percursos ópticos que não são fáceis de prever e com vários níveis de reflexão difusa antes de obter a iluminação pretendida. Em termos de requisitos *RADIANCE*, é necessário configurar adequadamente a simulação de pelos menos dois níveis de inter-reflexão difusa, a fim de se poder simular com precisão as principais trocas radiantes da cena.

Na Fig. 90a apresenta-se uma imagem do *hall* com as luminárias optimizadas obtidas no ciclo de 2000 iterações de pesquisa, a partir de uma tomada de vista de cima e com o tecto "removido". Duas das luminárias são directamente visíveis de cima, mas com tomadas de vista a 1.7m de altura nenhuma das quatro luminárias ilumina directamente o observador. A Fig. 90 mostra que as curvas de iso-iluminância se organizam concentricamente em torno do ponto "central" do *hall*, o que permite dizer que a reflexão difusa no tecto da luz emitida pelas luminárias optimizadas satisfaz os objectivos de iluminação previamente especificados.



a) Imagem final vista de cima b) Curvas de iso-iluminância

Fig. 90 – Luminárias optimizadas em *uplighting*

Do ponto de vista qualitativo, as soluções obtidas estão em conformidade com os objectivos do design de iluminação, o que é muito importante atendendo às características arquitectónicas pouco convencionais deste espaço. Aliás, a flexibilidade da aplicação do algoritmo proposto a contextos de iluminação diversificados é uma característica muito importante que o distingue vantajosamente dos outros métodos de projecto ou design de iluminação. Os métodos convencionais ou empíricos são incapazes de dar resposta a geometrias como a deste caso; os métodos analógicos de design de iluminação, embora em teoria possuam alguma capacidade quantitativa de análise e experimentação, tornam-se complicados de dominar quando se pretendem soluções de iluminação complexas e sofisticadas em que a avaliação de factores quantitativos é muito importante.

6.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados apresentados cobrem um espectro largo de casos, desde os simples, com geometrias compostas por poucos objectos (Casos 1 e 2), até aos complicados, em que a quantidade de objectos da geometria (Caso 4) ou o tipo de geometria (Caso 5) dão origem a difíceis problemas de design de iluminação. Problemas com geometria simples (Caso 3) mas contextos de iluminação ou objectivos complexos (os vários cenários do Caso 3) ajudam a demonstrar a importância dos objectivos de iluminação na produção de soluções adequadas, ie, que o facto da geometria ser simples não implica necessariamente que o design de iluminação seja fácil.

Do ponto de vista quantitativo, os resultados apresentados estão em acordo com a especificação dos objectivos de design de iluminação. No entanto, no Caso 4 apresentou-se um cenário em que o uso do algoritmo proposto evidenciou uma solução de iluminação inadequada, o que mostra que o algoritmo pode ser empregue para validar ou invalidar qualquer candidato a solução de um problema de design de iluminação que se enquadre nas premissas da metodologia adoptada (secção 4).

6.3.1. Desempenho

O desempenho da implementação efectuada não deve ser encarado como uma consequência desfavorável da metodologia escolhida ou do algoritmo proposto. Embora um problema de design de iluminação seja, no caso geral, eminentemente complicado devido à complexidade da óptica e à não-linearidade do processo de design, isso não significa que não seja passível de um tratamento quantitativo rigoroso com um gasto moderado de recursos computacionais.

Nos casos simples (Casos 1, 2 e 3), o desempenho foi razoavelmente rápido, sobretudo quando foram usadas todas as técnicas disponíveis e desenvolvidas para reduzir a quantidade total de cálculos radiométricos e assim reduzir-se o tempo total de processamento. Neste tipo de problemas de design de iluminação, parece ser viável a obtenção de soluções optimizadas de iluminação em prazos inferiores a 1 ou 2 horas numa máquina vulgar do tipo PC[5].

Nos casos mais complicados (Casos 4 e 5), apesar dos benefícios das técnicas usadas serem semelhantes, a complexidade do problema não permite ciclos de design tão rápidos, pelo que é razoável supor-se que a obtenção de soluções optimizadas de iluminação não será possível em menos de 2 horas. Convém frisar que os tempos de processamento dependem da plataforma empregue e que, nessa medida, poderão ser reduzidos através do emprego de plataformas com *hardware* mais potente.

No entanto, o aumento do desempenho da implementação proposta deverá ser procurado preferencialmente dos seguintes modos:

- Desempenho do motor radiométrico – Qualquer melhoria a este nível, mantendo-se a validade radiométrica dos cálculos, tem efeitos muito vantajosos sobre o desempenho geral da implementação. Há duas formas básicas de o conseguir:
  - — Melhoria do comportamento dos algoritmos através da redução da sua complexidade temporal (maior e/ou melhor reaproveitamento de dados, por exemplo).
  - — Replicação dos algoritmos através do emprego de técnicas de paralelização (uso de várias computadores em rede, computadores com multi-processamento, etc).
- Ciclo de pesquisa de soluções – Uma capacidade melhorada de identificar a região do espaço de configuração de parâmetros na qual a solução optimizada ou boas soluções quasi-óptimas se situem implica um maior desempenho da implementação efectuada.

A substituição do motor radiométrico "sequencial" (versão *RADIANCE*, Fig. 52) por uma nova versão paralela mestre-escravo (Fig. 53), capaz de tirar partido de um conjunto de computadores interligados em rede, mostrou a versatilidade e o poder deste tipo de sistemas, de que a arquitectura *Beowulf* é um bom exemplo. As reduções de tempo de cálculo obtidas são promissoras, correspondendo a acelerações de desempenho entre 5 e 11 vezes num sistema *Beowulf* de 22 computadores.

No entanto, as acelerações de desempenho obtidas mostram que ainda há uma margem significativa de melhoria na exploração de recursos de cálculo do tipo paralelo, pois o limite teórico de aceleração de desempenho está ainda longe de ser atingido (entre 21 e 22 para o sistema *Beowulf* usado). A explicação para este facto deve-se à utilização do motor de cálculo radiométrico paralelo com "pequenos" grupos de raios de importância, os quais são distribuídos por um subconjunto dos processadores existentes e não por todos, a fim de reduzir os riscos de sobrecarga de comunicações na rede de interligação quando o número de raios a distribuir por processador é baixo (inferior a 24 raios/processador no sistema *Beowulf* usado). Ao contrário da

[5] Configurações semelhantes às que são referidas no início deste capítulo.

síntese convencional de imagem, na qual todos os raios de radiância que "saem" do ponto de observação da cena são conhecidos *a priori*, em design de iluminação os raios de importância são gerados dinamicamente ao longo da pesquisa, pelo que os esquemas mais simples de balanceamento de trabalho entre processadores não são aplicáveis devido ao risco de congestionamento das comunicações.

6.3.2. Validação

A metodologia de design de iluminação baseada em objectivos com recurso ao transporte de importância é válida se as condições apresentadas na secção 2.1.1.1 e as premissas associadas ao modelo óptico do *RADIANCE* forem respeitadas. O modelo óptico do *RADIANCE* baseia-se num modelo geométrico da óptica: ignoram-se efeitos ondulatórios, a luz é monocromática e o meio não participa nos fenómenos radiantes. Estas restrições são irrelevantes na maior parte dos problemas de design de iluminação do mundo real. Para além da validade teórica do *RADIANCE* em problemas comuns do mundo real, alguns estudos de validação prática ([Ward92b], [Rushmeier95], [Mardaljevic95] e [Larson98]) mostraram que a validade física realmente existe, apesar do *RADIANCE* ser uma mistura complexa de técnicas determinísticas e estocásticas. Um factor que pode afectar a validade da implementação é a técnica de aceleração descrita na secção 5.3.8. No entanto, quando o parâmetro de vizinhança dessa técnica é inferior ao valor de discretização de posição, testes experimentais mostraram que o erro de aproximação é desprezável.

Por outro lado, o uso de um método heurístico de optimização global não invalida a metodologia nem o algoritmo proposto, apenas não garante que a solução final obtida seja a óptima. O modo mais simples de aumentar a confiança na solução obtida baseia-se na repetição da pesquisa de soluções até que a variância dos resultados finais seja satisfatória. Em problemas de design adequadamente formulados, a experiência tem mostrado que mais de 5 e menos de 10 pesquisas são suficientes. Em todos os casos apresentados, esta regra empírica foi observada. Mesmo nas pesquisas que não produziram a solução "óptima", a solução obtida era claramente quasi-óptima e qualitativamente semelhante à solução "óptima" previamente esperada (Casos 1, 2 e 3) ou à melhor solução do conjunto de pesquisas (Casos 4 e 5).

6.3.3. Limitações

Uma das novidades do algoritmo proposto para apoiar o design de iluminação é a especificação dos objectivos de design como dados de entrada num processo em que, conjuntamente com a descrição da geometria do espaço, dos materiais de superfície e dos mecanismos de iluminação prévia, se pesquisa a solução "óptima" que gera a maior satisfação dos referidos objectivos.

No estado actual da implementação efectuada, a especificação dos objectivos de design poderá também ser a maior limitação ao seu uso por designers de iluminação. Esta constatação decorre do facto da conversão de objectivos mentais e abstractos de um designer para objectivos quantitativos (radiométricos e não-radiométricos) ser uma actividade complexa e da qual dependem fortemente os resultados a obter no fim da pesquisa de soluções. Este mapeamento de objectivos exige, para além do conhecimento intrínseco do contexto do problema, um conhecimento alargado de alguns domínios científicos subjacentes à metodologia escolhida e ao algoritmo proposto (radiometria, fotometria, geometria, etc), sem os quais os dados de entrada não poderão ser totalmente definidos.

6.4. SUMÁRIO

Neste capítulo descreveram-se os resultados da aplicação da implementação protótipo a vários casos, escolhidos para representar contextos relevantes em termos de design de iluminação.

De um ponto de vista técnico, os resultados obtidos confirmaram os benefícios das técnicas de exploração de coerência da importância e de esquemas acelerados para controlo da convergência de optimização (*quenching* em vez de *annealing*).

Em termos de design de iluminação, os resultados também corresponderam ao esperado, o que permite concluir que a metodologia e o algoritmo podem realmente ajudar ao processo de design, assumindo-se que o problema é devidamente formulado.

Na parte final foram abordados aspectos de validação da metodologia, a qual depende fortemente da validade óptica do algoritmo de transporte da importância e, em menor escala, do método de optimização empregue.

7. CONCLUSÕES

Neste capítulo revêem-se os objectivos de investigação, descrevem-se as contribuições originais deste trabalho e apresentam-se pistas de investigação para trabalho futuro.

O tema deste trabalho foi o desenvolvimento de novos processos de design de iluminação, baseado na procura de novas metodologias de design em que o papel do designer seja mais participativo. Os resultados do trabalho desenvolvido são variados, destacando-se a metodologia de design inverso encontrada, o algoritmo decorrente dessa metodologia, o mapeamento de objectivos de design em dados de entrada e numa função custo, o uso da grandeza física importância como quantidade fundamental de iluminação no referido algoritmo, as técnicas de aceleração de desempenho desenvolvidas e a implementação efectuada.

7.1. REVISÃO DOS OBJECTIVOS DE INVESTIGAÇÃO

Neste trabalho descreveu-se uma nova abordagem ao design de iluminação que pretende ultrapassar os problemas associados a abordagens empíricas, ainda hoje predominantes. Uma falha importante nas abordagens convencionais que permitem a experimentação é o papel pouco importante do designer, o qual muitas vezes se limita a rejeitar hipóteses de solução e a ensaiar novas hipóteses, frequentemente "às cegas", ie, sem ter uma noção concreta do que deverá fazer para se aproximar da solução desejada.

A abordagem assumida neste trabalho tinha como objectivos fulcrais dar ao designer meios de explicitar os seus objectivos de design de iluminação e um processo de ensaiar hipóteses de solução. Nesse processo de design de iluminação, descrito através de um novo algoritmo especificamente desenvolvido para o efeito, parte dos objectivos é tratada como dados do problema, conjuntamente com os dados físicos associados a problemas de iluminação, o que distingue, desde logo, este processo de todos os outros existentes. Os restantes objectivos de design de iluminação são convertidos num dispositivo algorítmico, o programa custo, que serve para controlar a pesquisa de soluções.

Além disso, o novo processo de design de iluminação tem uma base física sólida, fundamentada num modelo óptico adequado e num método de pesquisa de soluções fiável. A implementação efectuada recorre a algoritmos e técnicas existentes e testadas, de reputação confirmada experimentalmente, e a novas técnicas investigadas e desenvolvidas propositadamente para este trabalho.

Os resultados obtidos demonstram a validade e evidenciam as potencialidades deste novo processo de design de iluminação, que, embora automático, permite ao designer um controlo total do problema e um grau elevado de participação na sua resolução, inexistente nos outros métodos.

Estas conclusões gerais são uma consequência lógica da estrutura temática deste trabalho, da exposição de cada capítulo e das suas conclusões parcelares.

Começando pelo Capítulo 2, neste abordaram-se as diversas áreas subjacentes à dissertação: o transporte da luz, a visão e luminotecnia, a iluminação e a optimização. Para cada área temática, foram analisados os aspectos mais importantes para uma melhor compreensão dos conceitos a apresentar nos capítulos subsequentes.

Os destaques deste capítulo foram para a escolha do modelo da óptica geométrica como base da simulação do transporte da luz e para a definição das premissas ópticas que permitem um tratamento adequado, embora simplificado, dos fenómenos da iluminação relevantes no mundo real.

Tendo sido previamente estabelecidos os fundamentos teóricos, no Capítulo 3 abordaram-se as metodologias de design, os métodos de projecto de iluminação e o estado da arte do design de iluminação.

Concluiu-se que as metodologias de design inverso possuem um potencial de utilização que as torna as mais indicadas no tratamento de problemas de design de iluminação. Destacou-se o papel dos objectivos de design como entidade fundamental nos processos de design semi-automáticos. No seguimento, foi proposta uma nova metodologia de design de iluminação, com recurso a uma abordagem inversa, na qual os objectivos passam a desempenhar um papel fulcral. Referiu-se a utilização da optimização como mecanismo capaz de fornecer o elemento de automatismo na pesquisa de soluções.

Em relação ao estado da arte do design de iluminação aplicado a espaços interiores de trabalho, concluiu-se que não há consenso sobre o que significam os conceitos "qualidade de iluminação" e "condições ideais de trabalho", frequentemente usados pelos designers e especialistas de iluminação.

Partindo da metodologia esquematizada no capítulo anterior, no Capítulo 4 definiram-se os fundamentos da nova metodologia de design de iluminação baseada em objectivos. No caso concreto do design de iluminação, os objectivos de design de iluminação participam como dados de entrada e também no mecanismo de escolha de soluções.

Caso um problema de design de iluminação possa ser parametrizado em termos dos seus graus de liberdade, mostrou-se que ele pode ser transformado num problema multi-dimensional de pesquisa, resolúvel através de métodos de optimização global.

Mostrou-se também que a grandeza radiométrica importância pode ser usada como quantidade fundamental na pesquisa de soluções. Caso se respeite o enquadramento definido no Capítulo 2 relacionado com o transporte de radiância versus importância, concluiu-se que se podem empregar os algoritmos de simulação do transporte da radiância para processar a importância.

Descreveu-se igualmente a relevância da função custo, introduzindo-se o conceito de função custo algorítmica (programa custo) como método flexível de pesquisa e de tratamento de certos tipos de objectivos de design de iluminação.

No Capítulo 5 descreveu-se detalhadamente uma proposta de algoritmo para implementar a metodologia de design de iluminação baseada em objectivos analisada no capítulo anterior.

A implementação efectuada foi alvo de uma descrição pormenorizada, tendo sido analisados os seus aspectos computacionais, incluindo-se a utilização de pacotes externos de *software*. Resultou dessa análise a definição de novas técnicas de aceleração de desempenho, essencialmente através do recurso à exploração da coerência dos dados processados.

Com base no algoritmo anteriormente proposto, no Capítulo 6 foram descritos os resultados da aplicação da implementação protótipo a vários casos exemplificativos de aspectos relevantes de design de iluminação, tendo-se registado uma total concordância entre os resultados esperados e os realmente obtidos.

Os exemplos considerados confirmaram os ganhos de desempenho anteriormente previstos, no quadro das técnicas de aceleração de desempenho baseadas na exploração da coerência, desenvolvidas no capítulo anterior. Foram também abordados aspectos de utilização de mecanismos de computação paralela para se melhorar ainda mais o desempenho da implementação protótipo, mecanismos esses que mostraram claramente as vantagens daí decorrentes.

7.2. CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS

O algoritmo proposto não reduz ou condiciona a margem criativa do designer de iluminação. Pelo contrário, uma ferramenta computacional baseada no algoritmo proposto permite a análise, a validação ou a predição de soluções de iluminação, difíceis ou mesmo impossíveis de fazer através de outros métodos. Além disso, o papel do designer de iluminação adquire importância nas fases iniciais do algoritmo, nas quais o designer é responsável por formular quantitativamente os seus objectivos de iluminação como dados de entrada adicionais, para além dos dados de entrada convencionais de problemas de iluminação. A noção de objectivos de iluminação foi alargada muito para além dos objectivos radiométricos convencionais, passando a poder incluir vários novos tipos de objectivos não-radiométricos (geométricos, estéticos, etc), os quais são incluídos numa função custo algorítmica. A utilização de uma metodologia de design inverso foi fundamental para o desenvolvimento do algoritmo proposto.

Em termos de iluminação, a contribuição original mais importante é o uso da grandeza importância como quantidade fundamental nos cálculos radiométricos, enquadrada num modelo óptico adequado e numa formulação do transporte da luz em que os papéis das grandezas radiância e importância são intermutáveis. A utilização da grandeza importância e de uma metodologia de design inverso resultou em benefícios importantes no algoritmo proposto.

Do ponto de vista de pesquisa de soluções de design de iluminação, a metodologia desenvolvida neste trabalho permitiu a transformação de um problema de design num problema equivalente de optimização baseado em função custo. Uma contribuição original igualmente muito importante é o mapeamento das condições iniciais e objectivos de design de iluminação no contexto da optimização. Esse mapeamento traduz-se na dimensionalidade do problema de optimização, que reflecte os graus de liberdade do problema de design, num conjunto de parâmetros numéricos de optimização e respectivos atributos e numa função custo algorítmica, descrita através do designado programa custo. A identificação do método heurístico de optimização global *simulated annealing* como método mais apropriado para resolver, no caso geral, problemas de design de iluminação é também uma conclusão importante.

Finalmente, a implementação protótipo efectuada a partir do algoritmo proposto mostra que existem actualmente ferramentas computacionais de simulação do transporte da luz e de optimização com as características necessárias e suficientes para serem empregues em aplicações computacionais de apoio ao design de iluminação. A integração dessas ferramentas foi realizada com a preocupação de não retirar generalidade à implementação efectuada, tratando-as como se fossem caixas negras. Assim, o protótipo desenvolvido pode ser modificado através da substituição das ferramentas escolhidas por outras que cumpram os requisitos mínimos identificados neste trabalho. A implementação incorpora ainda técnicas de aceleração

de desempenho, especificamente desenvolvidas para o efeito, que produzem benefícios quantitativos muito claros quando aplicadas a casos complexos de design de iluminação, como são alguns dos exemplos apresentados. Destaca-se particularmente a redução significativa dos tempos totais de processamento quando se usam todas as técnicas de aceleração implementadas, com a vantagem importante de não se por em causa a validade física dos resultados obtidos.

7.3. TRABALHO FUTURO

O trabalho desenvolvido mostra que existem actualmente condições para se implementarem novas ferramentas de apoio ao design de iluminação, baseados em metodologias de design inverso e com validade física garantida. No entanto, a implementação protótipo efectuada evidenciou a elevada complexidade inerente a uma ferramenta computacional que lida com espaços, objectivos, iluminação e optimização. Essa complexidade também se manifesta ao nível da introdução dos dados de entrada, da operação do protótipo e da produção de dados complementares de saída, que são tarefas demasiado complicadas para serem realizadas por designers de iluminação, com conhecimentos vulgares de informática – a implementação protótipo não foi feita para ser usada por designers.

Nessa medida, é necessário desenvolver uma abstracção em cima do algoritmo proposto que permita o seu uso efectivo por designers. Essa abstracção deverá incluir uma interacção adequada ao contexto dos utilizadores alvo (os designers de iluminação) e uma interface gráfica evoluída que simplifique os aspectos operativos e logísticos do algoritmo subjacente. Esta é a estratégia seguida no desenvolvimento do *DESKTOP RADIANCE*, uma evolução do pacote *RADIANCE* destinada a utilizadores não-informáticos (arquitectos, designers, etc).

Em relação a este trabalho, o projecto CASSILDE (*Computer Assisted Lighting Design*), integrado no programa PRAXIS/MCT 2000-2001, visa obter junto dos potenciais utilizadores (arquitectos, luminotécnicos e designers de iluminação) opiniões sobre o modo de funcionamento da implementação protótipo que permitam o desenvolvimento de uma nova versão com capacidades adequadas de interacção, interface e usabilidade que permitam o seu uso por esses utilizadores alvo. Este projecto iniciou-se em Julho de 1999 e terminará em Junho de 2001.

Por outro lado, a implementação protótipo levantou algumas questões para as quais foram dadas algumas respostas razoavelmente satisfatórias, mas que indiciam a necessidade de mais investigação científica. Algumas dessas questões passam pelo estudo da sensibilidade dos resultados finais em termos da precisão dos dados de entrada, pela definição do que são os objectos geométricos relevantes e quais aqueles que podem ser ignorados sem se afectar os resultados finais, pelo afinação dos métodos heurísticos de pesquisa ao contexto muito especial do design de iluminação, pelo estudo e desenvolvimento de novos métodos de exploração de coerência dos dados de entrada que permitam a redução dos cálculos e a aceleração de desempenho, entre outros.

A fim de dar respostas a algumas destas questões, estão em curso dois trabalhos de investigação no âmbito de mestrado cujos objectivos são:

- Estudar, desenvolver e implementar uma estrutura de armazenamento de raios de radiância (ou importância) baseada no trabalho de [Larson98b] e nos trabalhos derivados da noção de função plenóptica [Adelson91], sobretudo [Gortler96] e [Levoy96], de modo a ser possível um maior e melhor reaproveitamento de cálculos radiométricos do que aquele que foi obtido neste trabalho.

- Estudar o efeito de pequenas variações nos dados de entrada (a nível de objectos geométricos, materiais de superfície e atributos de luminárias) e as consequentes alterações no estado de equilíbrio da radiância (ou importância), com o objectivo de se desenvolverem estratégias de recomputação de cálculos radiométricos, tentando maximizar o reaproveitamento de dados dentro de um limite de erro predefinido.

Os resultados obtidos nestes trabalhos de investigação terão aplicação directa na implementação protótipo efectuada ou em versões posteriores.

REFERÊNCIAS

[Adelson91] Adelson, E.; Bergen, J.; *The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision*; chapter1 (Computational Models of Visual Processing); MIT Press, Cambridge; 1991.

[Aho86] Aho, A.; Sethi, R.; Ullman, J.; *Compilers: Principles, Techniques and Tools*; Addison-Wesley, New York; 1986.

[Anderson94] Anderson, A.; Grant, M.; *VISILUX: A Radiosity Based Lighting Design Tool*; Proceedings of the 2nd EUROGRAPHICS Workshop on Rendering; pp 227-239; 1994.

[Appel68] Appel, A.; *Some Techniques for Shading Machine Rendering of Solids*; AFIPS 1968 Spring Joint Computer Conference; vol 32, pp 37-45; 1968.

[Barber97] Barber, C.; Dobkin, D.; Huhdanpaa, H.; *The Quickhull Algorithm for Convex Hulls*; ACM Transactions on Mathematical Software; vol 22, pp 469-483; 1997.

[Barker97] Barquer, T.; *Lighting (Lighting Design in Architecture)*; Concepts in Practice Collection; Batsford, London; 1997.

[Bekaert95] Bekaert, P.; Willems, Y.; *Importance-Driven Progressive Refinement Radiosity*; Rendering Techniques '95 (Proceedings of 6th EUROGRAPHICS Workshop on Rendering); pp 316-325; Springer-Verlag; 1995.

[Bodmann79] Bodmann; Haubner; Marsden; *CIE Proceedings*; Kyoto, Japan; 1979.

[Burton99] Burton, J.; *Fundamentals of Interior Lighting (Volume I)*; Prentice-Hall, New York; 1999.

[Canesi93] Canesi, A.; Marini, D.; Perricone, G.; *Videorealistic Methods for Interior Lighting Design*; 4th Eur. Int. Conf. on the Application of AI, Robotics and Image Processing to Architecture, Building Engineering, Civil Engineering, Urban Design and Urban Planning; pp 443-449; Elsevier; 1993.

[Carter88] Carter, D.; McEwan, I.; *The Treatment of Obstruction in Interior Design - Computer Analysis*; Int. Journal of Lighting Research and Tech.; vol 20-1, pp 21-28; 1988.

[Carter92] Carter, D.; Bougdah, H.; *The Lumen Design Method for Obstructed Interiors*; Int. Journal of Lighting Research and Tech.; vol 24-1, pp 15-14; 1992.

[Carter96] Carter, D.; *Design Calculations for Electric Lighting in Real Interiors*; Proceedings of the Illuminating Engineering Society; Cleveland; 1996.

[Carter97] Carter, D.; Leung, A.; Lupton, M.; *Design Calculations for Electric Lighting in Real Interiors*; Journal of The Illuminating Engineering Society; vol 26-1, pp 79-89; 1997.

[Casebere99] Casebere, J.; *Asylum* (Centro Galego de Arte Contemporâneo); Edição da Xunta de Galicia; S. de Compostela, Galiza; 1999.

[CIE73] CIE; *Standardization of Luminance Distribution on Clear Skies*; Publication number 22; Paris, CIE; 1973.

[Chen91] Chen, S.; Rushmeyer, H.; Miller, G.; Turner, D.; *A Progressive Multi-Pass Method for Global Illumination*; Computer Graphics (SIGGRAPH 91 Proceedings); vol 25, pp 165-174; 1991.

[CRQQI66] Committee on Recommendations for Quality and Quantity of Illumination; *Outline of a Standard Procedure for Computing Visual Comfort Ratings for Interior Lighting*; Illuminating Engineering; Report number 2; vol 61, pp 643-666; 1966.

[Conte80] Conte, S.; de Boor, C.; *Elementary Numerical Analysis – An Algorithmic Approach*; International Series in Pure and Applied Mathematics; McGraw-Hill, Tokyo; 1980.

[Cook84] Cook, R.; Porter, T.; Carpenter, L.; *Distributed Ray Tracing*; Computer Graphics (SIGGRAPH 84 Proceedings); vol 18-3, pp 137-145; 1984.

[Costa98] Costa, A.; Sousa, A. A.; Ferreira, F. N.; *Design de Iluminação*; 8º Encontro Português de Computação Gráfica; Coimbra; 1998 (apresentação de comunicação).

[Costa99a] Costa, A.; Sousa, A. A.; Ferreira, F. N.; A New Approach to Lighting Desig; Winter School of Computer Graphics 1999; pp 29-39; Plzen; 1999 (apresentação de comunicação).

[Costa99b] Costa, A.; Sousa, A. A.; Ferreira, F. N.; Lighting Design and Optimization; ICVC 1999; Goa; 1999.

[Costa99c] Costa, A.; Sousa, A. A.; Ferreira, F. N.; Lighting Design: a Goal Based Approach Using Optimization; 10th EUROGRAPHICS Workshop on Rendering; pp 325-336; Granada; 1999 (apresentação de comunicação).

[Costa99d] Costa, A.; Sousa, A. A.; Ferreira, F. N.; *Lighting Design: a Goal Based Approach Using Optimization*; Rendering Techniques' 99; pp 317-328, D. Lichinski & G. W. Larson (editors); Springer Computer Science, Springer Verlag; Viena; 1999.

[Costa00] Costa, A.; Sousa, A. A.; Ferreira, F. N.; Novos Métodos de Design de Iluminação; 9º Encontro Português de Computação Gráfica; Marinha Grande; 2000 (apresentação de comunicação).

[DiLaura88] DiLaura, D.; Igoe, D.; Samaras, P.; Smith, A.; *Verifying the Applicability of Computer Generated Pictures to Lighting Design*; Journal of The Illuminating Society; vol 17-1; pp 36-61; 1988.

[Dobashi95] Dobashi, Y.; Kaneda, K.; Nakatani, H.; Yamashita, H.; *Quick Rendering Method Using Basis Functions for Interactive Lighting Design*; Computer Graphics Forum (EUROGRAPHICS'95); vol 14-3, pp 229-240; 1995.

[Dobashi96] Dobashi, Y.; Kaneda, K.; Nakatani, H.; Yamashita, H.; *Method for Calculation of Sky Light Luminance Aiming at an Interactive Architectural Design*; Computer Graphics Forum (EUROGRAPHICS'96); vol 15-3, pp 109-118; 1996.

[Dorsey91] Dorsey, J.; Sillion, F.; Greenberg, D.; *Design and Simulation of Opera Lighting and Projection Effects*; Computer Graphics (SIGGRAPH 91 Proceedings); vol 25, pp 45-50; 1991.

[Dutre95] Dutre, P.; Willems, Y.; *Importante-Driven Monte Carlo Light Tracing*; Proceedings of the 5th EUROGRAPHICS Workshop on Rendering; pp 185-194; 1995.

[Dutre97] Dutre, P.; Bekaert, P.; Suykens, F.; Willems, Y.; *Bidirectional Radiosity*; Rendering Techniques '97 (Proceedings of 8th EUROGRAPHICS Workshop on Rendering); pp 205-216; Springer-Verlag; 1997.

[Feynman90] Feynman, R.; *QED: A Estranha Teoria da Luz e da Matéria*; Colecção Ciência Aberta, Editora Gradiva; 1990.

[Gardner93] Gardner, C.; Hannaford, B.; *Lighting Design (An Introductory Guide for Professionals)*; Wiley & Sons, NewYork; 1993.

[Gates95] Gates, C.; *Optimization of Lighting Design Application by Implementation on High Performance Parallel Computing Hardware*; Technical Report EPCC-SS95-15; University of Edinburgh; 1995.

[Geist94] Geist, A.; Beguelin, A.; Dongarra, J.; Jiang, W.; Manchek, R.; Sunderam, V.; *PVM: Parallel Virtual Machine (A User's Guide and Tutorial for Networked Parallel Computing)*; The MIT Press, Cambridge; 1994.

[Glassner95] Glassner, A.; *Principles of Digital Image Synthesis (Volumes I and II)*; Morgan Kaufmann, New York; 1995.

[Glover86] Glover, F.; *Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence*; Computer and Operations Research; vol 5, pp 533-549; 1986.

[Glover90] Glover, F.; *Tabu Search: A Tutorial*; Interfaces; vol 20-4, pp 74-94; 1990.

[Goldberg89] Goldberg, D.; *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*; Addison-Wesley, Reading; 1989.

[Goral84] Goral, C.; Torrance, K.; Greenberg, D.; Bataille, B.; *Modelling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces*; Computer Graphics (SIGGRAPH 84 Proceedings); vol 18, pp 212-222; 1984.

[Gortler96] Gortler, S.; Grzeszczuk, R.; Stelinski, R.; Cohen, M.; *The Lumigraph*; Computer Graphics (SIGGRAPH 96 Proceedings); pp 43-54; 1996.

[Grossmann90] Grossmann, I.; *Mixed Integer Nonlinear Programming Techniques for the Synthesis of Engineering Systems*; Research in Engineering Design; vol 1, pp 205-228; 1990.

[Hall89] Hall, R.; *Illumination and Color in Computer Generated Imagery*; Springer-Verlag, New York; 1989.

[Hansen92] Hansen, E.; *Global Optimization Using Interval Analysis*; Dekker, New York; 1992.

[Heckbert92] Heckbert, P.; *Radiosity in Flatland*; Computer Graphics Forum (EUROGRAPHICS'92); vol 11-3, pp 181-192; 1992.

[Hill98] Hill, S.; *The Complex Effects of Obstructions on Horizontal Illuminance in Interior Lighting Design*; Proceedings of the CIBSE Lighting Conference; Lancaster; 1998.

[Horst95] Horst, R.; Pardalos, P.; *Handbook of Global Optimization*; Kluwer, Dordrecht; 1995.

[IESNA87] Illuminating Engineering Society of North America; *IES Lighthing Handbook (7^{th} Edition)*; New York; 1987.

[Ingber93] Ingber, L.; *Simulated Annealing: Practice versus Theory*; Journal of Mathematical Computing and Modelling; vol 18-11, pp 29-57; 1993.

[Ingmar98] Ingmar, P.; Pietrek, G.; *Importance-Driven Construction of Photon Maps*; Rendering Techniques '98 (Proceedings of 9^{th} EUROGRAPHICS Workshop on Rendering); pp 269-280; Springer-Verlag; 1998.

[Kajiya86] Kajiya, J.; *The Rendering Equation*; Computer Graphics (SIGGRAPH 86 Proceedings); vol 20, pp 143-150; 1986.

[Kawai93] Kawai, J.; Painter, J.; Cohen, M.; *Radioptimization – Goal Based Rendering*; Computer Graphics (SIGGRAPH 93 Proceedings); pp 147-154; 1993.

[Kirkpatrick83] Kirkpatrick, S.; Gelatt, C.; Vecchi, M.; *Optimization by Simulated Annealing*; Science; 220, 4598, pp 671-680; 1983.

[Larson97] Larson, G.; Rushmeier, H.; Piatko, C.; *A Visibility Matching Tone Reproduction Operator for High Dynamic Range Scenes*; IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics; vol 3-4, pp 291-306; 1997.

[Larson98] Larson, G.; Shakespeare, R.; *Rendering with RADIANCE*; Morgan Kaufmann, S. Francisco; 1998.

[Larson98b] Larson, G.; *The Holodeck: a Parallel Ray-CachingRendering System*; Proceedings of the 2nd EUROGRAPHICS Workshop on Parallel Graphics and Visualization; 1998.

[Leung94] Leung, A.; Lupton, M.; Carter, D.; *Standard Obstructions for Lighting Calculations*; Lighting Research Technology; vol 26-3, pp 161-165; CIBSE; 1994.

[Levine92] Levine, J.; Mason, T.; Brown, D.; *lex & yacc*; UNIX Programming Tools; O'Reilly & Associates Inc., New York ; 1992.

[Levoy96] Levoy, M.; Hanrahan, P.; *Light Field Rendering*; Computer Graphics (SIGGRAPH 96 Proceedings); pp 31-42; 1996.

[Lupton96] Lupton, M.; Leung, A.; Carter, D.; *Advances in Lighting Design Methods for Non-Empty Interiors: A Review*; Lighting Research Technology; vol 28-1, pp 29-41; CIBSE; 1996.

[Mardaljevic95] Mardaljevic, J.; *Validation of a Lighting Simulation Program under Real Sky Conditions*; Lighting Research Technology; vol 27-4, pp 181-188; 1995.

[Marks97] Marks, J.; Andalman, B.; Beardsley, P.; Freeman, W.; Gibson, S.; Hodgins, J.; Kang, T.; Mirtich, B.; Pfister, H.; Ruml, W.; Ryall, K.; Seims, J.; Shieber, S.; *Design Galleries: A General Approach to Setting Parameters for Computer Graphics and Animation*; Computer Graphics (SIGGRAPH 97 Proceedings); pp 389-400; 1997.

[Marschner98] Marschner, S.; *Inverse Rendering for Computer Graphics*; PhD Thesis, Cornell University; 1998.

[Marschner99] Marschner, S.; Westin, S.; Lafortune, E.; Torrance, K.; Greenberg, D.; *Image-Based BRDF Measurement Including Human Skin*; Proceedings of the 10th EUROGRAPHICS Workshop on Rendering; pp 139-153; 1999.

[McEwan85] McEwan, I.; Carter, D.; *Some Approaches to the Treatment of Obstruction in Interior Lighting Design*; Int. Journal of Lighting Research and Technology; vol 17-3, pp 107-115; 1985.

[Metropolis53] Metropolis, N.; Rosenbluth, A.; Rosenbluth, M.; Teller, A.; Teller, E.; *Equation of State Calculations by Fast Computing Machines*; Journal of Chem. Physics; vol 21-6, pp 1087-1092; 1953.

[Miller84] Miller, N.; Ngai, P.; Miller, D.; *The Application of Computer Graphics in Lighting Design*; Journal of The Illuminating Engineering Society; vol 14-1, pp 6-26; 1965.

[Mockus89] Mockus, J.; *Bayesian Approach to Global Optimization*; Kluwer; 1989.

[Moon46] Moon, P.; Spencer, D.; *Lighting Design by the Intereflection Method*; Journal of The Franklin Institute; vol 242-6, pp 465; 1946.

[Moon48] Moon, P.; Spencer, D.; *Lighting Design*; Addison-Wesley; 1948.

[Niederreiter92] Niederreiter, H.; *Random Number Generation and Quasi-Monte Carlo Methods*; Society for Industrial and Applied Mathematics; 1992.

[O'Brien65] O'Brien, P.; *Numerical Analysis for Lighting Design*; Journal of The Illuminating Engineering Society; vol 60-4, pp 169-234; 1965.

[Pattanaik93] Pattanaik, S.; Mudur, S.; *The Potential Equation and Importance in Illumination Computations*; Computer Graphics Forum (EUROGRAPHICS'93); vol 12-2, pp 131-136; 1993.

[Pattanaik95] Pattanaik, S.; Mudur, S.; *Adjoint Equations and Random Walks for Illumination Computation*; ACM Transactions on Graphics; vol 14, pp 77-102; 1995.

[Paule98] Paule, B.; Scartezzini, J-L.; Citherlet, S.; *LESO-DIAL Daylighting Design Software*; Proceedings of the Int. Daylighting'98 Conference; pp 29-36; 1998.

[Peercy93] Peercy, M.; *Linear Color Representations for Full Spectral Rendering*; Computer Graphics (SIGGRAPH 93 Proceedings); pp 191-198; 1993.

[Perez93] Perez, R.; Seals, R.; Michalsky, R.; *All-Weather Model for Sky Luminance Distribution – Preliminary Configuration and Validation*; Solar Energy; vol 50-3, pp 235-245; 1993.

[Pirlot96] Pirlot, M.; *General Local Search Methods*; European Journal of Oper. Research; vol 92, pp 493-511; 1996.

[Poulin97] Poulin, P.; Ratib, K.; Jacques, M.; *Sketching Shadows and Highlights to Position Lights*; Proceedings of the Computer Graphics International 1997 Conference; pp 56-63; 1997.

[Reinhard98] Reinhard, E.; Chalmers, A.; Jansen, F.; *Overview of Parallel Photo-realistic Graphics*; EUROGRAPHICS'98 State of The Art Report; 1998.

[RTNews99] Haines, E.; *Ray Tracing News*; vol 12, number 2; www.acm.org/tog/resources/RTNews/html/; 1999.

[Rushmeier95] Rushmeier, H.; Ward, G.; Piatko, C.; Sanders, P.; Rust, B.; *Comparing Real and Synthetic Images: Some Ideas about Metrics*; Proceedings of the 6th EUROGRAPHICS Workshop on Rendering; Dublin; 1995.

[Saff97] Saff, E.; Kuijlaars, A.; *Distributing Many Points on a Sphere*; The Mathematical Intelligencer; vol 19-1; 1997.

[Samet90] Samet, H.; *Applications of Spatial Data Structures*; Addison-Wesley, Reading; 1990.

[Schoeneman93] Schoeneman, C.; Dorsey, J.; Smits, B.; Arvo, J.; Greenberg, D.; *Painting with Light*; Computer Graphics (SIGGRAPH 93 Proceedings); pp 143-146; 1993.

[Shirley90] Shirley, P.; *A Ray Tracing Method for Illumination Calculation in Diffuse-Specular Scenes*; Proceedings of the Graphics Interface '90 Conference; pp 205-212; 1990.

[Sillion89] Sillion, F.; Puech, C.; *A General Two-Pass Method Integrating Specular and Diffuse Reflection*; Computer Graphics (SIGGRAPH 89 Proceedings); vol 23, pp 335-344; 1989.

[Sims91] Sims, K.; *Artificial Evolution for Computer Graphics*; Computer Graphics (SIGGRAPH 91 Proceedings); vol 25, pp 319-328; 1991.

[Skiena97] Skiena, S.; *The ALGORITHM Design Manual*; chapter 5 (*Combinatorial Search and Heuristic Methods*); pp 115-136; Springer-Verlag, New York; 1997.

[Skiena97b] Skiena, S.; *The ALGORITHM Design Manual*; chapter 8, section 6 (*Computational Geometry*); pp 354-396; Springer-Verlag, New York; 1997.

[Smits92] Smits, B.; Arvo, J.; Salesin, D.; *An Importance-Driven Radiosity Algorithm*; Computer Graphics (SIGGRAPH 92 Proceedings); pp 273-282; 1992.

[Stanger84] Stanger, D.; *Monte Carlo Procedures in Lighting Design*; Journal of The Iluminating Engineering Society; vol 13-4, pp 368-371; 1984.

[Tellier93] Tellier, P.; *Synthése d'Images Réalistes: Simulation d'Éclairage Intérieur et Extérieur Mixte*; PhD These, Université de Rennes; 1993.

[Teo97] Teo, P.; Simoncelli, E.; Heeger, D.; *Efficient Linear Re-rendering for Interactive Lighting Design*; Technical Report; Department of Computer Science, Stanford University; 1997.

[Todd92] Todd, S.; Latham, W.; *Evolutionary Art and Computers*; Academic Press, London; 1992.

[Törn89] Törn, A.; Zilinskas, A.; *Global Optimization*; Lecture Notes in Computer Science; 350; Springer Verlag, Heidelberg; 1989.

[Tropp94] Tropp, C.; *Practically Oriented Software for Highly Realistic 3D Light Simulation*; LICHT; vol 7-8, pp 578-580; Pflaum Verlag; 1994.

[Veach94] Veach, E.; Guibas, L.; *Bidirectional Estimators for Light Transport*; Proceedings of the 5th EUROGRAPHICS Workshop on Rendering; pp 147-162; 1994.

[Veach97] Veach, E.; *Robust Monte Carlo Methods for Light Transport Simulation*; PhD Thesis, Stanford University; 1997.

[Veitch96] Veitch, J.; Newsham, G.; *Determinants of Lighting Quality I: State of the Science*; Conference of the Illuminating Engineering Society of North America; Cleveland; 1996.

[Veitch96b] Veitch, J.; Nesham, G.; *Expert's Quantitative and Qualitative Assessments of Lighting Quality*; Conference of the Illuminating Engineering Society of North America; Cleveland; 1996.

[Veitch99] Veitch, J.; Nesham, G.; *Preferred Luminous Conditions in Open-Plan Offices: Implications for Lighting Quality Recommendations*; Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada; 1999.

[Wallace87] Wallace, J.; Cohen, M.; Greenberg, D.; *A Two-Pass Solution to the Rendering Equation: A Synthesis of Ray Tracing and Radiosity Methods*; Computer Graphics (SIGGRAPH 87 Proceedings); vol 21, pp 311-320; 1987.

[Ward88] Ward, G.; Rubinstein, F.; Clear, R.; *A Ray Tracing Solution for Diffuse Interreflection*; Computer Graphics (SIGGRAPH 88 Proceedings); vol 22, pp 85-92; 1988.

[Ward88b] Ward, G.; Rubinstein, F.; *A New Technique for Computer Simulation of Illuminated Spaces*; Journal of The Illuminating Engineering Society; vol 17-1; 1988.

[Ward92] Ward, G.; Heckbert, P.; *Irradiance Gradients*; Proceedings of the 3rd EUROGRAPHICS Workshop on Rendering; Bristol; 1992.

[Ward92b] Ward, G.; *Measuring and Modeling Anisotropic Reflection*; Computer Graphics; Chicago; 1992.

[Ward94] Ward, G.; *The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System*; Computer Graphics (SIGGRAPH 94 Proceedings); pp 459-472; 1994.

[Ward94b] Ward, G.; *Applications of RADIANCE to Architecture and Lighting Design*; Journal of The Illuminating Engineering Society; pp 777-791; 1994.

[Ward96] Ward, G.; *Tools for Lighting Design and Analysis*; ACM SIGGRAPH'96 Course Notes CD-ROM, Global Illumination in Architecture and Entertainment; chapter 2, pp 1-13; 1996.

[Westin92] Westin, S.; Arvo, J.; Torrance, K.; *Predicting Reflectance Functions From Complex Surfaces*; Computer Graphics (SIGGRAPH 92 Proceedings); vol 26-4, pp 255-264; 1992.

[Whitted80] Whitted, T.; *An Improved Illumination Model for Shaded Display*; Communications of the ACM; vol 32-6, pp 343-349; 1980.

PUBLICAÇÕES DO AUTOR RELACIONADAS COM A TESE

PUBLICADAS EM LIVROS

[Costa99d] Costa, A.; Sousa, A. A.; Ferreira, F. N.; *Lighting Design: a Goal Based Approach Using Optimization*; Rendering Techniques' 99; pp 317-328, D. Lichinski & G. W. Larson (editors); Springer Computer Science, Springer Verlag; Viena; 1999.

PUBLICADAS EM *PROCEEDINGS* DE CONFERÊNCIAS

[Costa98] Costa, A.; Sousa, A. A.; Ferreira, F. N.; *Design de Iluminação*; 8º Encontro Português de Computação Gráfica; Coimbra; 1998 (apresentação de comunicação).

[Costa99a] Costa, A.; Sousa, A. A.; Ferreira, F. N.; A New Approach to Lighting Desig; Winter School of Computer Graphics 1999; pp 29-39; Plzen; 1999 (apresentação de comunicação).

[Costa99b] Costa, A.; Sousa, A. A.; Ferreira, F. N.; Lighting Design and Optimization; ICVC 1999; Goa; 1999.

[Costa99c] Costa, A.; Sousa, A. A.; Ferreira, F. N.; Lighting Design: a Goal Based Approach Using Optimization; 10th EUROGRAPHICS Workshop on Rendering; pp 325-336; Granada; 1999 (apresentação de comunicação).

[Costa00] Costa, A.; Sousa, A. A.; Ferreira, F. N.; Novos Métodos de Design de Iluminação; 9º Encontro Português de Computação Gráfica; Marinha Grande; 2000 (apresentação de comunicação).

ANEXOS

AVALIAÇÃO DE FUNÇÃO CUSTO

O algoritmo proposto no Capítulo 5 utiliza uma função custo para controlar a evolução da pesquisa de soluções de problemas de design de iluminação, representados por problemas de optimização global. A função custo é calculada através de um programa custo, no qual são incluídas as condições de design e os objectivos a atingir.

Dado supor-se que a função custo permanece inalterada durante a pesquisa de soluções, optou-se por criar uma representação em memória do programa custo, o que permite evitar a manipulação do ficheiro associado à função custo e resulta num ligeiro aumento de desempenho.

Foi efectuada uma implementação de um interpretador de programas custo baseada nas ferramentas de produção *flex* e *bison*. Um dos módulos implementa a análise lexical do programa custo, sendo a análise sintáctica realizada pelo módulo que contém a gramática da linguagem de programas custo. Foram acrescentados módulos que permitem a definição de funções matemáticas auxiliares na avaliação do programa custo, o que permite assim enriquecer os programas custo com funções matemáticas definidas pelo utilizador.

De seguida apresenta-se uma descrição da gramática da linguagem de interpretação e avaliação de programas custo (num formato semelhante a BNF).

```
program :=
  statement_list return_statement

statement_list :=
  statement
  statement_list statement

statement :=
  return_statement
  NAME = expression
  NAME = [ vector_expression ]
  IF ( expression ) statement
  IF ( expression ) { statement_list }
  PRINT ( TEXT )
  PRINTVAR ( expression )
  PRINTVAR [ vector_expression ]

return_statement :=
  RETURN expression

expression :=
  NUMBER
  NAME
  expression < expression
  expression > expression
  expression <= expression
  expression >= expression
  expression == expression
```

```
  expression AND expression
  expression OR expression
  ! expression
  expression + expression
  expression - expression
  expression * expression
  expression / expression
  - expression
  ( expression )
  NAME ( expression )
  NAME ( expression , expression )
  NAME ( expression , expression , expression )
  NAME [ vector_expression ]
  NAME [ vector_expression , vector_expression ]
  IMPORTANCE ( FNAME , expression
    , expression , expression , expression
    , expression , expression , expression )

vector_expression :=
  NAME
  ( expression , expression , expression )
  vector_expression + vector_expression
  vector_expression - vector_expression
  vector_expression * expression
  NAME [ vector_expression ]
  NAME [ vector_expression , vector_expression ]
```

Os símbolos não-alfanuméricos e as palavras maiúsculas representam símbolos terminais da linguagem. Os nomes de variáveis (terminal *NAME*) podem ser formados por letras, dígitos e alguns símbolos adicionais. Os números (terminal *NUMBER*) podem ser representados de várias formas. As cadeias de texto (terminal *TEXT*) são delimitadas por ". Os nomes de ficheiro (terminal *FNAME*) são delimitados por " ".

EXEMPLOS DE PROGRAMAS CUSTO

O programa custo *simple.cf* serve para calcular distribuições de importância com o objectivo de encontrar a melhor localização de uma luminária do tipo foco. A pesquisa está sujeita à restrição direccional seguinte: o ângulo entre o vector que liga a localização da luminária pretendida (x_1,x_2,x_3) e um ponto particular da cena (t_x,t_y,t_z) e o vector direcção da luminária (x_4,x_5,x_6) deve ser superior a 20°.

simple.cf

```
# ponto auxiliar (tx,ty,tz)
tx=-1.5
ty=-1.5
tz=0.8
# ltv - vector com origem em (x1,x2,x3) e fim em (tx,ty,tz)
ltv=[(tx-x1,ty-x2,tz-x3)]
# se o ângulo entre os vectores ltv e (x4,x5,x6) é inferior a 20º,
# rejeita-se esta solução
IF (angle[ltv,(x4,x5,x6)] < radian(20))
{
  PRINTVAR[(x1,x2,x3)]; PRINTVAR[(x4,x5,x6)]
  PRINT("huge"); PRINT('')
  # custo "infinito"
  RETURN HUGE
}
# ângulo superior ou igual a 20º
# determina-se a importância no ponto (x1,x2,x3) dentro do ângulo sólido
# com eixo (x4,x5,x6) e abertura 80º
i=importance("simple",x1,x2,x3,x4,x5,x6,80)
PRINTVAR[(x1,x2,x3)]; PRINTVAR[(x4,x5,x6)]
PRINTVAR(i); PRINT('')
# o custo é a importância determinada
RETURN i
```

O programa custo *nrc-down.cf* foi utilizado para determinar a solução final do problema descrito no Cenário 2 do Caso 4 (Capítulo 6). Nesse problema, pretende-se determinar a melhor localização de 6 luminárias do tipo área, junto ao tecto, sujeitas a uma disposição em arranjo rectangular. Os parâmetros de entrada neste programa custo são a posição junto ao tecto de uma luminária pretendida (x_1,x_2) e os espaçamentos ao longo de uma linha (x_3,x_4) e o espaçamento entre linhas do arranjo (x_5). Com estes parâmetros determinam-se univocamente todas as restantes luminárias pretendidas.

De seguida apresentam-se a versão não-optimizada, em que se determinam todas as importâncias nos pontos candidatos do ciclo de pesquisa, e a versão optimizada, na qual apenas se calculam as importâncias se o valor final de custo assim o justificar. Em problemas em que o valor de custo é a subtracção de dois ou mais efeitos contrários (ie, objectivos de design contrários), esta técnica de optimização, se for convenientemente utilizada, traduz-se geralmente em grandes reduções de tempo de processamento. Deste modo, evitam-se cálculos de transporte da luz desnecessários, os quais tendem a ser a fatia predominante no tempo total de processamento.

nrc-down.cf (versão não-optimizada)

```
# conversão de cm para m (discretização em unidades de 5cm)
x1=x1/20
x2=x3/20
x3=x3/20
x4=x4/20
x5=x5/20
# variáveis auxiliares
```

```
angle=80
d1=0.8
d2=0.4
th=0
th1=th/180*PI
th2=(th+90)/180*PI
v1x=d1*cos(th1)/2
v1y=d1*sin(th1)/2
v2x=d2*cos(th2)/2
v2y=d2*sin(th2)/2
z=2.2
dirx=0
diry=0
dirz=-1
of1=x3
of2=of1+x4
lz1=z
lz2=z
# importância da lum 1 (x1,x2,z)
x=x1
y=x2
lx1=x+v1x/2+v2x/2
ly1=y+v1y/2+v2y/2
lx2=lx1+v1x+v2x
ly2=ly1+v1y+v2y
L1=importance("ilum1",lx1,ly1,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum1",lx2,ly2,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
L2=importance("ilum2",lx1,ly1,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum2",lx2,ly2,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
# importância da lum 2 (x1+of1,x2,z)
x=x1+of1
y=x2
lx1=x+v1x/2+v2x/2
ly1=y+v1y/2+v2y/2
lx2=lx1+v1x+v2x
ly2=ly1+v1y+v2y
L1=L1+importance("ilum1",lx1,ly1,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum1",lx2,ly2,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
L2=L2+importance("ilum2",lx1,ly1,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum2",lx2,ly2,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
# importância da lum 3 (x1+of2,x2,z)
x=x1+of2
y=x2
lx1=x+v1x/2+v2x/2
ly1=y+v1y/2+v2y/2
lx2=lx1+v1x+v2x
ly2=ly1+v1y+v2y
L1=L1+importance("ilum1",lx1,ly1,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum1",lx2,ly2,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
L2=L2+importance("ilum2",lx1,ly1,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum2",lx2,ly2,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
# importância da lum 4 (x1,x5,z)
x=x1
y=x5
lx1=x+v1x/2+v2x/2
ly1=y+v1y/2+v2y/2
lx2=lx1+v1x+v2x
ly2=ly1+v1y+v2y
L1=L1+importance("ilum1",lx1,ly1,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum1",lx2,ly2,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
L2=L2+importance("ilum2",lx1,ly1,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum2",lx2,ly2,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
# importância da lum 5 (x1+of1,x5,z)
x=x1+of1
y=x5
lx1=x+v1x/2+v2x/2
```

```
ly1=y+v1y/2+v2y/2
lx2=lx1+v1x+v2x
ly2=ly1+v1y+v2y
L1=L1+importance("ilum1",lx1,ly1,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum1",lx2,ly2,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
L2=L2+importance("ilum2",lx1,ly1,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum2",lx2,ly2,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
# importância da lum 6 (x1+of2,x5,z)
x=x1+of2
y=x5
lx1=x+v1x/2+v2x/2
ly1=y+v1y/2+v2y/2
lx2=lx1+v1x+v2x
ly2=ly1+v1y+v2y
L1=L1+importance("ilum1",lx1,ly1,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum1",lx2,ly2,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
L2=L2+importance("ilum2",lx1,ly1,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum2",lx2,ly2,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
# o custo é a soma pesada dos tampos (L1) e das faces (-100*L2)
PRINTVAR(x1)
PRINTVAR(x2)
PRINTVAR(x1+of1)
PRINTVAR(x2)
PRINTVAR(x1+of2)
PRINTVAR(x2)
PRINTVAR(x1)
PRINTVAR(x5)
PRINTVAR(x1+of1)
PRINTVAR(x5)
PRINTVAR(x1+of2)
PRINTVAR(x5)
PRINTVAR(L1-100*L2)
PRINT('')
RETURN L1-100*L2
```

A versão optimizada distingue-se da anterior (não-optimizada) pelo facto de, em cada iteração, se determinarem primeiro todas as contribuições de importância de um dos tipos de objectivos radiométricos. Quando o valor de custo provisório da iteração em causa é inferior ao maior valor de custo previamente encontrado, não é necessário realizar cálculos de importância referentes aos objectivos radiométricos de natureza oposta, dado que estes objectivos irão forçosamente baixar o valor de custo dessa iteração, pelo que se torna impossível ultrapassar o maior valor de custo conhecido.

No entanto, quando o valor de custo provisório é superior ao maior valor de custo previamente encontrado, dever-se-á determinar sucessivamente cada contribuição de objectivo radiométrico e respectiva influência no valor de custo provisório. Se, em qualquer momento, o valor de custo provisório se tornar inferior ao maior valor de custo previamente encontrado, então podem abandonar-se os cálculos de importância e ignorar-se o conjunto de valores de parâmetros da iteração em causa.

Em contrapartida, se o valor de custo dessa iteração, no fim dos cálculos de importância, for superior ao maior valor de custo previamente conhecido, então isso significa que foi encontrado um novo conjunto de valores de parâmetros de pesquisa que maximiza a função custo.

Deste modo, somente quando é processado um conjunto de valores de parâmetros de pesquisa a que corresponde um novo máximo da função custo ou um valor próximo é que se realizam todos os cálculos de importância incluídos no programa custo. Por outro lado, conjuntos de valores de parâmetros de pesquisa que produzam valores de custo muito inferiores ao maior valor conhecido

tenderão a ser ignorados no início do processamento do programa custo, evitando-se assim cálculos de importância totalmente desnecessários.

nrc-down.cf (versão optimizada)

```
# x0 - melhor custo encontrado
# conversão de cm para m (discretização em unidades de 5cm)
x1=x1/20
x2=x2/20
x3=x3/20
x4=x4/20
x5=x5/20
# variáveis auxiliares
angle=80
d1=0.8
d2=0.4
th=0
th1=th/180*PI
th2=(th+90)/180*PI
v1x=d1*cos(th1)/2
v1y=d1*sin(th1)/2
v2x=d2*cos(th2)/2
v2y=d2*sin(th2)/2
z=2.2
dirx=0
diry=0
dirz=-1
of1=x3
of2=of1+x4
lz1=z
lz2=z
# lum 1
x=x1
y=x2
lx11=x+v1x/2+v2x/2
ly11=y+v1y/2+v2y/2
lx12=lx11+v1x+v2x
ly12=ly11+v1y+v2y
L1=importance("ilum1",lx11,ly11,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum1",lx12,ly12,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
# lum 2
x=x1+of1
y=x2
lx21=x+v1x/2+v2x/2
ly21=y+v1y/2+v2y/2
lx22=lx21+v1x+v2x
ly22=ly21+v1y+v2y
L1=L1+importance("ilum1",lx21,ly21,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum1",lx22,ly22,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
# lum 3
x=x1+of2
y=x2
lx31=x+v1x/2+v2x/2
ly31=y+v1y/2+v2y/2
lx32=lx31+v1x+v2x
ly32=ly31+v1y+v2y
L1=L1+importance("ilum1",lx31,ly31,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum1",lx32,ly32,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
# lum 4
x=x1
y=x5
lx41=x+v1x/2+v2x/2
ly41=y+v1y/2+v2y/2
lx42=lx41+v1x+v2x
ly42=ly41+v1y+v2y
L1=L1+importance("ilum1",lx41,ly41,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
```

```
   importance("ilum1",lx42,ly42,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
# lum 5
x=x1+of1
y=x5
lx51=x+v1x/2+v2x/2
ly51=y+v1y/2+v2y/2
lx52=lx51+v1x+v2x
ly52=ly51+v1y+v2y
L1=L1+importance("ilum1",lx51,ly51,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum1",lx52,ly52,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
# lum 6
x=x1+of2
y=x5
lx61=x+v1x/2+v2x/2
ly61=y+v1y/2+v2y/2
lx62=lx61+v1x+v2x
ly62=ly61+v1y+v2y
L1=L1+importance("ilum1",lx61,ly61,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum1",lx62,ly62,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
# terminar caso o custo provisório seja inferior ao máximo conhecido
IF (L1<x0) RETURN L1
C=L1
K=100
# lum 1
L2=importance("ilum2",lx11,ly11,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum2",lx12,ly12,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
C=C-K*L2
# terminar caso o custo provisório seja inferior ao máximo conhecido
IF (C<x0) RETURN C
# lum 2
L2=importance("ilum2",lx21,ly21,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum2",lx22,ly22,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
C=C-K*L2
# terminar caso o custo provisório seja inferior ao máximo conhecido
IF (C<x0) RETURN C
# lum 3
L2=importance("ilum2",lx31,ly31,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum2",lx32,ly32,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
C=C-K*L2
# terminar caso o custo provisório seja inferior ao máximo conhecido
IF (C<x0) RETURN C
# lum 4
L2=importance("ilum2",lx41,ly41,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum2",lx42,ly42,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
C=C-K*L2
# terminar caso o custo provisório seja inferior ao máximo conhecido
IF (C<x0) RETURN C
# lum 5
L2=importance("ilum2",lx51,ly51,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum2",lx52,ly52,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
C=C-K*L2
# terminar caso o custo provisório seja inferior ao máximo conhecido
IF (C<x0) RETURN C
# lum 6
L2=importance("ilum2",lx61,ly61,lz1,dirx,diry,dirz,angle)+
   importance("ilum2",lx62,ly62,lz2,dirx,diry,dirz,angle)
# o custo é a soma pesada dos tampos (L1) e das faces (-100*L2)
C=C-K*L2
# terminar caso o custo provisório seja inferior ao máximo conhecido
IF (C<x0) RETURN C
# foi encontrado um novo máximo da função custo
PRINTVAR(x1)
PRINTVAR(x2)
PRINTVAR(x1+of1)
PRINTVAR(x2)
PRINTVAR(x1+of2)
```

```
PRINTVAR(x2)
PRINTVAR(x1)
PRINTVAR(x5)
PRINTVAR(x1+of1)
PRINTVAR(x5)
PRINTVAR(x1+of2)
PRINTVAR(x5)
PRINTVAR(C)
PRINT('')
RETURN C
```