

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

APLICAÇÃO DA ANÁLISE INVERSA VIA OTIMIZAÇÃO EXTREMA GENERALIZADA
EM PROJETOS DE ILUMINAÇÃO

por

Fabiano Cassol

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, março de 2009.

APLICAÇÃO DA ANÁLISE INVERSA VIA OTIMIZAÇÃO EXTREMA GENERALIZADA
EM PROJETOS DE ILUMINAÇÃO

por

Fabiano Cassol
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Francis Henrique Ramos França

Comissão de Avaliação:

Prof^a. Dr^a. Maria Laura Martins Costa, UFF

Prof. Dr. Arno Krenzinger, UFRGS

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider, UFRGS

Prof. Dr. Horácio Antônio Vielmo
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, março de 2009.

“Tudo que somos é resultado do que pensamos”

Buda

RESUMO

O objetivo dos projetos de iluminação de interiores é determinar a posição e o poder luminoso das lâmpadas para satisfazer a condição de iluminância prescrita. Nesses projetos é especificado tanto o fluxo luminoso que se deseja obter na superfície de trabalho quanto o poder emissivo das demais superfícies, sendo que as fontes luminosas não possuem qualquer condição prescrita. Essas condições de contorno conhecidas do sistema em estudo muitas vezes não são suficientes para estabelecer um equacionamento, principalmente quando as informações disponíveis são originadas de condições hipotéticas. Dessa forma, esses problemas podem ser resolvidos como uma análise inversa de problemas convencionais. Projetos inversos são tipicamente formulados por um sistema de equações que, por ser na maioria das vezes mal-condicionado, exigem métodos especiais de solução, ou regularização, para a obtenção de respostas que são na maioria das vezes soluções aproximadas. A técnica de projetos inversos tem sido bem sucedida em problemas de transferência de calor radiante em cavidades com superfícies cinzas, ou seja, com propriedades radiantes independentes do comprimento de onda. Este trabalho estende a técnica inversa para a solução de problemas de radiação luminosa, mantendo a condição de superfície cinza, apresentando uma compilação de informações relevantes aos projetos de iluminação e promovendo uma integração dessa área do conhecimento com os conceitos clássicos de radiação térmica. É apresentada uma modelagem matemática do comportamento da radiação térmica aplicada à iluminação, juntamente com as características da visão humana e o comportamento das lâmpadas incandescentes, de modo a aplicar as relações de radiação em projetos de iluminação. A regularização do sistema de equações é realizada pelo método da Otimização Extrema Generalizada (GEO), classificado como um método de otimização estocástico de busca global. A metodologia aplicada a uma cavidade retangular tridimensional conduz a soluções satisfatórias, onde se destaca a possibilidade de parametrização do posicionamento das fontes de luz. A melhor solução ocorre com a condição de posicionamento e potência das lâmpadas variáveis.

ABSTRACT

“INVERSE ANALYSIS APPLIED VIA GENERALIZED EXTREMAL OPTIMIZATION IN DESIGN ILLUMINATION”

The objective of the illumination design is to determine the position and the luminous power of the lamps that are capable of providing a specified illumination. In the common methodologies, it is specified the luminous flux on the design surface both the emissive power of another walls, while the light sources are left unconstrained. The set of known boundary conditions for the case under study does not establish a well-posed system of equations, especially when the available information originates from measured data or conditions which are desired to be achieved. Then, these problems can be interpreted as inverse analysis of conventional problems. Inverse designs are typically formulated by an ill-conditioned system of equations, which requires special methods of solution, or regularization, to achieve approximated answers. The inverse design technique has proved a successful method to tackle the problem of radiative heat transfer in enclosures with gray wall, that is, having radiative properties that are independent of the wavelength. This work extends the inverse technique to illumination, keeping the condition of gray wall, showing a compilation of the relevant information for the illumination design, and integrating this area of knowledge to the well established concepts of thermal radiation. The mathematical modeling of the behavior of thermal radiation applied to illumination, together with the characteristics of the human vision and the behavior of incandescent lamps, are presented and incorporated into the inverse analysis. The regularization of the system of equations is carried out by the Generalized Extremal Optimization (GEO) method, classified as a method of stochastic global search optimization. The proposed methodology is applied to a three-dimensional enclosure, and leads to satisfactory results, including the determination of the light sources positions. The best solution was achieved when both the power and positions of the lamps were left unconstrained.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Motivação | 1 |
| 1.2. Objetivos | 3 |
| 1.3. Revisão Bibliográfica | 4 |
| 1.4. Organização do Trabalho | 7 |
| 2. FUNDAMENTOS DA ILUMINAÇÃO E DA RADIAÇÃO TÉRMICA..... | 8 |
| 2.1. Definições..... | 9 |
| 2.2. Superfícies Negras, Cinzas e Difusas..... | 12 |
| 2.3. Trocas Radiantes Entre Superfícies..... | 17 |
| 2.4. Trocas Radiantes em Cavidades: Método das Radiosidades | 20 |
| 2.5. Estratégia de Solução | 24 |
| 3. FUNDAMENTOS DA ILUMINAÇÃO | 28 |
| 3.1. Unidades Fundamentais da Iluminação..... | 28 |
| 3.2. O Sentido da Visão..... | 30 |
| 3.3. Iluminação Artificial - Lâmpadas | 32 |
| 3.3.1. Lâmpadas Incandescentes | 33 |
| 3.3.2. Demais Tipos de Lâmpadas | 38 |
| 3.4. Especificações de Iluminação | 38 |
| 3.5. Métodos Para Projeto de Iluminação | 40 |
| 4. SOLUÇÃO DE PROBLEMAS INVERSOS | 43 |
| 4.1. Métodos de Regularização | 44 |
| 4.2. Algoritmos de Otimização | 46 |
| 4.3. Método da Otimização Extrema Generalizada..... | 49 |
| 4.3.1. Aplicação do Algoritmo da Otimização Extrema Generalizada | 50 |
| 4.3.2. Variáveis e Restrições no Método da Otimização Extrema Generalizada..... | 52 |
| 5. METODOLOGIA DE SOLUÇÃO | 54 |
| 5.1. Formulação do Problema | 56 |
| 5.2. Pós-Processamento | 58 |
| 6. RESULTADOS | 60 |
| 6.1. Independência de Malha..... | 60 |
| 6.2. Resultados de Métodos Tradicionais..... | 62 |
| 6.3. Projeto Inverso de Iluminação..... | 65 |

| | |
|--|----|
| 6.3.1. Determinação do parâmetro τ | 66 |
| 6.3.2. Solução do método inverso | 68 |
| 6.3.3. Otimização de posições e potências | 71 |
| 6.3.4. Avaliação dos Resultados..... | 73 |
| 6.3.5. Comparação entre método inverso e método tradicional..... | 74 |
| 6.3.6. Comparação entre método inverso e busca direta..... | 75 |
| 6.3.7. Tempo computacional e considerações finais..... | 76 |
| 7. CONCLUSÕES..... | 78 |
| 7.1. Sugestões para Trabalhos Futuros..... | 79 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 80 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------|---|
| A | Área [m ²] |
| A | Função [-] |
| \mathbf{A} | Matriz de coeficientes [-] |
| a | Elementos da matriz \mathbf{A} [-] |
| a | Coefficiente adimensional [adimensional] |
| \mathbf{b} | Vetor independente [-] |
| b | Elementos do vetor \mathbf{b} [-] |
| b | Coefficiente adimensional [adimensional] |
| bal | Balanco relativo global [adimensional] |
| C | Configuração de bits [adimensional] |
| C_1 | Constante de radiação [W·μm ⁴ /m ² ·sr] |
| C_2 | Constante de radiação [μm·K] |
| c | Velocidade [m/s] |
| c | Coefficiente adimensional [adimensional] |
| c_o | Velocidade da luz [m/s] |
| bal | Valor do balanço global de energia da solução [adimensional] |
| bn | Banda, intervalo discreto do espectro [-] |
| d | Coefficiente adimensional [adimensional] |
| $desvio$ | Valor do desvio da solução [adimensional] |
| e | Poder emissivo [W/m ²] |
| $erro$ | Valor de erro considerado na solução [adimensional] |
| F | Fator de forma [adimensional] |
| F | Função [-] |
| f | Função [-] |
| g | Função [-] |
| h | Constante de Planck [J·s] |
| h | Função [-] |
| I | Corrente elétrica [A] |
| i | Intensidade de radiação [W/m ² ·μm] |
| j | Superfície qualquer de uma cavidade [-] |
| jd | Superfície de projeto [-] |
| jl | Superfície de lâmpadas [-] |

| | |
|--------------|---|
| j_w | Superfície de parede [-] |
| k | Constante de Boltzmann [J/K] |
| k | Superfície qualquer de uma cavidade [-] |
| L | Variável qualquer [-] |
| l_i | Indica o próximo número inteiro à dada variável [-] |
| M | Número de equações [-] |
| m | Número de bits [adimensional] |
| N | Número de incógnitas [-] |
| n | Número de lâmpadas [-] |
| P | Potência elétrica [W] |
| P | Função [-] |
| p | Precisão [adimensional] |
| Q | Iluminância ou Fluxo adimensional [adimensional] |
| q | Taxa de energia [W] |
| q'' | Iluminância ou Fluxo radiante [lx, W/m ²] |
| q''_i | Irradiação [W/m ²] |
| q''_o | Radiosidade [W/m ²] |
| q''_r | Fluxo radiante [W/m ²] |
| R | Resistência elétrica [Ω] |
| r | Raio ou distância [m] |
| S | Distância entre duas superfícies [m] |
| s | Variável qualquer [-] |
| T | Temperatura [K] |
| t | Variável qualquer [-] |
| t | Tempo [s] |
| U | Tensão elétrica [V] |
| U | Conjunto numérico [-] |
| u | Variável qualquer [-] |
| V | Tensão elétrica [adimensional] |
| V | Função objetivo [-] |
| V_λ | Eficiência luminosa fotópica [s ⁻¹] |
| X | Comprimento [m] |
| \mathbf{x} | Vetor solução [-] |
| x | Posição relativa no comprimento [adimensional] |

| | |
|-------|--|
| x | Variável qualquer [-] |
| x^T | Conjunto numérico [-] |
| Y | Largura [m] |
| y | Posição relativa na largura [adimensional] |
| Z | Altura [m] |
| z | Posição relativa na altura [adimensional] |

SÍMBOLOS GREGOS

| | |
|---------------|--|
| α | Absortividade [adimensional] |
| α | Parâmetro de regularização [adimensional] |
| β | Norma das linhas na matriz \mathbf{A} [-] |
| γ | Número da iteração [adimensional] |
| δ | Variável qualquer [-] |
| Δ | Diferença entre variável inicial e final [-] |
| ε | Emissividade [adimensional] |
| ζ | Critério de convergência [adimensional] |
| η | Fator de utilização [adimensional] |
| θ | Ângulo zenital [rad] |
| ι | Número total de superfícies que formam uma cavidade [adimensional] |
| κ | Índice do recinto [adimensional] |
| λ | Comprimento de onda [m] |
| ν | Frequência de radiação [V] |
| ξ | Erro admitido [adimensional] |
| π | Constante pi [adimensional] |
| ρ | Refletividade [adimensional] |
| ρ | Variável qualquer [-] |
| τ | Transmissividade [adimensional] |
| τ | Parâmetro de regularização [adimensional] |
| φ | Ângulo azimutal [rad] |
| Φ | Fluxo radiante da lâmpada [lm] |
| ω | Ângulo sólido [sr] |
| Π | Fator de depreciação [adimensional] |
| Ω | Função [-] |

SUBÍNDICES

| | |
|---------------|---|
| <i>a</i> | Quantidade absorvida por uma superfície |
| <i>bn</i> | Grandeza na faixa de uma banda espectral genérica |
| <i>bnf</i> | Limite no fim da banda considerada |
| <i>bni</i> | Limite no início da banda considerada |
| <i>CN</i> | Relativo ao corpo negro |
| <i>d</i> | Superfície de projeto |
| <i>e</i> | Quantidade emitida por uma superfície |
| <i>fil</i> | Filamento da lâmpada incandescente |
| <i>i</i> | Quantidade incidente em uma superfície |
| <i>i</i> | Referente à configuração atual |
| <i>i_inf</i> | Referente ao limite inferior |
| <i>i_sup</i> | Referente ao limite superior |
| <i>i_b10</i> | Indica variável binária |
| <i>j</i> | Elemento de superfície |
| <i>jd</i> | Elemento da superfície de projeto |
| <i>jl</i> | Elemento da superfície de lâmpada |
| <i>jw</i> | Elemento da superfície de parede |
| <i>k</i> | Elemento de superfície |
| <i>L</i> | Lâmpada |
| <i>l</i> | Lâmpada |
| <i>melhor</i> | Referente à melhor configuração |
| <i>médio</i> | Referente ao valor médio |
| <i>máximo</i> | Referente ao valor máximo |
| <i>N</i> | Direção normal à direção considerada |
| <i>o</i> | Quantidade que deixa uma superfície |
| <i>op</i> | Grandeza no ponto de operação |
| <i>parede</i> | Superfície de parede |
| <i>piso</i> | Superfície de piso |
| <i>r</i> | Quantidade líquida em uma superfície |
| <i>ref</i> | Valor de referência ou prescrito |
| <i>S</i> | Ligação em série no circuito elétrico |
| <i>teto</i> | Superfície de teto |

| | |
|--------------|--|
| <i>total</i> | Valor total |
| <i>w</i> | Parede |
| θ | Dependência da orientação do ângulo sólido $d\omega$, definida por θ e φ (por simplicidade é ocultado φ no subíndice) |
| λ | Dependência do comprimento de onda |
| λ_i | Início do comprimento de onda |
| λ_f | Final do comprimento de onda |

SUPERÍNDICES

| | |
|------------------|------------------------------|
| <i>atual</i> | Referente ao valor atual |
| <i>anterior</i> | Referente ao valor anterior |
| <i>direto</i> | Referente ao método direto |
| <i>inverso</i> | Referente ao método inverso |
| <i>(l)</i> | Quantidade luminosa |
| <i>req</i> | Quantidade requerida |
| <i>(W)</i> | Quantidade radiante |
| <i>prescrito</i> | Referente ao valor prescrito |

ABREVIATURAS

| | |
|------|--|
| CG | <i>Conjugated Gradient</i> - Gradiente Conjugado |
| EO | <i>Extremal Optimization</i> – Otimização Extrema |
| GEO | <i>Generalized Extremal Optimization</i> - Otimização Extrema Generalizada |
| LM | <i>Levenberg-Marquardt</i> |
| PCA | <i>Particle Collision Algorithm</i> – Algoritmo de colisões de partículas |
| SI | Sistema Internacional de Unidades |
| SOC | <i>Self-Organized Criticality</i> - Criticalidade Auto-Organizada |
| TSVD | <i>Truncated Singular Value Decomposition</i> - Decomposição por Valores Singulares Truncada |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1. O espectro eletromagnético [NASA, 2008]..... | 9 |
| Figura 2.2. Intensidade de radiação do elemento de área dA através do ângulo sólido $d\omega$ [Seewald, 2006]..... | 9 |
| Figura 2.3. Radiosidade de uma superfície [Incropera e DeWitt, 2003]..... | 12 |
| Figura 2.4. Comparação entre a emissão superficial de um corpo negro e a de uma superfície real [Incropera e DeWitt, 2003]..... | 13 |
| Figura 2.5. Energia incidente em um elemento de área. | 15 |
| Figura 2.6. Cavidade composta por N superfícies. | 18 |
| Figura 2.7. Abordagens de balanço energético em uma superfície..... | 22 |
| Figura 2.8. Planos de um sistema bem condicionado 3x3 com determinante normalizado igual a 0,8 [Seewald, 2006]..... | 26 |
| Figura 3.1. Definição de candela [Seewald, 2006]. | 29 |
| Figura 3.2. Seção transversal do olho humano [Iida, 1990]..... | 30 |
| Figura 3.3. Eficiência luminosa fotópica para diferentes comprimentos de onda. | 32 |
| Figura 3.4. Efeito da temperatura na emissividade hemisférica total de vários metais e um dielétrico [Gubareff <i>et al.</i> , 1960]. | 33 |
| Figura 3.5. Emissão de um filamento de tungstênio de uma lâmpada incandescente em comparação com a emissão do corpo negro, ambos a 3000 K [IESNA, 2000]..... | 34 |
| Figura 3.6. Variação da vida útil e fluxo luminoso de lâmpadas de filamento de tungstênio de acordo com a tensão aplicada [Ryer, 1997]..... | 36 |
| Figura 3.7. Circuito para reduzir potência luminosa de lâmpadas [Seewald, 2006]..... | 37 |
| Figura 4.1. Fluxograma do processo de cálculo direto. | 43 |
| Figura 4.2. Comparação entre problema direto e inverso [Braga Filho, 2002]..... | 45 |
| Figura 4.3. Idéia básica do método de regularização [Campos Velho, 2002]..... | 46 |
| Figura 4.4. Algumas técnicas numéricas para uso em problemas de otimização [De Sousa, 2003]. | 48 |
| Figura 4.5. N variáveis de projeto codificadas em uma seqüência binária [De Sousa, 2003]. | 50 |
| Figura 5.1. Cavidade considerada no problema. | 54 |
| Figura 6.1. Planos de simetria considerados na cavidade. | 60 |
| Figura 6.2. Iluminância obtida com diferentes malhas para dois pontos localizados na superfície da cavidade. | 62 |
| Figura 6.3. Arranjo para instalação de 48 lâmpadas segundo o Método dos Lúmens. | 63 |

| | |
|--|----|
| Figura 6.4. Iluminância na superfície de projeto para um arranjo de 48 lâmpadas. (a) De acordo com o método direto. (b) De acordo com o programa WinElux [EEE, 2008]. | 64 |
| Figura 6.5. Menor valor para a função erro F após $NFOB = 10^5$ em função de τ . Média de 50 execuções independentes. | 67 |
| Figura 6.6. Evolução do melhor valor da função erro F em função de $NFOB$, para 50 execuções. | 69 |
| Figura 6.7. Resultado para 8 lâmpadas, de acordo com a simetria considerada. (a) Iluminância na superfície de projeto. (b) Configuração das lâmpadas no teto. | 69 |
| Figura 6.8. Resultado para 9 lâmpadas, de acordo com a simetria considerada. (a) Iluminância na superfície de projeto. (b) Configuração das lâmpadas no teto. | 70 |
| Figura 6.9. Resultado para 10 lâmpadas, de acordo com a simetria considerada. (a) Iluminância na superfície de projeto. (b) Configuração das lâmpadas no teto. | 70 |
| Figura 6.10. Resultado para 11 lâmpadas, de acordo com a simetria considerada. (a) Iluminância na superfície de projeto. (b) Configuração das lâmpadas no teto. | 70 |
| Figura 6.11. Resultado para 12 lâmpadas, de acordo com a simetria considerada. (a) Iluminância na superfície de projeto. (b) Configuração das lâmpadas no teto. | 71 |
| Figura 6.12. Menor valor para a função erro F após $NFOB = 10^5$ em função de τ . Média de 50 execuções independentes. | 72 |
| Figura 6.13. Evolução do melhor valor da função erro F em função de $NFOB$, para 50 execuções. $\tau = 1,00$. | 72 |
| Figura 6.14. Resultado para uma configuração de 10 lâmpadas com posição e potência variáveis, de acordo com a simetria considerada. (a) Iluminância na superfície de projeto. (b) Configuração das lâmpadas no teto. | 73 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1. Grandezas de iluminação com suas unidades e símbolos. | 30 |
| Tabela 3.2. Cores do espectro visível..... | 31 |
| Tabela 3.3. Catálogo de lâmpadas incandescentes [OSRAM, 2005]..... | 35 |
| Tabela 3.4. Dados calculados com base nas informações do catálogo [Seewald, 2006]. | 35 |
| Tabela 3.5. Iluminância por classe de tarefas visuais da norma NBR5413 [ABNT, 1992]..... | 39 |
| Tabela 3.6. Variáveis de projeto para o Método dos Lúmens..... | 40 |
| Tabela 6.1. Variáveis do projeto proposto para aplicação dos testes iniciais. | 61 |
| Tabela 6.2. Características das diferentes malhas testadas. | 61 |
| Tabela 6.3. Variáveis e restrições impostas no método GEO. | 66 |
| Tabela 6.4. Resultados para as diversas configurações de lâmpadas..... | 69 |
| Tabela 6.5. Configuração de 40 lâmpadas com posições e potências variáveis. | 73 |
| Tabela 6.6. Comparação entre diversas resoluções para o problema de iluminação. | 74 |
| Tabela 6.7. Validação do método inverso através do método de busca direta, para 1, 2 e 3 lâmpadas, considerando a simetria aplicada..... | 76 |

1. INTRODUÇÃO

O posicionamento de fontes radiantes para iluminação (juntamente com a especificação de sua potência) pode ter seu equacionamento baseado tanto em cálculos simples como o Método dos Lúmens como em teorias mais elaboradas como as utilizadas nos cálculos da radiação térmica. Para um aperfeiçoamento de equipamentos e sistemas já existentes é necessário um estudo mais aprofundado do fenômeno de iluminação, baseado no processo de transferência radiante. A complexidade dos cálculos de radiação e a evolução dos sistemas computacionais estimulam o desenvolvimento de soluções numéricas, que por sua vez auxiliam em relação à precisão e ao tempo de cálculo. No presente trabalho, com base nos problemas inversos, utilizaremos das equações da radiação térmica, juntamente com o método da Otimização Extrema Generalizada (GEO) para solucionar o problema de iluminação na superfície de trabalho.

1.1. Motivação

Nos projetos de iluminação sempre prevalece o objetivo do conforto visual, para que as pessoas possam exercer suas atividades com um bom desempenho. Para isso é necessário considerar as implicações físicas, fisiológicas e cognitivas decorrentes de determinadas condições de iluminação. Alterando apenas a iluminação, é possível criar ambientes com condições propícias para estimular diferentes comportamentos tais como criatividade, concentração e relaxamento.

Se as condições de conforto visual não forem atendidas, diversos sintomas fisiológicos podem aparecer, tais como olhos vermelhos, irritadiços e lacrimejantes. Em casos mais avançados, ainda podem ocorrer dores de cabeça e problemas gastrintestinais. Uma reação bastante comum em ambientes que propiciam uma dificuldade visual é o observador curvar-se para se aproximar do objeto em foco, levando os músculos que envolvem a visão a se ajustarem para manter a imagem do objeto focada na retina, gerando diretamente a fadiga destes músculos. Indiretamente ainda é possível citar dores corporais devido à má postura.

O desconforto visual também pode ser identificado quando, por exemplo, se dirige sob forte chuva ou neblina, onde o sistema visual procura pela informação que não está acessível ao campo de visão, mas que em certos momentos aparece subitamente exigindo uma resposta rápida, ou quando objetos brilhantes (ou piscantes) são detectados pela visão periférica. Caso o

observador conclua não ter interesse nestes objetos, os mesmos passam a ser fontes de dificuldade visual, pois persistem no campo de visão causando distração.

Estudos feitos por IESNA, 2000, nos mostram os efeitos da distribuição espacial de luz sobre a escolha dos locais que clientes de uma cafeteria preferem para sentar. O comportamento observado é de que as pessoas escolhem sempre locais de frente para áreas claras. Quando as áreas escuras se tornam claras, e vice-versa, a escolha migra sempre para a área mais clara.

Na medicina, tratamentos com exposição à luz em cabines sob condições de radiação controladas apresentam bons resultados no tratamento de doenças como psoríase, vitiligo, linfomas cutâneos, icterícia neo-natal, entre outras [CDEF, 2008]. Este tratamento, denominado fototerapia, expõe os pacientes à radiação controlada em sessões semanais e o tempo de tratamento depende do grau de melhora das lesões. A fototerapia é utilizada também no tratamento de distúrbios de sono, apetite, humor e depressão sazonal. Os pacientes são tratados com exposição à luz brilhante por curtos períodos durante o dia, e, diferentemente dos tratamentos dermatológicos citados, este se dá pela incidência de iluminação nos olhos. A fototerapia proporciona melhora nos sintomas em 80% dos casos [Mental Help, 2008].

Na produção rural, experimentos em aviários demonstram que sistemas de iluminação devidamente dimensionados favorecem a produção [Jordan e Tavares, 2005]. As plantas também sofrem grande influência dos níveis de iluminação a que estão sujeitas. O crescimento das mesmas é definido pela intensidade e direção das fontes luminosas, determinando a inclinação de caules e troncos, o ciclo de respiração vegetal e a geração de frutos [Cavichioli *et al.*, 2006].

Na engenharia, a uniformidade espacial e temporal dos níveis de iluminação são fatores de grande importância em ensaios de desempenho de painéis fotovoltaicos. O projeto de uma câmara de ensaio deve garantir tal uniformidade com um desvio máximo especificado, sendo que o não atendimento destes requisitos pode levar a resultados sem validade por não permitir a comparação de desempenho entre painéis [Vera *et al.*, 2006].

Considerando casos envolvendo a radiação térmica, é possível citar os fornos para tratamento térmico, utilizados em aplicações diversas como cura de materiais (colas, plásticos, cerâmicas, etc.), secagem, preparação de alimentos, etc. Estudos visando a uniformidade no processo de reaquecimento de placas de aço, de forma que elas tenham as propriedades mecânicas e metalúrgicas requeridas para sua laminação, são feitos por Teixeira *et al.*, 2007, através de melhorias em controladores dinâmicos de temperatura e de vazão. Com o mesmo objetivo, mas visando determinar a melhor configuração dos aquecedores, Salgado, 2004, faz uma análise de possíveis configurações nos aquecedores com o auxílio de softwares comerciais envolvendo uma solução do tipo tentativa-e-erro. Essas otimizações visam além da obtenção das

propriedades requeridas do aço para o processo também uma economia nos recursos energéticos, e para os aquecedores que utilizam combustíveis fósseis, também uma diminuição nas emissões de poluentes.

Considerando outras formas de radiação, as ondas de rádio e telefonia, utilizadas em processos de transmissão de sinais, também possuem sua importância. Estudos abordando o problema de localização de antenas, visando uma máxima cobertura, são feitos por Hoffmann *et al.*, 2003, utilizando Algoritmos Genéticos e outras técnicas de otimização. Da mesma forma, utilizando Algoritmos Genéticos, Silva, 2006, enfatiza a importância nos arranjos de antenas para estações de rádio base, sistemas de radares e satélites, e a necessidade de utilização de ferramentas computacionais para sistemas de otimização com características não-lineares. Ainda temos os equipamentos de raio-x, que são ondas de alta frequência e de alta penetração, utilizados na medicina e na metrologia para verificação de peças, os equipamento de microondas, utilizados para aquecer alimentos através da excitação das moléculas, e o raio laser, utilizado em aplicações médicas (cirurgias), na reabilitação física como anti-inflamatórios, regenerador e analgésico, em processos industriais (cortar metais, medir distâncias), na pesquisa científica (física atômica, óptica quântica), em setores comerciais de transmissão de dados (fibras ópticas), e até mesmo em nossas casas (aparelhos de CD e DVD).

1.2. Objetivos

Com uma proposta de resolução do problema de radiação através de métodos inversos, envolvendo superfícies cinzas e difusas, deseja-se determinar o arranjo e o fluxo luminoso de determinado número de lâmpadas, de forma a propiciar uma condição de iluminação prescrita na superfície de trabalho. Dentro dessa proposta serão avaliados a posição, o número de lâmpadas e o fluxo luminoso necessários para satisfazer às condições propostas. Ainda referente ao fluxo luminoso, serão consideradas situações com potências uniformes ou individuais (todas as lâmpadas com a mesma potência ou cada uma com uma potência diferente). O método da Otimização Extrema Generalizada (GEO) será empregado como forma de regularização do sistema de equações mal-condicionadas.

Como objetivo secundário, pretende-se fazer uma revisão da radiação térmica aplicada ao campo de iluminação, verificando os métodos empregados e os resultados capazes de apresentar. Pretende-se ainda apresentar alguns resultados encontrados em projetos de iluminação já realizados, com o objetivo de comparar metodologias, e, de certa forma, determinar em que sentido podem-se melhorar os resultados, e evoluir nas questões que envolvem esses problemas.

1.3. Revisão Bibliográfica

Procedimentos para cálculos de iluminação são muito encontrados em diversos estudos, principalmente em estudos arquitetônicos, visando uma melhor utilização dos recursos de iluminação, sejam eles naturais ou artificiais. Para o cálculo do fluxo luminoso em interiores, utilizando luz natural, podem-se citar os estudos feitos por Garrocho e Amorim, 2004, o qual nos mostra a importância de focar a questão energética, para aperfeiçoar o uso de luz natural, e propõe a utilização de simulação computacional, a fim de que o projetista alcance uma ótima iluminação. Recursos computacionais para simular a luz natural são utilizados também nos estudos feitos por Papst *et al.*, 1998, e Tavares, 2007, onde o primeiro tem por objetivo conhecer a entrada de luz através de aberturas externas, nas diversas horas do dia e do ano, e com isto desenvolver uma metodologia de análise da quantidade e da distribuição da luz natural nos ambientes, e o segundo tem por objetivo popularizar as ferramentas computacionais no meio, simulando tanto a iluminação natural quanto a artificial em edifícios, e indicando qual a melhor opção de software e de configurações para cada situação de projeto. Nesses estudos, foram utilizados softwares comerciais, sendo que para o primeiro foi utilizado o software “Lúmen Micro”, e o segundo utilizou os softwares “ECOTECT” e “Lúmen Designer”.

Utilizando luz artificial, o Método dos Lúmens é uma forma prática de se calcular uma configuração de luminárias para atender às restrições de projeto. Este método é apresentado pelo catálogo Philips, 1981, na forma de um manual de procedimentos, e mais recentemente em IESNA, 2000, e OSRAM, 2005, também na forma de manual. Baseado no Método dos Lúmens, Ghisi e Lamberts, 1998, verificaram a influência das características reflexivas dos refletores de luminárias e da refletância das paredes de acordo com a potência dos sistemas de iluminação, para demonstrar a relação existente entre as mesmas e a eficiência do método.

Utilizando métodos computacionais, e seguindo o mesmo raciocínio do Método dos Lúmens, Souza e Bianchi, 2004, desenvolveram um software, baseado na interface “MS-DOS”, que permite fazer o cálculo das distribuições das fontes de luz no ambiente e as distâncias entre elas, contando com um banco de dados com diversos tipos de lâmpadas e luminárias, que o usuário pode escolher para desenvolver o projeto. De forma mais elaborada, o programa “WinElux”, apresentado por EEE, 2008, permite que o usuário selecione e posicione as lâmpadas no teto, e caso deseje atingir um iluminância prescrita na superfície de trabalho, o programa efetua um cálculo que dimensiona a quantidade de lâmpadas a ser utilizada, através do Método dos Lúmens. Em um ambiente gráfico amigável, o programa calcula o iluminância da

superfície de trabalho e apresenta os resultados em um gráfico de superfície. Segundo EEE, 2008, o método utilizado para o cálculo da iluminância é denominado ponto-a-ponto, no qual a iluminação de um ponto é determinada através de ângulos de incidência.

O Método dos Lúmens é baseado em uma formulação algébrica, na qual o fluxo luminoso gerado pelas lâmpadas instaladas no teto deve ser igual ao fluxo luminoso desejado no plano de trabalho. No entanto, não há como assegurar que a configuração encontrada gera o fluxo luminoso correto ou que haja uniformidade deste fluxo ao longo do plano de trabalho, pois não se pode afirmar que um conjunto de lâmpadas, com um determinado fluxo radiante, atenda a iluminância planejada, já que há diversos fatores de perda envolvidos, principalmente perdas por meio das absorções de radiação luminosa nas paredes, e também devido ao comportamento não-linear da radiação em cavidades.

Na tentativa de resolver os problemas identificados no Método dos Lúmens, várias propostas numéricas podem ser encontradas. Costa *et al.*, 2000, aborda o design de iluminação baseado no método de análise inversa, o qual apresenta claras vantagens sobre os métodos baseados na tentativa-e-erro. O algoritmo proposto deriva das soluções de algoritmos de otimização e das equações do transporte de luz, onde uma implementação foi efetuada com o pacote de simulação do transporte de luz denominado comercialmente por “Radiance” e pelo pacote de otimização global “ASA”, o qual é baseado no método de otimização global *Simulate Annealing* (Recozimento Simulado). Segundo Costa *et al.*, 2000, o programa utiliza modelos ópticos que simulam ambientes reais, permitindo desta forma utilizar objetos de iluminação (representando mesas, cadeiras, computadores e divisórias), incorporando-os nos dados de entrada, e assim obtendo resultados mais próximos da realidade.

De forma similar, usando o método de análise inversa, Smith Schneider e França, 2004, e posteriormente Seewald, 2006, propõem resolver o problema de iluminação, utilizando das equações de radiação em cavidades, e empregando o método TSVD (*Truncated Singular Value Decomposition*) para a regularização do sistema de equações. Esses trabalhos têm por objetivo determinar o fluxo luminoso em um arranjo de lâmpadas, propiciando uma condição de iluminação prescrita na superfície de trabalho. Ainda nesta linha, Mossi *et al.*, 2007, utiliza das mesmas técnicas de solução (análise inversa e equações de radiação), mas utiliza do algoritmo da Otimização Extrema Generalizada (GEO) para regularizar o sistema de equações. Métodos de otimização aplicados à metodologia inversa, tais como os métodos de minimização Quase-Newton e Recozimento Simulado, foram utilizados por Daun *et al.*, 2006, com o objetivo de compará-los, e relacionar suas vantagens e desvantagens.

Sabendo que a luz visível é uma radiação eletromagnética, envolvendo uma faixa de comprimentos de onda, pode-se considerar o problema de iluminação como sendo um problema de radiação térmica. Dessa forma, em cavidades radiantes formadas por superfícies cinzas, nas quais as propriedades não são dependentes do comprimento de onda, é possível trabalhar com a equação de Planck em sua forma integrada, o que torna linear o sistema de equações no poder emissivo total. Kudo *et al.*, 1996, utilizou o projeto inverso para determinar a distribuição das fontes de forma a satisfazer uma condição prescrita nas superfícies de uma cavidade bidimensional. Foi verificado que grande parte das fontes deveriam se localizar nos cantos da cavidade. A solução apresentou oscilações indesejáveis, que foram atenuadas por métodos de regularização. Howell *et al.*, 2003, utilizou métodos de regularização em cavidades formadas por superfícies cinzas e propôs um esquema para otimização da geometria, onde, com diferentes exemplos, determina de forma inversa as propriedades das superfícies, as condições de contorno e a geometria da cavidade.

Partindo da idéia que a formulação do problema proposto é tipicamente um problema inverso (o único dado conhecido é o iluminância que se deseja obter), o sistema de equações a ser resolvido apresenta-se geralmente como mal-condicionado, e os métodos convencionais de solução de sistemas lineares não são capazes de solucionar satisfatoriamente o problema, sendo necessário utilizar métodos de regularização (métodos especiais de solução). Hansen, 1998, apresenta uma descrição de métodos disponíveis para solucionar problemas mal-condicionados. França *et al.*, 2002, aplicam alguns desses métodos a problemas inversos na radiação térmica e compara o desempenho obtido. De acordo com Daun *et al.*, 2006, os métodos de regularização mais comumente utilizados são o Tikhonov, o TSVD e o CG (Conjugated Gradient ou Gradiente Conjugado). Em Daun *et al.*, 2006, esses três métodos são aplicados a uma mesma cavidade radiante, o que possibilitou compará-los. O método CG consumiu um menor tempo computacional, mas é restrito a sistemas com número de equações igual ao número de incógnitas. O método Tikhonov gerou soluções mais suaves, proporcionando ao projetista um melhor controle do parâmetro de regularização, por outro lado, os autores declararam ser complexo determinar esse parâmetro. O método TSVD demandou o maior tempo computacional, entretanto esse método permite uma percepção apurada do grau de mal-condicionamento do problema em questão, o que o torna mais vantajoso em relação aos outros. Gamba *et al.*, 2002, e Gamba *et al.*, 2003, validou os resultados obtidos por esses métodos de regularização através de uma comparação com resultados experimentais. Outras formas de solução, como uma combinação dos métodos *Particle Collision Algorithm* (PCA) e *Levenberg-Marquardt* (LM), aplicados ao método inverso, foram utilizados por Knupp *et al.*, 2007, para a determinação das

propriedades radiantes em meios participantes unidimensionais. Métodos alternativos aos apresentados para tratar de problemas inversos são abordados por Silva Neto e Moura Neto, 2005.

1.4. Organização do Trabalho

Este trabalho se divide em sete capítulos. No Capítulo 2, são apresentados os fundamentos básicos para a construção deste trabalho. Estão detalhados os conceitos básicos e as equações que coordenam os fenômenos da radiação térmica, sendo este o princípio para a iluminação. Ainda apresenta o método para a solução de transferência de calor em cavidades radiantes, que será usado na solução do problema proposto. A abordagem direta de cavidades é apresentada juntamente com as hipóteses feitas.

No Capítulo 3 são descritos os conceitos próprios de iluminação, o modo como a visão interpreta a parcela visível do espectro eletromagnético, uma modelagem de lâmpadas incandescentes, aplicações típicas e métodos utilizados para projetos de iluminação artificial.

O Capítulo 4 descreve algumas características dos problemas inversos. É apresentado o algoritmo estocástico de otimização denominado Otimização Extrema Generalizada, o qual regulariza o sistema de equações possibilitando a obtenção de resultados para a análise inversa.

No Capítulo 5, é apresentada a metodologia proposta para resolver o problema inverso em cavidades radiantes com superfícies cinzas.

O Capítulo 6 apresenta os resultados para um caso típico de cavidade radiante. É adotado um ambiente com dimensões e propriedades bem conhecidas no qual se deseja determinar um arranjo adequado para otimizar o nível de iluminação. Também são feitas comparações dos resultados obtidos.

No Capítulo 7, por fim, estão as conclusões e as perspectivas para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTOS DA ILUMINAÇÃO E DA RADIAÇÃO TÉRMICA

Diferentes áreas do conhecimento se complementam para possibilitar o entendimento dos problemas de iluminação, por isso se faz necessária a apresentação de conceitos que envolvem a radiação térmica, as particularidades da visão humana, e os fenômenos físicos pelo qual a luz é gerada nas lâmpadas, a fim de estabelecer um método para resolvê-lo.

A radiação térmica caracteriza-se por ser a energia radiante emitida por todos os corpos com temperatura superior ao zero absoluto, e, ao contrário dos outros métodos de transferência de calor, a radiação térmica não exige a presença de um meio material intermediário para se propagar. O mecanismo de propagação da radiação ainda não está completamente compreendido, mas diversas teorias já foram propostas com o intuito de explicar o processo, como por exemplo, a teoria eletromagnética de Maxwell, e a teoria quântica de Max Planck.

Tratando a radiação como uma onda eletromagnética, considera-se como se esta fosse emitida em todos os comprimentos de onda, desde $\lambda = 0$ até $\lambda = \infty$. A natureza ondulatória da radiação térmica implica que o comprimento de onda λ deve estar associado à frequência ν da radiação. A relação entre λ e ν é:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.1)$$

onde c é a velocidade de propagação no meio. Se o meio no qual a radiação se propaga for o vácuo, a velocidade de propagação é igual à $2,9979 \times 10^8$ m/s (velocidade da luz no vácuo). Utilizando esta relação entre λ e ν , podemos verificar na Figura 2.1 o espectro de frequências correspondentes.

A radiação de pequeno comprimento de onda (raios gama, raios-x e radiação ultravioleta) é de interesse dos físicos de alta energia ou engenheiros do setor nuclear, enquanto que a radiação de grande comprimento de onda (microondas e ondas de rádio) é de interesse dos engenheiros elétricos. A parte do espectro que se estende entre 10^{-8} e 10^{-5} m (parte da ultravioleta, toda a luz visível e a infravermelha), por ser o intervalo do espectro que efetivamente emite energia térmica, recebe o nome de radiação térmica.

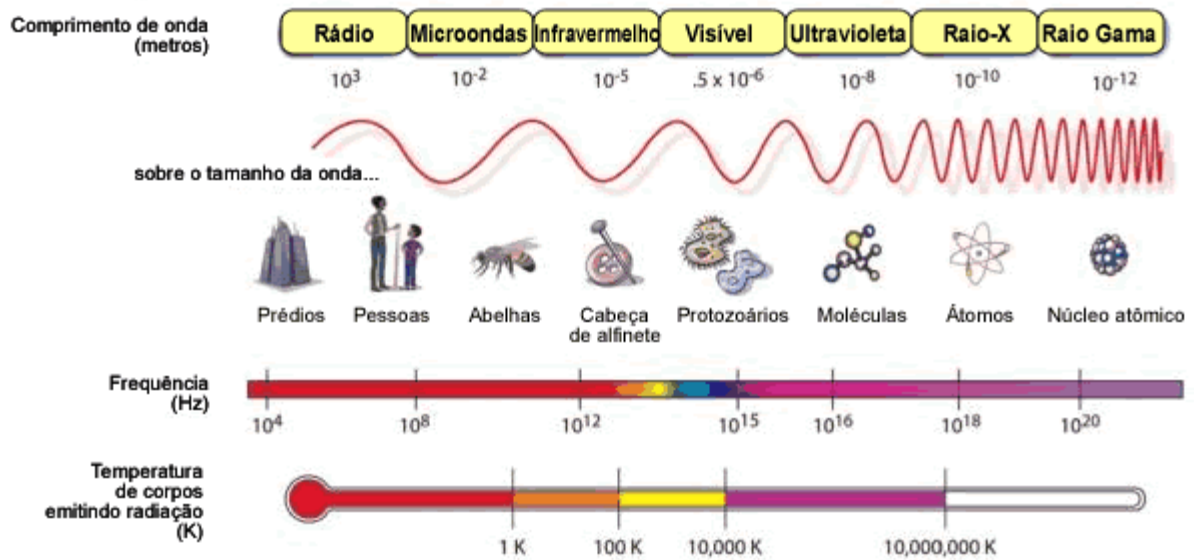


Figura 2.1. O espectro eletromagnético [NASA, 2008].

2.1. Definições

De modo a compreender como ocorrem os processos de propagação na radiação emitida e as formas como se comporta uma superfície onde incide radiação, é necessário estudar os conceitos de intensidade de radiação. Para calcular a taxa de energia radiante emitida por uma superfície, a uma temperatura T , em um determinado comprimento de onda, e dentro de um determinado ângulo, é considerada uma área infinitesimal dA centrada na origem do plano cartesiano xyz , que emite radiação em um intervalo de comprimento de onda $d\lambda$, centrado em λ através de um ângulo sólido $d\omega$, conforme ilustra a Figura 2.2.

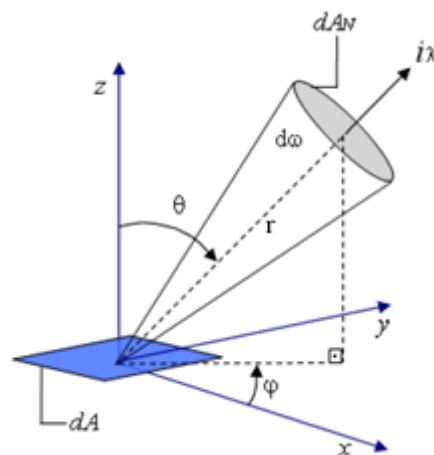


Figura 2.2. Intensidade de radiação do elemento de área dA através do ângulo sólido $d\omega$ [Seewald, 2006].

Assim, a taxa de energia, que é função da área, do comprimento de onda, e do ângulo, é dada por:

$$d^3q(\lambda, \theta, \varphi, T) = i_{\lambda, \theta} \cdot dA \cdot \cos \theta \cdot d\lambda \cdot d\omega \quad (2.2)$$

onde o ângulo sólido $d\omega$ é definido como:

$$d\omega = \frac{dA_N}{r^2} = \text{sen} \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad (2.3)$$

De outra forma, a intensidade de radiação espectral que deixa a superfície de controle dA_N , é dada como:

$$i_{\lambda, \theta} = \frac{d^3q(\lambda, \theta, \varphi, T)}{dA \cdot \cos \theta \cdot d\lambda \cdot d\omega} \quad (2.4)$$

Para calcular a taxa de energia radiante emitida por um corpo, em um determinado comprimento de onda, mas não dependente do ângulo, temos:

$$d^2q = e_\lambda \cdot dA \cdot d\lambda \quad (2.5)$$

onde e_λ é o poder emissivo espectral, definido como a radiação emitida por uma superfície em um determinado comprimento de onda. Da mesma forma que a intensidade, o poder emissivo espectral é visto da forma:

$$e_\lambda = \frac{d^2q}{dA \cdot d\lambda} \quad (2.6)$$

É possível encontrar uma relação simples entre o poder emissivo e a intensidade de radiação, ou seja, comparar uma quantidade de radiação emitida em todo o hemisfério com uma quantidade de radiação emitida em uma única direção através de $d\omega$. Para isso se faz necessário abordar o conceito de superfície difusa.

Superfícies difusas são superfícies onde a intensidade de radiação não depende da direção de emissão, apenas do comprimento de onda e da temperatura. Para este tipo de superfície, pode-se traçar a seguinte relação:

$$i_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T) = i_{\lambda}(\lambda, T) \quad (2.7)$$

Combinando as Eqs. (2.4) e (2.6):

$$d^2q = \int d^3q \quad (2.8)$$

Assim,

$$e_{\lambda} = \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{2\pi} i_{\lambda} \cdot \cos\theta \cdot \text{sen}\theta \cdot d\varphi \cdot d\theta \quad (2.9)$$

Como para superfícies difusas i_{λ} não depende da direção, conclui-se que:

$$e_{\lambda}(\lambda, T) = \pi \cdot i_{\lambda}(\lambda, T) \quad (2.10)$$

As deduções utilizadas referentes à radiação emitida pela superfície, podem ser usadas da mesma forma para a radiação que incide sobre a mesma. A intensidade da radiação incidente pode ser relacionada a um importante fluxo radiativo, a irradiação, que totaliza a radiação incidente de todas as direções. Para a irradiação espectral incidente temos:

$$q_{\lambda,i}'' = \frac{d^2q}{d\lambda \cdot dA} \quad (2.11)$$

Outro conceito importante é o de radiosidade, referente à parcela total de energia radiante que deixa uma superfície. Essa radiação inclui a parcela refletida da radiação incidente e também a emissão direta da superfície e, por isso, é em geral diferente da emissividade, como poder ser visto na Figura 2.3.

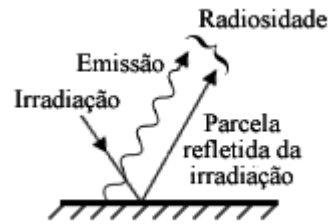


Figura 2.3. Radiosidade de uma superfície [Incropera e DeWitt, 2003].

A radiosidade espectral é calculada por:

$$q_{\lambda,o}'' = e_{\lambda} + \rho_{\lambda} \cdot q_{\lambda,i}'' \quad (2.12)$$

onde ρ_{λ} refere-se à refletividade da superfície do material.

Integrando as Eqs. (2.11) e (2.12) ao longo do espectro, é possível encontrar a irradiação e a radiosidade em termos totais.

2.2. Superfícies Negras, Cinzas e Difusas

Para compreender as características radiativas das superfícies, é importante abordar primeiro as características do corpo negro. Como um absorvedor perfeito e um emissor perfeito, o corpo negro é uma superfície ideal, que serve de padrão contra o qual as propriedades radiativas das superfícies reais podem ser comparadas. O corpo negro apresenta as seguintes propriedades:

- Absorve toda a energia radiante incidente, independente do comprimento de onda e da direção;
- Para uma dada temperatura e um certo comprimento de onda, nenhuma superfície emite mais energia que um corpo negro;
- O corpo negro é um emissor difuso, ou seja, a radiação emitida independe da direção (Figura 2.4).

A partir de dados experimentais e valendo-se de relações termodinâmicas, Max Plank deduziu a equação que descreve a intensidade de radiação espectral do corpo negro em uma dada temperatura e em um dado comprimento de onda. A intensidade de radiação indica a radiação emitida, e o termo “espectral” é utilizado para denotar a dependência entre o comprimento de

onda e a intensidade da radiação. Esta equação é conhecida como “distribuição de Plank”, e apresenta a seguinte forma:

$$i_{\lambda,CN}(\lambda,T) = \frac{2 \cdot h \cdot c_o^2}{\lambda^5 \cdot \left[e^{\left(\frac{h \cdot c_o}{\lambda \cdot k \cdot T}\right)} - 1 \right]} \quad (2.13)$$

onde $h = 6,6256 \times 10^{-34}$ J·s e $k = 1,3805 \times 10^{-23}$ J/K são as constantes universais de Planck e Boltzmann, respectivamente, $c_o = 2,9979 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo, T é a temperatura absoluta do corpo negro (em Kelvin) e λ é o comprimento de onda.

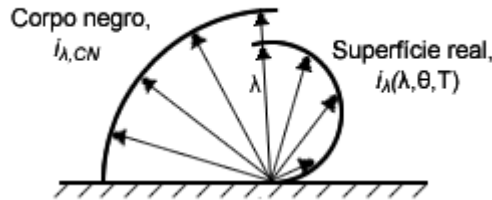


Figura 2.4. Comparação entre a emissão superficial de um corpo negro e a de uma superfície real [Incropera e DeWitt, 2003].

Uma vez que o corpo negro é um emissor difuso, o poder emissivo espectral do corpo negro será dado pela Eq. (2.10).

Relacionando a Eq. (2.10) com a (2.13), temos:

$$e_{\lambda,CN}(\lambda,T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot C_1}{\lambda^5 \cdot \left[e^{\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right)} - 1 \right]} \quad (2.14)$$

onde $C_1 (h \cdot c_o^2)$ e $C_2 (h \cdot c_o / k)$ são constantes de radiação e valem, respectivamente, $0,5955 \times 10^8$ W· $\mu\text{m}^4/\text{m}^2$ e $1,4387 \times 10^4$ $\mu\text{m} \cdot \text{K}$.

De outra forma, através da Lei de Stefan-Boltzmann, pode-se obter a energia radiante emitida por um corpo negro, apenas em função da temperatura, integrando a Eq. (2.14) em função do comprimento de onda. Expressa-se o resultado como:

$$e_{CN}(T) = \sigma \cdot T^4 \quad (2.15)$$

onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$. Este é o poder emissivo total do corpo negro, que representa o fluxo de radiação, emitido por uma superfície unitária a uma temperatura absoluta T . Ainda, através desta relação, pode-se obter a intensidade de radiação total associada à emissão do corpo negro, dada por:

$$i_{CN}(T) = \frac{1}{\pi} \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.16)$$

Com as definições apresentadas acima, referentes ao comportamento do corpo negro, é possível modelar as demais superfícies com a utilização de parâmetros comparativos, que são exatamente as propriedades físicas da superfície.

O poder emissivo espectral de uma superfície qualquer é relacionado ao poder emissivo espectral do corpo negro através de sua emissividade. A emissividade espectral direcional é definida como:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta} = \frac{i_{\lambda}(\lambda, \theta, \varphi, T)}{i_{\lambda,CN}(\lambda, T)} \quad (2.17)$$

A emissividade espectral hemisférica, para superfícies perfeitamente difusas, é definida como:

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{e_{\lambda}(\lambda, T)}{e_{\lambda,CN}(\lambda, T)} \quad (2.18)$$

Consequentemente, o poder emissivo total da superfície será:

$$e = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} \cdot e_{\lambda,CN} \cdot d\lambda \quad (2.19)$$

A emissividade total hemisférica, que representa uma média sobre todas as direções e todos os comprimentos de onda, define-se por:

$$\varepsilon(T) = \frac{e(T)}{e_{CN}(T)} \quad (2.20)$$

Note que, se as emissividades de uma superfície forem conhecidas, é uma questão simples calcular as suas características. Por exemplo, se $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$ for conhecida, pode ser usada com as Eqs. (2.14) e (2.18) para calcular o poder emissivo espectral da superfície em qualquer comprimento de onda e qualquer temperatura. Analogamente, se $\varepsilon(T)$ for conhecida, pode ser usada, com as Eqs. (2.15) e (2.20), para o cálculo do poder emissivo total da superfície em qualquer temperatura.

A energia incidente sobre uma superfície é denominada irradiação, e, dependendo das propriedades físicas da superfície, a irradiação pode ser parcialmente absorvida, refletida, ou ainda transmitida por refração, como ilustra a Figura 2.5.

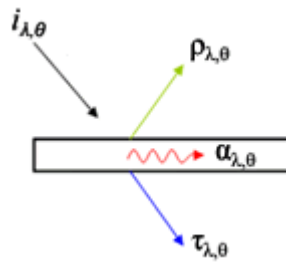


Figura 2.5. Energia incidente em um elemento de área.

Essas propriedades são definidas, respectivamente, pela absorptividade ($\alpha_{\lambda, \theta}$), refletividade ($\rho_{\lambda, \theta}$) e transmissividade ($\tau_{\lambda, \theta}$). Um balanço de energia realizado na Figura 2.4 conduz a:

$$\alpha_{\lambda, \theta} + \rho_{\lambda, \theta} + \tau_{\lambda, \theta} = 1 \quad (2.21)$$

Uma hipótese comumente adotada é de que as superfícies sejam opacas, de modo que a energia não seja transmitida através da mesma, isto é, $\tau_{\lambda, \theta} = 0$. Dessa forma a equação (2.21) fica:

$$\alpha_{\lambda, \theta} + \rho_{\lambda, \theta} = 1 \quad (2.22)$$

A absorvidade espectral direcional, definida como a razão entre a intensidade de radiação incidente absorvida por uma superfície e a intensidade incidente, é obtida através da equação:

$$\alpha_{\lambda,\theta} = \frac{i_{\lambda,i,a}(\lambda, \theta, \varphi, T)}{i_{\lambda,i}(\lambda, \theta)} \quad (2.23)$$

A absorvidade espectral hemisférica, para a irradiação difusa, torna-se:

$$\alpha_{\lambda} = \alpha_{\lambda,\theta} = \frac{i_{\lambda,i,a}(\lambda, T)}{i_{\lambda,i}(\lambda, \theta)} \quad (2.24)$$

Quando a emissividade e a absorvidade espectral hemisférica não dependem do comprimento de onda, ou seja, a superfície emite e absorve parcelas fixas relativas ao corpo negro ao longo de todo o espectro eletromagnético, classifica-se estas superfícies como sendo superfícies cinzas. A hipótese de superfície cinza é geralmente feita com a hipótese de superfície difusa, chegando-se com isso às seguintes propriedades:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T) = \varepsilon(T) \quad (2.25)$$

$$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T) = \alpha(T) \quad (2.26)$$

Apesar disso, essas propriedades podem ainda apresentar dependência em relação à temperatura da superfície.

Para qualquer superfície, a seguinte relação entre emissividade e absorvidade é válida:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T) = \alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T) \quad (2.27)$$

Esta dependência é denominada Lei de Kirchhoff, e resulta de uma análise da segunda lei da termodinâmica. A dedução da Lei de Kirchhoff para superfícies cinzas e difusas resulta em:

$$\varepsilon = \alpha \quad (2.28)$$

Em aplicações práticas, muitas vezes, a hipótese de superfície cinza não se mostra uma boa aproximação. De fato, muitas das superfícies reais apresentam comportamento com forte dependência do comprimento de onda. A modelagem dessas superfícies torna-se complexa quando é feita a integração da Eq. (2.19). A fim de contornar essa dificuldade, é realizada uma discretização do espectro eletromagnético em bandas dentro das quais as propriedades podem ser consideradas constantes. Desse modo, é permitido que se retire a emissividade da integração do poder emissivo, desde que a mesma seja calculada para cada banda. Para cada banda “ bn ” previamente definida do espectro, tem-se da Eq. (2.28)

$$\varepsilon_{bn} = \alpha_{bn} \quad (2.29)$$

e o poder emissivo de cada banda bn da superfície não-cinza é:

$$e_{bn} = \varepsilon_{bn} \int_{\lambda_{bni}}^{\lambda_{bnf}} e_{\lambda,CN} \cdot d\lambda \quad (2.30)$$

onde $e_{\lambda,CN}$ é dado pela Eq. (2.14), e λ_{bni} e λ_{bnf} são os comprimentos de onda que delimitam a região do espectro que forma a banda considerada.

A abordagem inversa feita neste trabalho é para superfícies cinzas, sendo que uma explicação detalhada de problemas inversos envolvendo superfícies não-cinzas pode ser encontrada em Seewald, 2006.

2.3. Trocas Radiantes Entre Superfícies

Após a compreensão dos processos de trocas radiativas em uma superfície, é possível entender como o fenômeno se desenvolve entre duas ou mais superfícies. Uma importante ferramenta para estes cálculos são os conceitos de fator de forma, definida como a fração de energia radiante emitida por uma superfície que incide diretamente em outra superfície.

Para melhor definir o fator de forma, assume-se que as superfícies sejam difusas, que as intensidades de radiação (emitida e absorvida) sejam uniformemente distribuídas nas superfícies e que o meio seja inerte. Como pode ser visto na Figura 2.6, o fator de forma pode ser caracterizado como a intensidade de radiação uniforme saindo do elemento infinitesimal de superfície dA_1 e chegando a dA_2 .

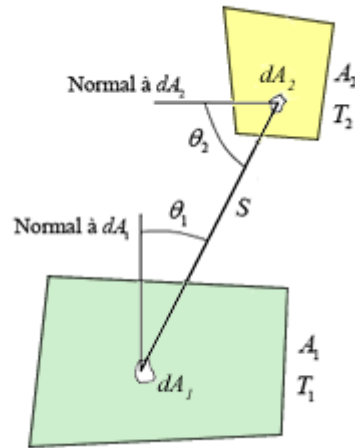


Figura 2.6. Cavidade composta por N superfícies.

Considerando que i_1 é a energia total que deixa o elemento diferencial dA_1 , então, a taxa de energia radiante que deixa dA_1 e chega à dA_2 é:

$$d^2q_{o,1-2} = i_{\lambda,o,1} \cdot dA_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot d\omega_{1-2} \quad (2.31)$$

onde $d\omega_{1-2}$ é o ângulo sólido formado por dA_2 visto a partir de dA_1 :

$$d\omega_{1-2} = \frac{dA_2 \cdot \cos \theta_2}{S^2} \quad (2.32)$$

Como $i_{\lambda,o,1}$ é difusa, ela é independente do ângulo que deixa dA_1 . A equação pode ser escrita para a energia radiante em um intervalo de comprimento de onda $d\lambda$, da seguinte forma:

$$d^2q_{o,1-2} = i_{\lambda,o,1} \cdot \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{S^2} \cdot dA_1 \cdot dA_2 \cdot d\lambda \quad (2.33)$$

A energia radiante total é encontrada integrando a Eq. (2.33) em todos os comprimentos de onda:

$$d^2q_{o,1-2} = \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{S^2} \cdot dA_1 \cdot dA_2 \cdot \int_0^{\infty} i_{\lambda,o,1} \cdot d\lambda \quad (2.34)$$

Tem-se:

$$d^2q_{o,1-2} = \frac{i_{o,1} \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot dA_1 \cdot dA_2}{S^2} \quad (2.35)$$

De maneira análoga, pela reciprocidade, a radiação que deixa dA_2 e chega em dA_1 é:

$$d^2q_{o,2-1} = \frac{i_{o,2} \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_1 \cdot dA_2 \cdot dA_1}{S^2} \quad (2.36)$$

A fração de energia que sai do elemento difuso dA_1 e chega ao elemento dA_2 é chamada de fator de forma $dF_{dA_1-dA_2}$. Utilizando-se a Eq. (2.35), da definição de fator de forma tem-se:

$$dF_{dA_1-dA_2} = \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi \cdot S^2} \cdot dA_2 \quad (2.37)$$

Agora, considerando o fator de forma com intensidade uniforme que deixa a superfície difusa A_1 e chega à superfície A_2 , tem-se:

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} dF_{dA_1-dA_2} dA_1 \quad (2.38)$$

Combinando as Eqs. (2.37) e (2.38):

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi \cdot S^2} dA_2 dA_1 \quad (2.39)$$

Similarmente à Eq. (2.39), o fator de forma de A_2 para A_1 é dado por:

$$F_{2-1} = \frac{1}{A_2} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi \cdot S^2} dA_2 dA_1 \quad (2.40)$$

Das Eq. (2.39) e (2.40), pela regra da reciprocidade, tem-se:

$$A_1 F_{1-2} = A_2 F_{2-1} \quad (2.41)$$

No caso em que superfícies formam um sistema de troca radiante fechado, no qual a energia se conserva, isto é, a energia emitida por cada superfície é completamente absorvida pelas demais, denomina-se este sistema de cavidade.

Considerando uma cavidade fechada consistindo em N superfícies, a análise da conservação de energia leva ao resultado de que o somatório dos fatores de forma a partir de k seja igual à unidade, ou seja:

$$F_{j-1} + F_{j-2} + F_{j-3} + \dots + F_{j-N} = \sum_{k=1}^N F_{j-k} = 1 \quad (2.42)$$

onde a relação acima é denominada regra do somatório em cavidades.

Encontrar o fator de forma entre superfícies não é, em geral, uma tarefa fácil. Para muitas configurações de superfícies com geometria simples, encontra-se na literatura os valores do fator de forma disponíveis através de equações ou tabelas, como, por exemplo, em Siegel e Howell, 2002.

2.4. Trocas Radiantes em Cavidades: Método das Radiosidades

No interior de uma cavidade ocorre uma complexa troca radiante na qual a radiação emitida por uma superfície é parcialmente refletida pelas demais superfícies e parcialmente absorvida, até sua extinção. Diferentes metodologias foram desenvolvidas para modelar este comportamento, sendo que o método das radiosidades para cavidades radiantes é, provavelmente, o mais utilizado por ser baseado em relações simples de balanço e com solução através de métodos clássicos para sistemas de equações. Trata-se de uma excelente metodologia nos casos em que a geometria da cavidade guarda certa simplicidade. Para resolver este problema, as seguintes hipóteses serão consideradas:

1. As superfícies são finitas;
2. A temperatura é uniforme em cada superfície;
3. As superfícies são opacas ($\tau = 0 \mid \alpha = 1 - \rho$);
4. As superfícies são cinzas ($\varepsilon_{\lambda,\theta} = \varepsilon_\lambda$ e $\alpha_{\lambda,\theta} = \alpha_\lambda$);
5. As superfícies são difusas ($\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$);
6. As energias incidente, emitida e refletida são uniformes em cada superfície;

7. Regime estacionário;
8. O meio é considerado não-participante.

Pela hipótese 5, tem-se que o conceito de fator de forma, apresentado na seção 2.3, é aplicável. Como a geometria da cavidade é previamente conhecida, os fatores de forma entre os elementos de área podem ser determinados. Pelas hipóteses 3 e 4, pode-se estabelecer a relação da Eq.(2.26), deduzida da lei de Kirchhoff, indicando que a emissividade é igual à absorvidade, independente da direção considerada. A hipótese 3 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\rho = (1 - \varepsilon) \quad (2.43)$$

Relacionar a refletividade com a emissividade pode eventualmente parecer inadequado, uma vez que fisicamente é mais correto relacionar a refletividade com a absorvidade, como é feito na hipótese 3. No entanto, sempre que o termo $(1 - \varepsilon)$ for encontrado no equacionamento, deve-se recordar que nele está embutida a lei de Kirchhoff, e que o mesmo nada mais é que a própria refletividade ρ . Esta transformação é feita com o intuito de simplificar o equacionamento, trabalhando em termos de uma única propriedade de superfície que seja capaz de representar as demais. Em problemas reais, as superfícies possuem condições que variam continuamente ao longo do domínio (fluxo de calor e temperatura). No entanto, a discretização do domínio é implementada para possibilitar a solução por métodos numéricos, dividindo as superfícies em diversos elementos de área. É importante ressaltar a restrição adicionada na hipótese 8, já que quando o meio for considerado participante, o equacionamento apresentado não pode ser aplicado.

O método das radiosidades utiliza unicamente relações de balanço energético em termo das radiosidades (q_o'') dos elementos de área. Cada elemento emite e absorve radiação proveniente das demais superfícies em quantidades que dependem das propriedades, geometria e posição relativa entre as mesmas. Geralmente, cada superfície possui duas condições térmicas independentes: fluxo radiante e temperatura. Por este motivo, é necessário chegar a duas equações de balanço para equacionar a superfície. A figura 4.1 apresenta as duas abordagens de balanço energético possíveis em um elemento de área.



Figura 2.7. Abordagens de balanço energético em uma superfície.

A abordagem a ser utilizada é determinada pela condição de contorno que o elemento de área possui, visando estabelecer uma relação que adiciona apenas uma incógnita ao sistema. Em superfícies com fluxo de calor prescrito, é conveniente utilizar um balanço energético a partir da superfície de controle mostrada na Figura 2.7.a. Considerando-se a convenção de que a energia que sai de uma superfície é positiva, tem-se:

$$q_r'' = q_o'' - q_i'' \quad (2.44)$$

onde q_r'' é o fluxo líquido radiante na superfície de controle, q_o'' é a radiosidade dessa superfície e q_i'' a sua irradiação, todas essas grandezas em W/m^2 . A irradiação de uma superfície j , por ser o somatório das frações de radiosidade das demais superfícies k , de acordo com o fator de forma entre as mesmas, é definida como:

$$q_{i,j}'' = \sum_{k=1}^N (F_{j-k} \cdot q_{o,k}'') \quad (2.45)$$

onde F_{jk} é o fator de forma de j para k . No somatório, k assume valores que representam todas as superfícies da cavidade, em que N indica o número total de superfícies. Substituindo na Eq. (2.44) e rearranjando obtém-se a seguinte relação para a radiosidade:

$$q_{o,j}'' = q_{r,j}'' + \sum_{k=1}^N F_{j-k} \cdot q_{o,k}'' \quad (2.46)$$

Em superfícies com temperatura prescrita, a abordagem de um balanço na superfície de controle de acordo com a Figura 2.7.b é utilizada. Assim, o fluxo líquido de calor radiante é:

$$q_r'' = \varepsilon \cdot e_{CN} - \alpha \cdot q_i'' \quad (2.47)$$

em W/m^2 , onde e_{CN} é o poder emissivo do corpo negro à temperatura prescrita e ε e α são, respectivamente, a emissividade e absortividade total hemisférica da superfície. Pela relação existente entre emissividade e absortividade, como descrito anteriormente, pode-se reescrever a equação da seguinte forma:

$$q_{r,j}'' = \varepsilon_j \cdot (e_{CN} - q_{i,j}'') \quad (2.48)$$

No intuito de chegar a uma relação em termos de radiosidade, combina-se a equação acima com as Eqs. (2.44) e (2.45), chegando em:

$$q_{o,j}'' = \varepsilon_j \cdot e_{CN} + (1 - \varepsilon_j) \cdot \sum_{k=1}^N F_{j-k} \cdot q_{o,k}'' \quad (2.49)$$

Escrevendo-se uma equação do tipo (2.46) e (2.49) para cada superfície, será possível encontrar as radiosidades para cada uma, pois haverá o mesmo número de incógnitas e equações. Com as radiosidades conhecidas é possível determinar a condição térmica desconhecida em cada superfície. Para superfícies com a temperatura conhecida tem-se:

$$q_{r,j}'' = q_{o,j}'' - \sum_{k=1}^N F_{j-k} \cdot q_{o,k}'' \quad (2.50)$$

Caso o fluxo de calor radiante seja conhecido, é possível encontrar a temperatura da superfície (ou o poder emissivo do corpo negro) de acordo com:

$$e_{CN} = \frac{1}{\varepsilon_j} q_{o,j}'' - \frac{(1 - \varepsilon_j)}{\varepsilon_j} \cdot \sum_{k=1}^N F_{j-k} \cdot q_{o,k}'' \quad (2.51)$$

Vale ressaltar que cavidades radiantes são geralmente compostas por N superfícies, o que torna necessário escrever uma equação de radiosidade para cada superfície, formando um sistema de j - N equações para resolver o sistema.

2.5. Estratégia de Solução

O problema é resolvido escrevendo-se uma equação de radiosidade para cada superfície, de acordo com as condições de contorno existentes (fluxo prescrito ou temperatura prescrita). Assim, chega-se a um sistema linear de M equações e M incógnitas, onde M é o número de superfícies discretas do domínio. Chega-se então a um sistema do tipo $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$, onde \mathbf{x} é o vetor das radiosidades a ser calculado, \mathbf{A} é a matriz de dimensão $M \times M$ e o vetor \mathbf{b} corresponde a condição prescrita. De forma geral, esta matriz pode ser representada da forma:

$$\begin{bmatrix} 1 & (\varepsilon_1 - 1) \cdot F_{12} & \cdots & (\varepsilon_1 - 1) \cdot F_{1(M-1)} & (\varepsilon_1 - 1) \cdot F_{1M} \\ (\varepsilon_2 - 1) \cdot F_{21} & 1 & \cdots & (\varepsilon_2 - 1) \cdot F_{2(M-1)} & (\varepsilon_2 - 1) \cdot F_{2M} \\ \vdots & \vdots & 1 & \vdots & \vdots \\ -F_{(M-1)1} & -F_{(M-1)2} & \cdots & 1 & -F_{(M-1)M} \\ -F_{M1} & -F_{M2} & \cdots & -F_{M(M-1)} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{o1}'' \\ q_{o2}'' \\ \vdots \\ q_{o(M-1)}'' \\ q_{oM}'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \cdot e_1 \\ \varepsilon_2 \cdot e_2 \\ \vdots \\ q_{r(M-1)}'' \\ q_{r1M}'' \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

onde as primeiras linhas referem-se a elementos com temperatura prescrita enquanto as últimas referem-se a elementos com fluxo líquido prescrito. Porém, antes de se tentar solucionar este sistema linear, primeiramente se procura saber sob quais condições existe solução. De acordo com Barroso *et al.*, 1983, um modo de classificar o sistema de equações é através do cálculo do seu determinante normalizado, onde, se o determinante normalizado for sensivelmente menor que a unidade, o sistema será mal condicionado. Se \mathbf{A} é uma matriz de ordem M , seu determinante normalizado é dado por:

$$\det(\text{Norma}A) = \frac{\det(A)}{\beta_1 \beta_2 \cdots \beta_M} \quad (2.53)$$

onde $\beta_j = \sqrt{a_{j1}^2 + a_{j2}^2 + \cdots + a_{jM}^2}$, para $j = 1, 2, \dots, M$. Sendo que:

$$|\det(\text{Norma}A)| \cong 1 \quad (2.54)$$

onde β é a norma das linhas na matriz \mathbf{A} e a são os elementos da matriz \mathbf{A} .

Ainda de acordo com Barroso *et al.*, 1983, sendo o determinante normalizado da matriz \mathbf{A} maior do que 10^{-2} , o sistema proposto já é possível e determinado. Com valores abaixo deste, o

sistema começa a apresentar sinais de mal-condicionamento e atenção deve ser dada nestes casos.

Para demonstrar esta relação, considera-se uma cavidade formada por três superfícies. Se todas as superfícies possuem condição de temperatura prescrita, a matriz \mathbf{A} resultante possui o seguinte formato:

$$\begin{bmatrix} 1 & (\varepsilon_1 - 1) \cdot F_{12} & (\varepsilon_1 - 1) \cdot F_{13} \\ (\varepsilon_2 - 1) \cdot F_{21} & 1 & (\varepsilon_2 - 1) \cdot F_{23} \\ (\varepsilon_3 - 1) \cdot F_{31} & (\varepsilon_3 - 1) \cdot F_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

e seu vetor \mathbf{b} correspondente é:

$$[\varepsilon_1 \cdot e_1 \quad \varepsilon_2 \cdot e_2 \quad \varepsilon_3 \cdot e_3]^T \quad (2.56)$$

Pode-se aplicar alguns valores típicos para emissividades de superfícies e temperaturas, e desta forma chegar a valores numéricos para \mathbf{A} e \mathbf{b} , e com isso calcular seu determinante normalizado. Os valores típicos de determinantes normalizados para estes casos ficam geralmente em torno de 0,8, e quase sempre acima de 0,5. Os planos que satisfazem cada equação estão dispostos na Figura 2.8, onde o ponto escuro na intersecção dos planos evidencia a localização do ponto de solução do sistema.

Caso todas as superfícies da mesma cavidade que consideramos no exemplo anterior possuam condição de fluxo prescrito, a matriz \mathbf{A} fica:

$$\begin{bmatrix} 1 & -F_{12} & -F_{13} \\ -F_{21} & 1 & -F_{23} \\ -F_{31} & -F_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

e o vetor \mathbf{b} fica:

$$[q_{r1}'' \quad q_{r2}'' \quad q_{r3}'']^T \quad (2.58)$$

Nota-se nos sistemas das equações das matrizes \mathbf{A} apresentadas, a dominância da diagonal principal, que é uma característica típica de um sistema bem-condicionado.

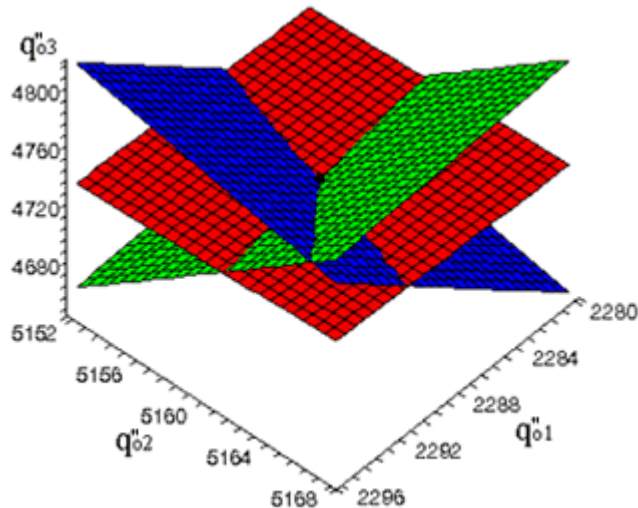


Figura 2.8. Planos de um sistema bem condicionado 3x3 com determinante normalizado igual a 0,8 [Seewald, 2006].

Em sistemas lineares formados por equações bem-condicionadas, pode-se fazer uso de métodos clássicos para solução desses sistemas. Barroso *et al.*, 1983, descreve métodos com número finito de operações, como o de Gauss e de Jordan, além de métodos iterativos, como o de Jacobi e Gauss-Seidel. É preferível o uso de métodos iterativos aos métodos finitos, pois os métodos finitos conduzem a uma solução que pode conter sérios erros de arredondamento, os quais são significativamente reduzidos nos métodos iterativos para refino da solução [Dorn e McCracken, 1978]. Opta-se ainda pelo método de Gauss-Seidel sobre o método de Jacobi, pois este converge mais rapidamente para a solução [Barroso *et al.*, 1983]. Para o método de Gauss-Seidel, tem-se que é condição suficiente para a convergência a matriz \mathbf{A} possuir diagonal dominante [Dorn e McCracken, 1978]:

$$|a_{jj}| \geq \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^M |a_{jk}| \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, M \quad (2.59)$$

Ambos os exemplos apresentados anteriormente atendem à condição proposta, levando à conclusão de que o método das cavidades radiantes não é somente bem condicionado, como também converge em metodologias de solução iterativa.

No método de Gauss-Seidel, parte-se de uma aproximação inicial $\mathbf{x}^{(0)}$, tal que:

$$\mathbf{x}^{(0)} = [x_1^{(0)} \quad x_2^{(0)} \quad \dots \quad x_M^{(0)}] \quad (2.60)$$

Então, calcula-se a seqüência de aproximações $\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(\gamma)}, \dots$, utilizando-se a equação:

$$x_j^{(\gamma+1)} = \frac{1}{a_{jj}} \left[b_{jj} - \sum_{k=1}^{j-1} a_{jk} x_k^{(\gamma+1)} + \sum_{k=j+1}^M a_{jk} x_k^{(\gamma)} \right] \quad (2.61)$$

onde γ representa o número da iteração, até que o critério de convergência seja satisfeito. Este é definido como:

$$\max \left| \frac{x_j^{(\gamma+1)} - x_j^{(\gamma)}}{x_j^{(\gamma+1)}} \right| < \xi \quad (2.62)$$

sendo ξ o valor do erro admitido, neste trabalho definido como 10^{-6} .

Resolvido o sistema de equações em termos das radiosidades, a condição de contorno desconhecida é calculada com a equação de balanço estabelecida (fluxo prescrito ou temperatura prescrita).

3. FUNDAMENTOS DA ILUMINAÇÃO

Iluminação é um fenômeno físico resultante da exposição de uma fonte de luz em um ambiente que pode absorver ou refletir tornando-se visível. A luz, na forma como conhecemos, compreende uma faixa de comprimentos de onda (radiação eletromagnética), que se situa entre o infravermelho e o ultravioleta. Pode ser caracterizada em três grandezas físicas básicas que são: brilho (ou amplitude), cor (ou frequência) e polarização (ou ângulo de vibração). A fonte mais familiar de luz visível é o Sol, que emite radiação através de todo o espectro eletromagnético, mas sua radiação mais intensa está na região que definimos como visível, e a intensidade radiante tem valor de pico em um comprimento de onda de cerca de 550 nm. Esse fato induziu a teoria de que nossos olhos, ao longo de toda a evolução, se adaptaram ao espectro do Sol.

Todos os objetos emitem radiação térmica, devido à sua temperatura. Objetos tais como o Sol, cuja radiação térmica é visível, são denominados incandescentes. A incandescência geralmente está associada a objetos quentes e são necessárias temperaturas que excedam a 1.000 °C para que ocorra. Entretanto, a luz também é emitida por objetos frios, e esse fenômeno é chamado de luminescência. Os exemplos de luminescência incluem as lâmpadas fluorescentes, relâmpagos, mostradores luminosos e receptores de televisão. Outras formas de emissão luminosa podem ser encontradas na natureza, como por exemplo, quando a energia se origina de uma reação química (denominada quimiluminescência), quando esta ocorre em seres vivos, tais como vaga-lumes e organismos marinhos (denominada bioluminescência), ou quando é emitida por certos cristais quando comprimidos, como, por exemplo, o açúcar (denominada triboluminescência).

3.1. Unidades Fundamentais da Iluminação

A iluminação recebe discriminações específicas dentro do sistema internacional de unidades (SI). Apesar de também ser definida por unidades derivadas, como, por exemplo, o watt (W), a intensidade luminosa recebe uma unidade específica denominada candela (cd). De acordo com INMETRO, 2003, a unidade candela é definida como “a intensidade luminosa, numa dada direção de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540×10^{12} Hz e cuja intensidade energética nessa direção é 1/683 watt por esterradiano” (Figura 3.1). Nessa definição, dá-se a distinção entre intensidade luminosa e intensidade térmica. Isto ocorre devido à maneira com que se percebe a parcela de energia do espectro de luz visível, o que justifica a manutenção da unidade candela no sistema internacional.

O conceito da grandeza luminância, de unidade candela por metro quadrado (cd/m^2), está relacionada com a densidade da intensidade luminosa que atravessa a área cinza, representada na Figura 3.1. Na medida em que a superfície esférica de controle que envolve a fonte tem seu raio aumentado, a quantidade de energia através de cada ângulo sólido permanece a mesma (1 cd), enquanto que a luminância daquela superfície diminui devido ao aumento de área da superfície cinza.

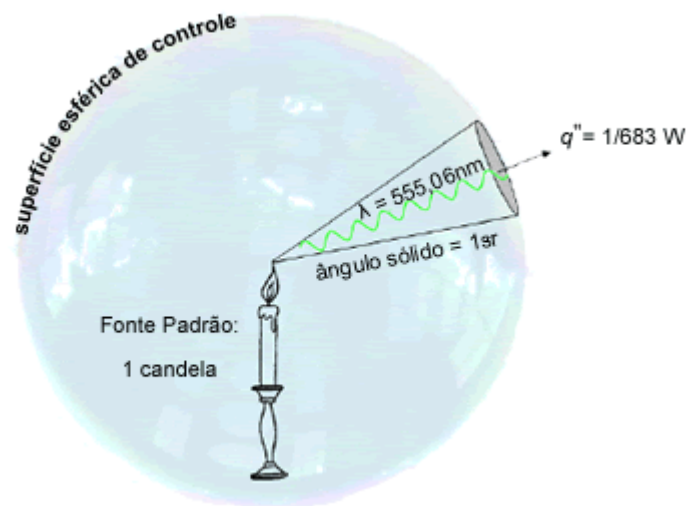


Figura 3.1. Definição de candela [Seewald, 2006].

O fluxo luminoso, denominado como a totalidade da energia luminosa que atinge a superfície de controle, pode ser obtido através da integral da intensidade luminosa que cruza a superfície de controle em todas as direções de emissão. A unidade do fluxo luminoso é o lúmen (lm), que tem origem na multiplicação da unidade candela pelo ângulo sólido esterradiano ($\text{cd}\cdot\text{sr}$). O fluxo luminoso por unidade de área é denominado iluminamento, nível de iluminação ou iluminância, sendo sua unidade lúmen por metro quadrado (lm/m^2) ou lux (lx). A iluminância é a grandeza mais utilizada em tabelas que fornecem os níveis de iluminação mais favoráveis para cada situação.

Algumas grandezas mais comumente utilizadas na engenharia podem ser comparadas com as utilizadas nas teorias de iluminação, como por exemplo, o fluxo luminoso (unidade lúmen), que é equivalente ao que se denomina taxa (unidade watt), enquanto que a iluminância (unidade lúmen por metro quadrado) equivale ao denominado fluxo (unidade watt por metro quadrado). Um resumo das grandezas de iluminação pode ser verificado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Grandezas de iluminação com suas unidades e símbolos.

| Grandeza | Unidade | Símbolo |
|----------------------|----------------------------|-------------------|
| Intensidade luminosa | Candela | cd |
| Luminância | Candela por metro quadrado | cd/m ² |
| Fluxo luminoso | Lúmen (cd·sr) | lm |
| Iluminância | Lux (lm/m ²) | lx |

3.2. O Sentido da Visão

A visão depende da luz, sendo que o olho humano é constituído de vários elementos ópticos que têm a função de transformar os estímulos luminosos em sinais elétricos, para que possam ser transmitidos para o cérebro, através do nervo óptico, e então serem interpretados como uma imagem [IESNA, 2000]. A retina é a parte responsável pela geração dos sinais elétricos, com grande sensibilidade na região da fóvea central. Para atingi-la, os raios luminosos passam através da córnea, do cristalino e do humor vítreo, como pode ser acompanhado na Figura 3.2. Todos estes meios servem como filtros e devem transmitir a radiação incidente sem excessiva absorção ou espalhamento, para não causarem problemas no sistema de visão.

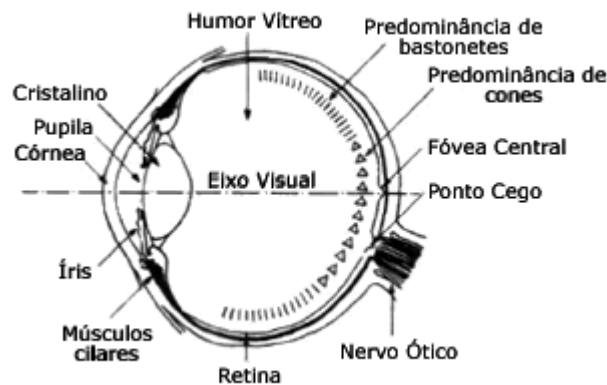


Figura 3.2. Seção transversal do olho humano [Iida, 1990].

A propriedade de transmitância, no olho humano, varia com o comprimento de onda. Para a média da população, os comprimentos de onda visíveis estão na faixa compreendida entre 380 nm a 780 nm. Fora deste intervalo os meios pelos quais a radiação é transmitida no olho possuem transmitância nula. Ao atingir a retina, a radiação atinge os cones e os bastonetes, que representam duas classes distintas de células fotossensíveis. Os cones, ou receptores fotópicos, se localizam na fóvea, região central da retina, e são sensíveis em níveis de luminância nos quais estamos acostumados a desenvolver nossas atividades diárias, isto é, maiores que 3 cd/m². Os bastonetes, ou receptores escotópicos, encontram-se mais esparsos na retina, não distinguem cor, apenas forma, e são responsáveis pela visão em níveis de luminância muito

baixos, menores que $0,001 \text{ cd/m}^2$ [Iida, 1990, IESNA, 2000]. Portanto, estes não são considerados neste trabalho.

Para descrever a visão fotópica (maiores comprimentos de onda) é utilizada uma razão entre a percepção luminosa e a irradiação no olho (lúmens/watt), chamada de eficácia luminosa. Ao longo do espectro a eficácia luminosa possui diferentes valores, justificando o fato de algumas cores serem vistas com maior intensidade que outras. O olho humano possui uma sensibilidade mais apurada nas cores verde e amarelo, que estão no centro do espectro visível, e esta sensibilidade diminui gradativamente nos extremos deste intervalo, para as cores laranja, anil, vermelho, azul e violeta. As cores, seus comprimentos de onda e frequência podem ser vistos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Cores do espectro visível.

| Cor | Comprimento de onda | Frequência |
|------------|----------------------------|-------------------|
| Vermelho | ~ 625-740 nm | ~ 480-505 THz |
| Laranja | ~ 590-625 nm | ~ 510-450 THz |
| Amarelo | ~ 565-590 nm | ~ 530-510 THz |
| Verde | ~ 500-565 nm | ~ 600-530 THz |
| Anil | ~ 485-500 nm | ~ 620-600 THz |
| Azul | ~ 440-485 nm | ~ 680-620 THz |
| Violeta | ~ 380-440 nm | ~ 790-680 THz |

No comprimento de onda de 555 nm encontra-se a maior quantidade de energia, no valor de 683 lúmens por watt. Para os demais comprimentos de onda é estabelecida uma função adimensional com valores relativos ao valor máximo acima citado, aos quais é dado o nome de eficiência luminosa fotópica (V_λ), apresentado na Figura 3.3.

Um ajuste de dados, apresentado por Seewald, 2006, permite equacionar tal comportamento com a expressão abaixo:

$$V_\lambda = \frac{1}{d} e^{\left(a + \frac{b}{\lambda} + c \ln(\lambda)\right)} \quad (3.1)$$

onde λ é o comprimento de onda, em nanômetros, e os coeficientes adimensionais do ajuste a , b , c e d valem, respectivamente, 1,316,95, -100.003,85, -179,89 e 1,023, com validade no intervalo $360 \text{ nm} \leq \lambda \leq 800 \text{ nm}$. Uma relação matemática para a obtenção do fluxo luminoso a partir de um fluxo radiante é estabelecida com a equação:

$$q^{(l)} = 683 \int_{\lambda_i}^{\lambda_f} V_{\lambda} q^{(w)} d\lambda \quad (3.2)$$

onde $q^{(w)}$ é a potência de um fluxo radiante, em watt, e $q^{(l)}$ representa a intensidade visível deste fluxo, em lúmen. A percepção da cor depende da forma com que o fluxo luminoso encontra-se distribuído ao longo do espectro visível, e diferentes modelos matemáticos foram criados para descrevê-la, a partir de uma distribuição de energia luminosa espectral, na tentativa de simular o processamento realizado no cérebro humano. Um destes modelos é o sistema Munsell, que padroniza as cores utilizando através das variáveis matiz, claridade e saturação [IESNA, 2000].

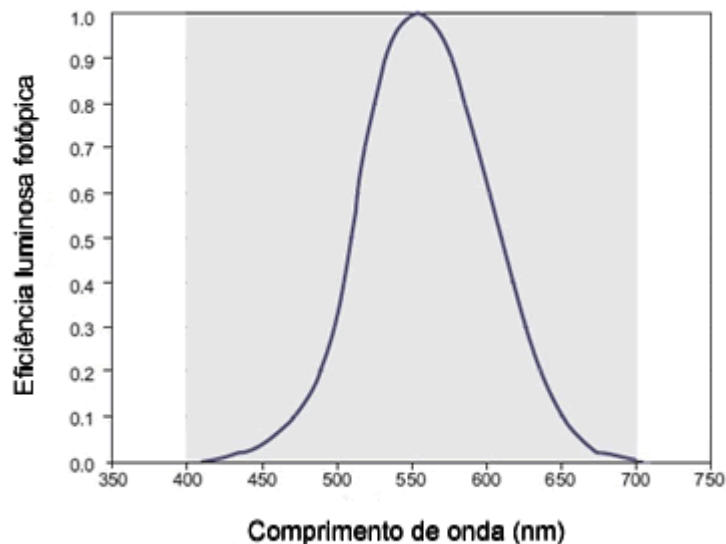


Figura 3.3. Eficiência luminosa fotópica para diferentes comprimentos de onda.

3.3. Iluminação Artificial - Lâmpadas

A utilização de luz artificial, principalmente durante o dia, tem um início muito recente. De acordo com Lamberts *et al.*, 2004, a escolha do sistema de iluminação artificial e sua relação com as estratégias de projeto são fundamentais para alcançar a eficiência energética, ou seja, para obter um resultado satisfatório com baixo dispêndio de energia. A principal fonte de luz artificial são as lâmpadas, e estas se subdividem em classificações de acordo com a maneira como a luz é gerada.

3.3.1. Lâmpadas Incandescentes

As lâmpadas incandescentes são fabricadas utilizando-se um filamento de tungstênio, o que proporciona um alto ponto de fusão. O filamento é envolto por um bulbo de vidro, que contém em seu interior gás inerte. Estas lâmpadas emitem radiação eletromagnética através do efeito Joule, que consiste em um fenômeno elétrico em que um elétron é excitado e, ao retornar à posição de maior estabilidade, libera energia. Um fato importante neste tipo de lâmpada, é que, durante este processo, átomos de tungstênio evaporam e se depositam no bulbo de vidro, causando a deterioração da intensidade de iluminação da lâmpada ao longo de sua vida útil. A emissividade total hemisférica do tungstênio para diferentes temperaturas pode ser analisada na Figura 3.4.

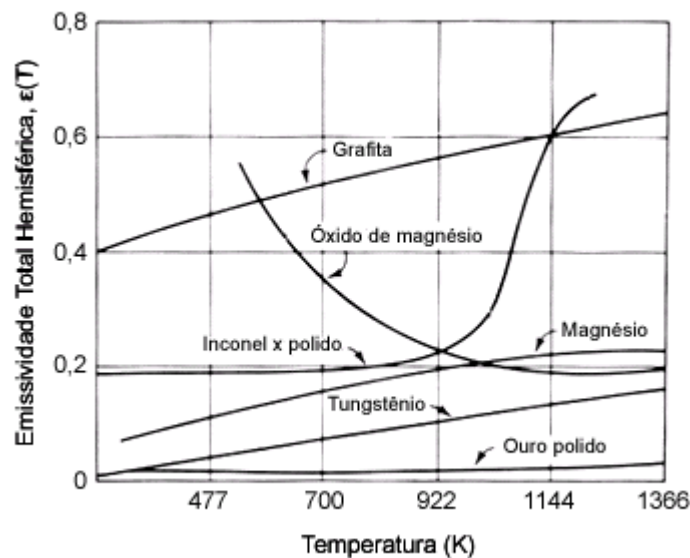


Figura 3.4. Efeito da temperatura na emissividade hemisférica total de vários metais e um dielétrico [Gubareff *et al.*, 1960].

A extrapolação dos valores mostrados na Figura 3.4 até as temperaturas de operação do filamento leva a concluir que a emissividade espectral do filamento de tungstênio na temperatura de operação é igual a 0,36, com variação insignificante na faixa de trabalho compreendida entre 2700 e 3000 K. Esta análise está de acordo com o comportamento apresentado na Figura 3.5, que compara a emissão espectral do corpo negro com a de um filamento incandescente de tungstênio a 3000 K. Ainda, conforme a Figura 3.5, é possível concluir que a emissividade do tungstênio pode ser considerada constante ao longo do espectro visível. Logo, filamentos de tungstênio de

lâmpadas incandescentes podem ser modelados como uma superfície cinza de emissividade igual a 0,36.

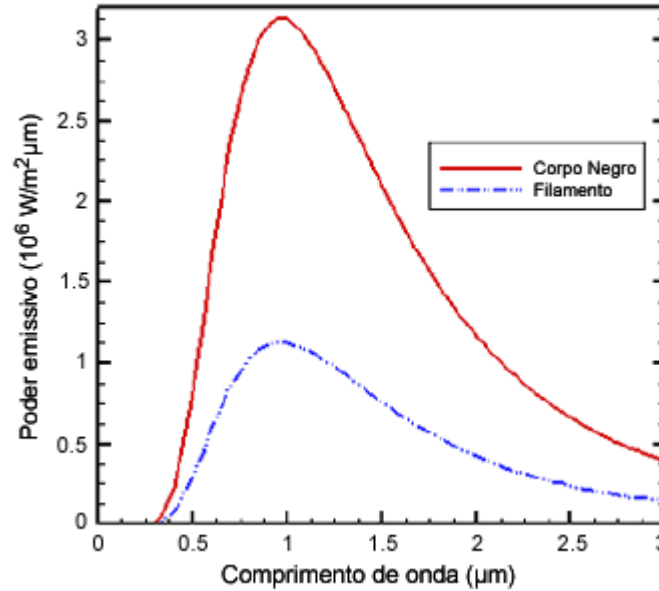


Figura 3.5. Emissão de um filamento de tungstênio de uma lâmpada incandescente em comparação com a emissão do corpo negro, ambos a 3000 K [IESNA, 2000].

Considerando a emissividade do filamento de tungstênio, encontrada com o auxílio da Figura 3.4, o poder emissivo espectral de uma lâmpada incandescente, a uma dada temperatura T , de acordo com a Eq. (2.18) é:

$$e_{\lambda} = 0,36 \cdot e_{\lambda,CN} \quad (3.3)$$

O poder emissivo luminoso $e^{(l)}$ destas lâmpadas, com base na Eq. (3.2), é:

$$e^{(l)} = 683 \cdot 0,36 \int_{\lambda_{bni}}^{\lambda_{bnf}} V_{\lambda} \cdot e_{\lambda,CN} \cdot d\lambda \quad (3.4)$$

Na Tabela 3.3 são apresentadas informações relativas a uma linha de lâmpadas de um fabricante nacional. Através destas informações, dos dados de potência e de fluxo luminoso, é possível modelar matematicamente as lâmpadas. De acordo com Seewald, 2006, o sistema de equações obtidas são as que seguem:

$$q^{(W)} = A_{fil} \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} \cdot e_{\lambda,CN}(T) \cdot d\lambda \quad (3.5)$$

$$q^{(I)} = A_{fil} \int_{0.4}^{0.7} 683 \cdot V_{\lambda} \cdot \varepsilon_{\lambda} \cdot e_{\lambda,CN}(T) \cdot d\lambda \quad (3.6)$$

onde A_{fil} é a área superficial do helicóide do filamento, uma característica construtiva de cada lâmpada, e T é a temperatura de operação de cada modelo de lâmpada. Existe um par (A_{fil}, T) que satisfaz ao sistema formado pelas Equações (3.5) e (3.6).

Tabela 3.3. Catálogo de lâmpadas incandescentes [OSRAM, 2005].

| Modelo | Tensão (V) | Potência (W) | Fluxo Luminoso (lm) | Vida Útil (h) |
|---------------|-------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| INC25 | 127 | 25 | 230 | 750 |
| INC40 | 127 | 40 | 516 | 750 |
| INC60 | 127 | 60 | 864 | 750 |
| INC100 | 127 | 100 | 1620 | 750 |
| INC150 | 127 | 150 | 2505 | 750 |
| INC200 | 127 | 200 | 3520 | 750 |

As equações (3.5) e (3.6) foram resolvidas por Seewald, 2006, para os modelos de lâmpadas apresentadas na Tabela 3.3 e os pares (A_{fil}, T) obtidos são mostrados na Tabela 3.4. Ainda nesta tabela são apresentados os valores de corrente e de resistência elétrica calculados de acordo com a condição de operação de potência e tensão fornecida pelo fabricante.

Tabela 3.4. Dados calculados com base nas informações do catálogo [Seewald, 2006].

| Modelo | Temperatura de operação (K) | Área de filamento (m²) | Corrente de operação (A) | Resistência (Ω) |
|---------------|------------------------------------|--|---------------------------------|------------------------|
| INC25 | 2565,74 | 2,826X10 ⁻⁵ | 0,197 | 645,160 |
| INC40 | 2728,53 | 3,535X10 ⁻⁵ | 0,315 | 403,225 |
| INC60 | 2787,71 | 4,867X10 ⁻⁵ | 0,472 | 268,817 |
| INC100 | 2855,08 | 7,373X10 ⁻⁵ | 0,787 | 161,290 |
| INC150 | 2873,21 | 1,078X10 ⁻⁴ | 1,181 | 107,527 |
| INC200 | 2905,26 | 1,375X10 ⁻⁴ | 1,575 | 80,645 |

Quando um projeto de iluminação exigir um valor específico de fluxo luminoso, e este for um valor intermediário dentre os apresentados em catálogos, é possível modificar o ponto de operação das lâmpadas, isto é, mudar as condições de utilização sugeridas pelo fabricante para atingir as condições desejadas. Não é aconselhada a operação em temperaturas superiores à

temperatura de operação indicada pelo fabricante, pois isso poderia diminuir a vida útil da lâmpada ou até mesmo danificá-la instantaneamente. Mas para temperaturas inferiores à temperatura de operação não há restrições de uso, e inclusive é aconselhado por estender a vida útil da lâmpada. Este ajuste é feito modificando-se o ponto de operação da lâmpada reduzindo a tensão elétrica sobre a mesma e, com isso, diminui-se sua temperatura e seu fluxo luminoso, como pode ser visto na Figura 3.6. Uma dica é selecionar, com base nos dados de projeto, uma lâmpada incandescente com potência nominal superior e mais próxima possível da potência requerida para fazer os ajustes.

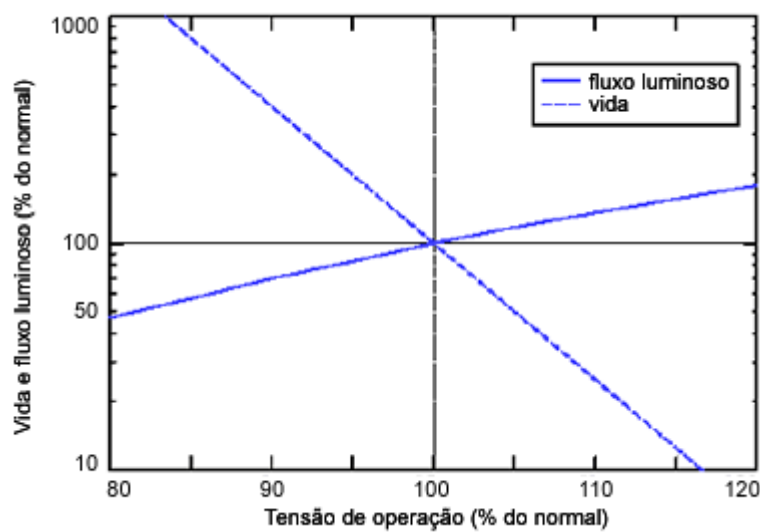


Figura 3.6. Variação da vida útil e fluxo luminoso de lâmpadas de filamento de tungstênio de acordo com a tensão aplicada [Ryer, 1997].

Para ajustar o ponto de operação de uma lâmpada incandescente é necessário associar um circuito elétrico a ela, para controlar a tensão do seu filamento. Existem basicamente dois dispositivos para o controle de tensão, que são os resistores, e os controladores de tensão do tipo *dimmer*. Controlar a tensão utilizando resistores é uma solução simples e de baixo custo. No entanto, não é considerada por muitos como uma alternativa viável, pois o controle de tensão é feito ao custo de dissipar energia na forma de calor, o que eleva o custo a longo prazo. Com o avanço da eletrônica, foram criados os *dimmers*, que são dispositivos eletrônicos capazes de abrir e fechar o circuito rapidamente, ocultando assim uma parte da onda de corrente alternada. Desta maneira, parte da energia consumida em cada ciclo é reduzida. O ponto de fechamento do circuito é fixo, em $V(t)=0$, enquanto que o ponto de abertura pode ser controlado continuamente. Os *dimmers* possuem a vantagem da alta eficiência no controle de tensão, mas a

instalação de diversos destes dispositivos pode não ser viável pelo alto investimento inicial requerido. A escolha do modo de controle de tensão pode envolver diversos fatores, mas este não é o foco deste trabalho. Portanto, será apresentada uma maneira de projetar os circuitos com o uso de resistores, não significando que este seja o melhor método a ser empregado, mas levando apenas em consideração o fato de atingir o ponto de operação que os cálculos de projeto solicitarem.

Para atingir a condição desejada, pode-se utilizar um circuito simples, que faz uso de uma resistência variável colocada em série com a lâmpada, como o apresentado na Figura 3.7.

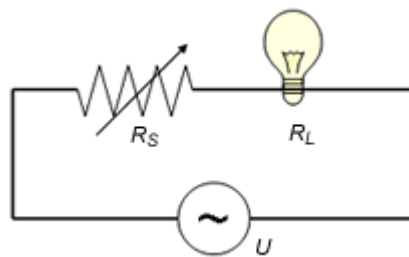


Figura 3.7. Circuito para reduzir potência luminosa de lâmpadas [Seewald, 2006].

O circuito apresentado na Figura 3.7 permite a obtenção do fluxo luminoso requerido pelo projeto. Para isso, basta determinar o valor da resistência R_S que deve ser ligada à lâmpada. As relações básicas de circuitos elétricos levam à seguinte relação:

$$R_S = R_L \cdot \left(\frac{U}{P_L^{req}} \cdot \sqrt{\frac{P_L^{req}}{R_L}} - 1 \right) \quad (3.7)$$

onde P_L^{req} é a potência requerida pelo projeto, em watt, R_L é a resistência do filamento da lâmpada e U a tensão de linha da rede, encontrados na tabela 3.3 e 3.4. A potência consumida pelo circuito é:

$$P_{total} = I_{op}^2 (R_S + R_L) \quad (3.8)$$

Esta potência é sempre superior ou igual a potência nominal da lâmpada, devido à dissipação de energia não útil no elemento resistivo R_S .

Com esta solução, além de se atingir o ponto de operação desejado, também ocorre um aumento na vida útil da lâmpada, como mostra a Figura 3.6, devido à sensibilidade dos filamentos com relação à tensão aplicada.

3.3.2. Demais Tipos de Lâmpadas

É possível encontrar uma enorme variedade de opções em se tratando de lâmpadas para iluminação artificial. Além das lâmpadas incandescentes, é possível citar as lâmpadas halógenas, fluorescentes, de vapor de mercúrio, de vapor de sódio e as lâmpadas mistas. Ainda existem outros tipos de lâmpadas, como, por exemplo, as lâmpadas de descarga de multivapores metálicos, lucalox, catodo frio, etc. Em resumo, as tecnologias constantemente ampliam o campo para a iluminação, com aplicações cada vez mais específicas e de maior rendimento.

3.4. Especificações de Iluminação

A luz artificial tem aplicações na engenharia, medicina, iluminação de ambientes, como postos de trabalho e viveiro de plantas. Para cada aplicação, é importante saber as condições de iluminância ideais. Como principal fonte de informação para a iluminação é possível citar a norma NBR5413, que já foi utilizada como referência para a Norma de Regulamentação de Segurança do Ministério do Trabalho. Esta norma fornece informações confiáveis para o êxito de projetos de iluminação, tais como a iluminância adequada para o exercício de diferentes atividades, como pode ser verificado na Tabela 3.5. A iluminância sugerida por esta norma é apresentada por um valor mínimo, médio e máximo para cada atividade. A norma ainda apresenta algumas considerações específicas sobre as atividades e demonstra uma metodologia na qual pondera fatores como idade do observador, velocidade, precisão requeridas para a tarefa, e ainda a refletância da superfície ao fundo do campo de visão.

De acordo com o catálogo Philips, 1981, em ambientes iluminados integralmente por meio de luz artificial, a sensação de desconforto experimentada pelos trabalhadores, devido a um longo período de reclusão da luz natural, pode ser atenuada proporcionando-se uma iluminância mais intensa que a normalmente exigida.

Segundo OIT, 2001, a iluminação em valores médios para as grandes salas, combinada com iluminação direcionada no local de realização da tarefa, direciona a concentração do operador, aumenta a produtividade e reduz a incidência de acidentes.

Tabela 3.5. Iluminância por classe de tarefas visuais da norma NBR5413 [ABNT, 1992].

| Classe | Iluminância (lx) | Tipo de Atividade |
|---|-------------------------|--|
| A Iluminação geral para áreas usadas interruptamente ou com tarefas visuais simples. | 20 – 30 – 50 | Área pública com arredores escuros. |
| | 50 – 75 – 100 | Orientação simples para permanência curta. |
| | 100 – 150 – 200 | Recintos não usados para trabalho contínuo, depósitos. |
| B Iluminação geral para área de trabalho. | 200 – 300 - 500 | Tarefas com requisitos visuais limitados, trabalho bruto de maquinaria, auditório. |
| | 500 – 750 – 1000 | Tarefas com requisitos visuais normais, trabalho médio de maquinaria, escritórios. |
| C Iluminação adicional para tarefas visuais difíceis. | 1000 – 1500 – 2000 | Tarefas com requisitos especiais, gravação manual, inspeção, indústria de roupas. |
| | 2000 – 3000 – 5000 | Tarefas visuais exatas e prolongadas, eletrônica de tamanho pequeno. |
| | 5000 – 7500 - 10000 | Tarefas visuais muito exatas, montagem de microeletrônica. |
| | 10000 – 15000 - 20000 | Tarefas visuais muito especiais, cirurgia. |

De acordo com Iida, 1990, o rendimento das tarefas visuais tende a crescer com o logaritmo da iluminância, a partir de 10 lx até cerca de 1000 lx, enquanto que a fadiga visual se reduz. A partir deste ponto, o aumento da iluminância não provoca melhora considerável no rendimento, enquanto que a fadiga visual começa a aumentar. Estudos realizados por Grandjean, 1998, apresentam resultados estatísticos que demonstram insatisfação de trabalhadores de um escritório, submetidos a intensidades de iluminância superiores a 1000 lx. Valores de 2000 lx são recomendados como limite máximo de iluminância, e excepcionalmente, valores de 3000 lx para tarefas de montagem ou inspeção [Iida, 1990].

Além do nível de iluminância, outros fatores são constantemente citados pelas referências como de importância decisiva para o conforto visual, como por exemplo o ofuscamento, uniformidade espacial e uniformidade temporal. O planejamento adequado, até mesmo do uso de cores e contraste, pode ter efeito sobre a produtividade para determinadas atividades.

3.5. Métodos Para Projeto de Iluminação

O Método dos Lúmens é uma forma prática para se calcular rapidamente uma configuração de luminárias de forma a atender às restrições de projeto. No entanto, não há como assegurar que a configuração encontrada gere o fluxo luminoso correto no plano de trabalho, ou que haja uniformidade deste fluxo ao longo do plano de trabalho. Este método é apresentado por IESNA, 2000, Philips, 1981 e, da mesma forma, por OSRAM, 2005.

De acordo com as bibliografias citadas, o Método dos Lúmens é baseado em uma formulação algébrica, na qual o fluxo luminoso gerado pelas lâmpadas instaladas no teto deve ser igual ao fluxo luminoso desejado no plano de trabalho. Com essa finalidade, é necessário definir as variáveis de projeto mostradas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Variáveis de projeto para o Método dos Lúmens.

| Variáveis de projeto | Símbolo |
|-------------------------|-----------------|
| Comprimento | X |
| Largura | Y |
| Área | A |
| Pé direito | Z |
| Refletividade do teto | ρ_{teto} |
| Refletividade da parede | ρ_{parede} |
| Refletividade do piso | ρ_{piso} |
| Iluminância planejada | $q^{(l)}$ |

De posse desses requisitos, tem-se que o fluxo luminoso planejado para o plano de trabalho é dado pela equação:

$$q^{(l)} = q^{(l)} \cdot A \quad (3.9)$$

Considerando efeitos como a perda por meio das absorções de radiação luminosa que ocorrem nas paredes do ambiente, conclui-se que um conjunto de lâmpadas que emitam $Q^{(l)}$, certamente não atenda à iluminância planejada. Por isso, no Método dos Lúmens, essas perdas são corrigidas pelo fator de utilização (η). Para determiná-lo, utiliza-se o chamado índice do recinto (κ), que é definido como:

$$\kappa = \frac{X \cdot Y}{Z(X + Y)} \quad (3.10)$$

O índice do recinto, juntamente com as refletividades ρ_{teto} , ρ_{piso} e ρ_{parede} , permitem encontrar em tabelas o valor para o fator de utilização (η) para o tipo de luminária desejada.

A redução da iluminância também é influenciada pelas condições de manutenção a que as lâmpadas, luminárias e paredes estão sujeitas. A poeira pode prejudicar significativamente a reflexão nas superfícies, bem como tornar o bulbo das lâmpadas opaco. Diversos são os itens que contribuem para o fator de depreciação (Π), que, por não ser tabelado, deve ser estimado com base na experiência do projetista. Algumas sugestões de valores de depreciação são apresentadas por Philips, 1981, onde, para recintos limpos, médios e sujos, recebem os valores 0,8, 0,7 e 0,6, respectivamente. De acordo com OSRAM, 2005, o fator de depreciação igual a 0,8 pode ser utilizado em ambiente salubre e com boa manutenção, e 0,6 para ambientes com manutenção crítica. Com isso, a iluminância do teto deve ser:

$$q_{teto}^{(l)} = \frac{q^{(l)}}{\eta \cdot \Pi} \quad (3.11)$$

e esse é o valor a ser atendido pelo conjunto de lâmpadas instaladas.

Para o cálculo do número de lâmpadas, é necessário escolher o modelo de lâmpada que será utilizado. Dados do fabricante indicam o fluxo luminoso de cada tipo de lâmpada (Φ), como mostrado na Tabela 3.3. Assim, o número de lâmpadas que deve ser utilizado no projeto é dado por:

$$n = \frac{q_{teto}^{(l)} \cdot A}{\Phi} \quad (3.12)$$

O valor encontrado deve ser ajustado, de acordo com a geometria do ambiente, para o valor mais próximo, com o objetivo de permitir uma distribuição uniforme no teto. É recomendado que a distância entre as luminárias seja o dobro da distância entre a mesma e a parede lateral.

O cálculo de iluminação de interiores ainda pode ser feito com o auxílio de softwares comerciais, como por exemplo, pelo programa WinElux, versão 3.0, apresentado por EEE, 2008. Com um ambiente gráfico amigável ao usuário, o WinElux calcula a iluminância da superfície de trabalho e apresenta os resultados em um gráfico de superfície. É possível realizar os cálculos

apenas prescrevendo uma iluminância na superfície de trabalho, onde programa dimensiona a quantidade de lâmpadas a serem utilizadas através do Método dos Lúmens. O programa dispõe ainda de um banco de dados com diversos tipos de lâmpadas, que o usuário pode selecionar e então posicioná-las no teto do ambiente. As respostas obtidas para uma configuração de lâmpadas são imediatamente analisadas e modificações podem ser feitas até se atingir as condições desejadas. De acordo com EEE, 2008, o método utilizado pelo programa para o cálculo da iluminância é denominado ponto-a-ponto, no qual a iluminação de um ponto é determinada através de ângulos de incidência da radiação, e as superfícies recebem um fator de reflexão de acordo com a cor e a textura. Outros softwares podem ser encontrados, entretanto, o interesse pelo WinElux deve-se ao fato de o mesmo ser um software livre.

4. SOLUÇÃO DE PROBLEMAS INVERSOS

Ao projetar a iluminação de um ambiente, deseja-se dimensionar as lâmpadas, de acordo com determinadas condições, para obter uma adequada iluminação. Determinam-se geometrias, dimensões, propriedades, e, em seguida, o projetista discretiza as paredes em pequenas superfícies para aplicar métodos numéricos de solução. Algumas dessas superfícies representam as fontes de iluminação (lâmpadas), outras representam superfícies que atuam passivamente. Para algumas destas últimas, o projetista deve determinar duas condições de contorno, temperatura e fluxo, necessárias à adequação da superfície do ambiente (tais superfícies com duas condições de contorno são denominadas superfícies de projeto). Com a experiência, determinam-se as condições de contorno das demais superfícies. Em seguida, resolvendo o problema pelo método das cavidades radiantes, verificam-se as condições encontradas e se estas foram atendidas. Caso contrário, o projetista deve determinar novas posições ou novos valores para a potência das lâmpadas e reiniciar o processo, como pode ser verificado na Figura 4.1.

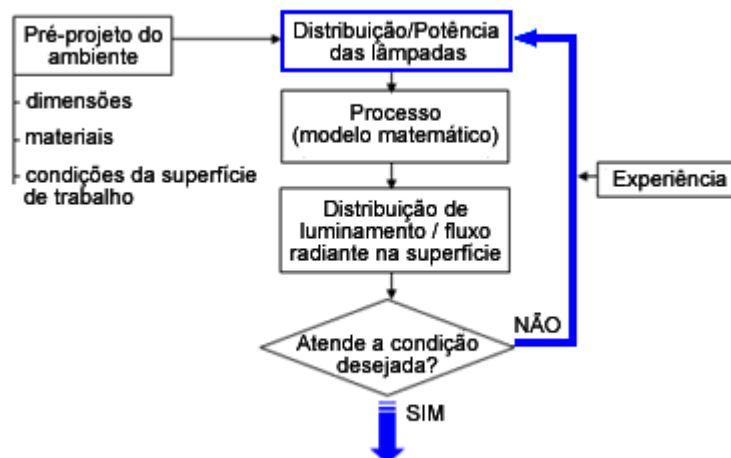


Figura 4.1. Fluxograma do processo de cálculo direto.

Quando o problema em questão é determinar a causa a partir do efeito, ou seja, no caso estudado, determinar a posição e a potência das lâmpadas de acordo com uma resposta de fluxo na superfície de trabalho, trabalha-se com metodologias caracterizadas como problemas inversos, que constituem uma classe muito interessante e comum de problemas em ciência e engenharia. Segundo Braga Filho, 2002, o termo problemas inversos envolve também a área de projeto ótimo, que pretende identificar as melhores maneiras de se projetar um experimento, visando medir um determinado parâmetro, de forma a maximizar a informação colhida, e de

forma a minimizar o erro do experimento, por exemplo. Portanto, problemas inversos envolvem conhecimentos tanto numéricos quanto experimentais, e um pode complementar o outro. Para entender a diferença entre problema direto e problema inverso, é possível compará-los através da Figura 4.2. Há uma grande quantidade de formulações e métodos de solução para esses problemas, que serão apresentados posteriormente.

Para ilustrar as dificuldades associadas à análise inversa, considera-se uma cavidade radiante formada por seis superfícies em forma de cubo. Neste, três faces são elementos de projetos (1, 2 e 3) e as demais são elementos fontes (4, 5 e 6). Não havendo elementos de parede, e utilizando as equações para cavidades riantes, apresentadas no capítulo 2, chega-se a um sistema linear do tipo $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$, onde a matriz \mathbf{A} é formada pelos fatores de forma entre os elementos de superfície de projeto e os elementos das lâmpadas, o vetor \mathbf{x} é formado pelas radiosidades dos elementos das lâmpadas, e o vetor \mathbf{b} é formado pela irradiação da superfície de projeto e pela energia radiante incidente das superfícies adiabáticas do ambiente. Assim tem-se:

$$\begin{bmatrix} F_{14} & F_{15} & F_{16} \\ F_{24} & F_{25} & F_{26} \\ F_{34} & F_{35} & F_{36} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{o4}'' \\ q_{o5}'' \\ q_{o6}'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Esse sistema linear apresenta características especiais, pois a matriz \mathbf{A} não é necessariamente quadrada e, geralmente, é mal-condicionada. Além disso, frequentemente o número de equações (elementos de projeto) é diferente do número de incógnitas (elementos de lâmpadas), o que conduz antecipadamente à inviabilidade de métodos como eliminação gaussiana ou Gauss-Seidel para solucionar esta classe de problemas. Para encontrarmos soluções aceitáveis, é necessário condicionar a matriz utilizando métodos que estabilizem o problema e permitam a execução de soluções aproximadas. A forma mais comum de solução destes problemas é através de métodos de regularização.

4.1. Métodos de Regularização

Os métodos de regularização consistem em aproximar a solução do problema mal-posto, utilizando soluções de uma família de problemas bem-postos, de modo a obter uma aproximação estável e que convirja para a solução do problema inverso considerado. Em outras palavras, os métodos de regularização consistem em determinar uma solução aproximada de forma que seja mais suave e compatível com os dados esperados, para certo nível de ruído. A busca dessa

solução mais suave é uma informação adicional, que transforma o problema mal-condicionado em um problema bem-condicionado (Campos Velho, 2002). Um esquema do método de regularização pode ser visto na Figura 4.3.

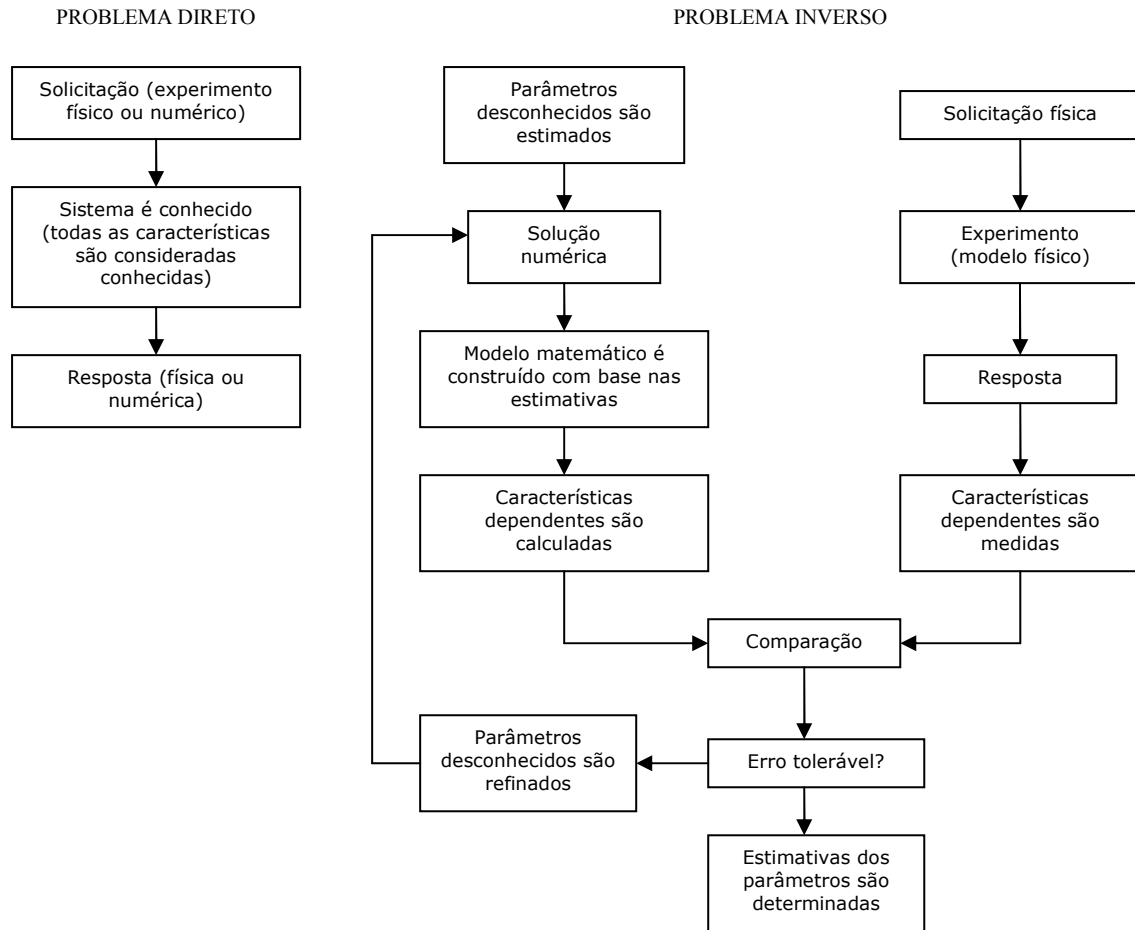


Figura 4.2. Comparação entre problema direto e inverso [Braga Filho, 2002].

A solução é estabilizada introduzindo-se constantes adicionais ao problema. Estas modificações no sistema introduzirão, inevitavelmente, um erro à solução, que se torna maior na medida em que o grau de estabilização imposto aumenta. Há, portanto, um balanço a ser feito entre estes dois aspectos da solução: estabilidade e resíduo.

Implementando matematicamente, o método é formulado como um problema de otimização com restrições. Conforme Campos Velho, 2002, o problema é caracterizado por:

$$\min_{u \in U} \|A(u) - f^\delta\|_2^2 \text{ sujeito a } \Omega[u] \leq \rho \quad (4.2)$$

onde $A(u) = f^\delta$ representa o modelo direto e $\Omega[u]$ é o operador de regularização. Pela técnica dos multiplicadores de Lagrange podemos colocar na mesma função custo os objetivos de fidelidade dos parâmetros com o modelo direto e a de regularidade (suavidade) exigida da quantidade desconhecida. Então:

$$\min_{u \in U} \left\{ \|A(u) - f^\delta\|_2^2 + \alpha \|\Omega[u]\| \right\} \quad (4.3)$$

onde α é o parâmetro de regularização. Quando $\alpha \rightarrow 0$ o termo de fidelidade dos dados na função objetivo é superestimado, enquanto que quando $\alpha \rightarrow \infty$ toda a informação contida no modelo matemático é perdida.

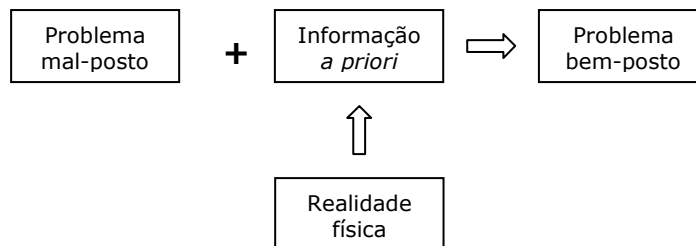


Figura 4.3. Idéia básica do método de regularização [Campos Velho, 2002].

O operador de regularização pode ser resolvido de diversas formas, onde as mais comuns, citadas na literatura, são soluções através do método de Regularização de Tikhonov, pelo Princípio da Máxima Entropia, ou pela Solução do Problema de Otimização.

4.2. Algoritmos de Otimização

Algoritmos de otimização também são conhecidos como “Algoritmos iterativos de melhoramento”. Isto se deve ao fato de que estes algoritmos partem de uma determinada configuração, que pode ser ou não a solução do problema, e dispendo de critérios para analisar a qualidade destes resultados, fazem alterações de modo que, ao fim de um certo número de iterações, a solução seja ótima. Entretanto nada garante que ao final das iterações um ótimo global seja encontrado, mas a solução geralmente é de boa qualidade, mesmo para problemas de grande complexidade.

Para problemas desta natureza, é necessário que sejam definidas quais são as possíveis soluções e como estas serão descritas (variáveis de projeto), como medir a qualidade das

soluções (função de otimização ou função objetivo) e qual a vizinhança de uma possível solução (restrições). Estas definições, segundo Vanderplaats, 1998, podem ser tratadas da seguinte forma:

Função à minimizar ou maximizar:

$$F(x) \quad (\text{função objetivo}) \quad (4.4)$$

Sujeito à:

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, m \text{ (restrições de desigualdade)} \quad (4.5)$$

$$h_k(x) = 0 \quad k = 1, l \text{ (restrições de igualdade)} \quad (4.6)$$

$$x_{i_inf} \leq x_i \leq x_{i_sup} \quad i = 1, n \text{ (restrições laterais)} \quad (4.7)$$

Sendo:

$$x^T = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \quad (\text{variáveis de projeto}) \quad (4.8)$$

onde x_{i_inf} e x_{i_sup} representam os limites inferior e superior, respectivamente, ao valor de cada variável. As funções definidas em (4.4), (4.5), e (4.6) podem ser lineares ou não, e explícitas ou implícitas em x .

Uma variável de projeto equivale a um dos arranjos possíveis, dentro do espaço de configurações de $F(x)$, que satisfaz as propriedades impostas por possíveis restrições. O procedimento que transforma uma configuração em outra será tratado neste trabalho como “flipar” (geralmente, em trabalhos envolvendo algoritmos evolutivos, este termo é tratado como “perturbação”). O conjunto de novas configurações, a partir de uma configuração específica x^T , depende das restrições e do procedimento de flipagem utilizado. Assim, de acordo com Castro *et al.*, 2002, além de uma boa escolha nos valores dos parâmetros do algoritmo, a escolha das restrições e da função objetivo constitui os aspectos centrais da aplicação destes algoritmos a problemas concretos.

Os problemas de otimização podem ser classificados segundo diversos critérios relacionados com as propriedades da sua função objetivo, $F(x)$, e do conjunto de soluções viáveis x^T . De acordo com Silva, 2008, os algoritmos numéricos para solução de problemas de otimização podem ser classificados em métodos de programação matemática (determinísticos) e métodos probabilísticos (estocásticos). A diferença essencial dos métodos determinísticos para os métodos estocásticos é que os últimos procuram encontrar o mínimo global do problema de otimização evitando os mínimos locais. Já os métodos determinísticos fornecem um mínimo

local. Os métodos estocásticos, como o próprio nome sugere, se utilizam de um processo de busca randômica guiados por decisões probabilísticas para obter o mínimo global, já os métodos determinísticos se valem do valor exato das variáveis. Além disso, os métodos estocásticos são também ferramentas poderosas para problemas com variáveis discretas.

Vários métodos de otimização já foram desenvolvidos, sendo que nos últimos anos deu-se ênfase no desenvolvimento de sistemas inspirados pela natureza, como os algoritmos genéticos, recozimento simulado, redes neurais e algoritmos formiga. Outros métodos, e como estes estão relacionados entre si, podem ser vistos no fluxograma da Figura 4.4. Destaca-se o método da Otimização Extrema (EO), que é um método estocástico, inspirado pela natureza, e que deu origem ao método da Otimização Extrema Generalizada (GEO), que constitui o método selecionado para o problema de iluminação considerado neste trabalho.

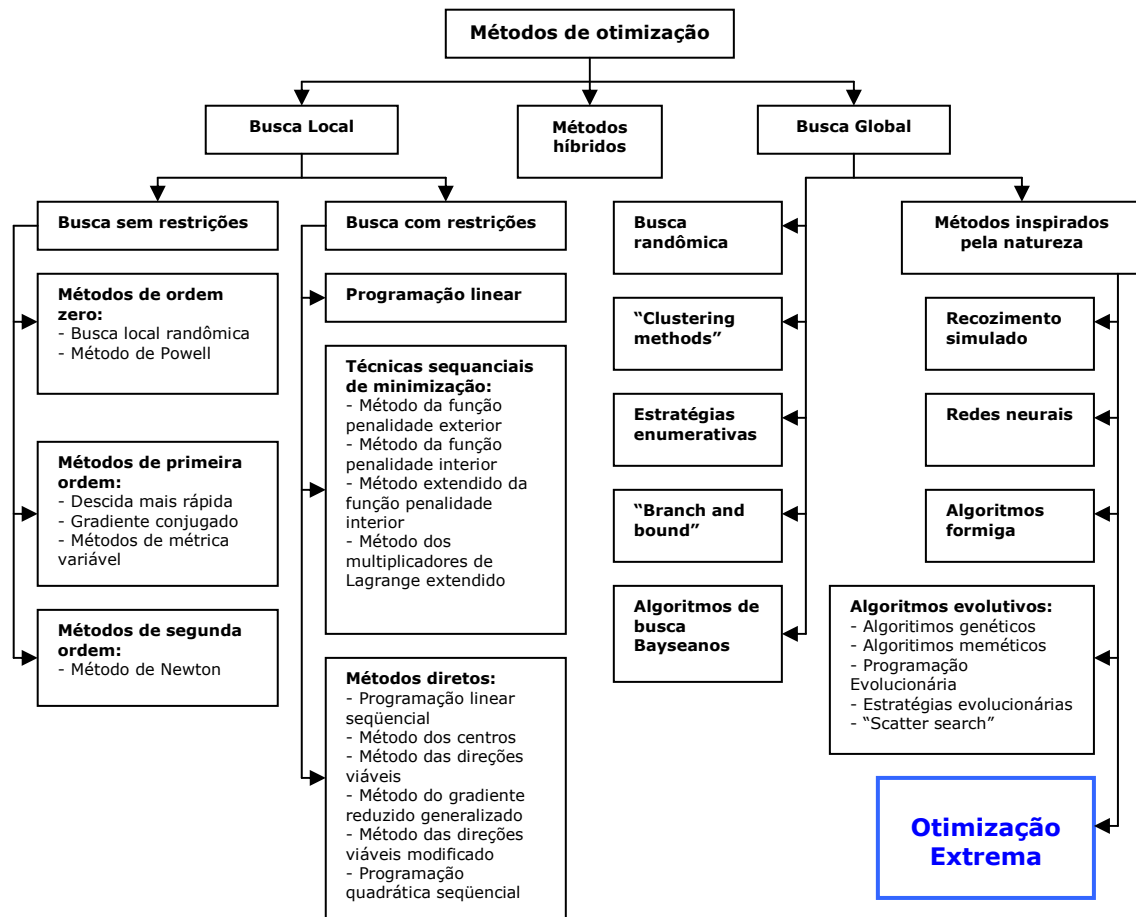


Figura 4.4. Algumas técnicas numéricas para uso em problemas de otimização [De Sousa, 2003].

O método EO foi criado por Stefan Boettcher e Allon G. Percus (Bak *et al.*, 1987), e tem sua dinâmica inspirada na criticalidade auto-organizada (*Self-Organized Criticality – SOC*), conceito que descreve a complexidade emergente em sistemas físicos, onde uma estrutura com

adaptação otimizada emerge naturalmente, pela simples seleção contra o extremamente ruim. A teoria de SOC propõe que sistemas complexos que possuem muitos elementos que interagem entre si, evoluem naturalmente para um estado crítico onde uma pequena mudança em um deles gera “avalanches” que podem atingir qualquer dos outros elementos que fazem parte do sistema [Bak e Chen, 1991]. Um método de otimização baseado no modelo de Bak-Sneppen, e que possua uma busca dinâmica que apresente características de SOC, possibilitaria o aparecimento de soluções ótimas rapidamente, sistematicamente modificando as espécies menos adaptadas da população, ao mesmo tempo em que poderia escapar de mínimos locais através de avalanches [De Sousa, 2003].

4.3. Método da Otimização Extrema Generalizada

O método da Otimização Extrema Generalizada (GEO) é um algoritmo que generaliza o método da Otimização Extrema (EO), mas, aplicando o método τ -EO para escolher a espécie que sofrerá mutação [De Sousa *et al.*, 2003]. Este método parte do pressuposto de que a probabilidade de uma variável ser escolhida para ser modificada é dada por:

$$P(k) = k^{-\tau} \quad (4.7)$$

onde P é a probabilidade, em porcentagem, k é o índice de adaptabilidade, e τ é o parâmetro ajustável (positivo). O parâmetro τ pode variar de 0 a ∞ , sendo que para $\tau \rightarrow 0$, o algoritmo torna a busca pelo ótimo totalmente aleatória, onde todas as variáveis tem a mesma probabilidade de serem escolhidas para sofrer mutação, e para $\tau \rightarrow \infty$, a variável menos adaptada é sempre a escolhida para sofrer mutação.

O método GEO diferencia-se do método EO pelo fato de que sua implementação é independente do tipo de problema que está sendo atacado, já que no mesmo não existe um índice de adaptabilidade associado a cada variável, e que é definido de acordo com o problema abordado. É um algoritmo voltado preferencialmente para atacar problemas de otimização com um espaço de projeto complexo, que pode ser não convexo, disjunto, com múltiplos mínimos e não linearidade na função-objetivo e nas restrições. Pode ser aplicado a problemas com qualquer tipo de variáveis, sejam elas contínuas, inteiras ou discretas.

Seguindo a lógica do modelo τ -EO, N variáveis são dispostas em seqüência, e a cada uma é atribuído um índice de adaptabilidade, que determinará quais sofrerão mutação. No modelo GEO, as variáveis de projeto são formadas por uma seqüência (string) de bits, onde cada bit

representa uma espécie do modelo anterior, e pode assumir o valor 0 ou 1. Esta seqüência de bits pode ser vista na Figura 4.5.

Para cada bit da seqüência é atribuído um índice de adaptabilidade que é proporcional ao ganho (ou perda) que a função-objetivo apresenta quando sofre uma mutação. Então, os bits são ordenados de $k = 1$ a $k = N$, onde o bit com menor índice de adaptabilidade recebe o índice 1 e o mais adaptado N . Outro bit é escolhido para sofrer mutação, e este processo se repete até que o critério de parada seja satisfeito. A melhor configuração de bits identificada neste processo é guardada e retorna ao final do processo.

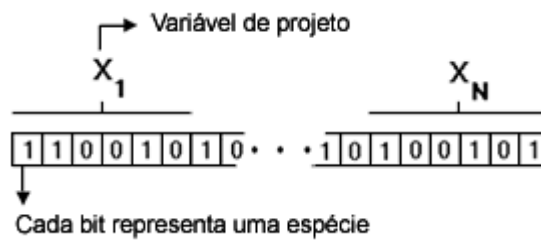


Figura 4.5. N variáveis de projeto codificadas em uma seqüência binária [De Sousa, 2003].

A grande vantagem do método GEO sobre outros métodos, como os algoritmos genéticos e recozimento simulado, é a existência de apenas um parâmetro livre a ser ajustado, enquanto nos outros existem pelo menos três. Além disso, este parâmetro possui um intervalo de ajuste relativamente mais estreito e válido para uma grande quantidade de tipos de problema de otimização. Estas características fazem com que os ajustes no método GEO sejam feitos de modo muito menos dispendioso.

4.3.1. Aplicação do Algoritmo da Otimização Extrema Generalizada

Em uma implementação, a primeira decisão a ser tomada é definir o número de bits que representará cada uma das variáveis de projeto. Este é dado de acordo com a precisão desejada para o valor de cada variável. Para variáveis contínuas é utilizada a Eq. (4.8) para calcular o número mínimo m de bits necessário para se obter uma determinada precisão p (Lin e Hajela, 1992):

$$2^m \geq \left[\frac{(x_{i_sup} - x_{i_inf})}{p} + 1 \right] \quad (4.8)$$

Então, para uma precisão p e uma variável de projeto x_i , sabendo seus valores mínimo (x_{i_min}) e máximo (x_{i_max}), obtém-se o número mínimo de bits l_i necessário para representar a variável no algoritmo GEO. Caso o valor calculado para m através da relação (4.8) não seja um número inteiro, atribui-se a l_i o próximo número inteiro superior a m .

No algoritmo, o valor de x para cada variável é obtido primeiramente transformando seu valor binário para base 10. O valor real de x_i é obtido pela relação:

$$x_i = x_{i_inf} + (x_{i_sup} - x_{i_inf}) \cdot \frac{x_{i_b10}}{(2^{l_i} - 1)} \quad (4.9)$$

onde x_{i_b10} representa o número inteiro gerado na transformação da variável de projeto de uma representação binária para uma na base 10.

Outro parâmetro de extrema importância que deve ser definido antes de iniciar-se a busca pelo ótimo é o valor de τ . Uma boa escolha desse parâmetro reflete-se no fato de que para cada problema existe um valor de τ que torna a busca pelo mínimo mais eficiente. Em suma, de acordo com De Sousa, 2003, o algoritmo GEO é composto dos seguintes passos:

1. Inicializa-se aleatoriamente uma seqüência binária que codifica N variáveis de projeto. Cada variável é codificada em uma “sub-seqüência” de comprimento $l_i = 1, N$. Para uma configuração inicial de bits C , é calculado o valor da função objetivo V e instituído $C_{melhor} = C$ e $V_{melhor} = V$.
2. Para cada bit da seqüência, em uma dada iteração:
 - a) Muda-se o valor do bit (de 0 para 1 ou de 1 para 0) e calcula o valor da função objetivo V_i , da configuração de bits C_i ;
 - b) Atribui-se ao bit um índice de adaptabilidade $\Delta V = (V_i - V_{melhor})$, que indica o ganho (ou perda) que se tem ao mudar o valor do bit, comparado com o melhor valor encontrado para a função objetivo até o momento;
 - c) Retorna-se o bit ao seu valor original.
3. Ordenam-se os bits de acordo com os seus índices de adaptabilidade, de $k = 1$ para o menos adaptado a $k = L$, para o mais adaptado. Em um problema de minimização valores altos de ΔV_i terão maior “rank”, enquanto que em problemas de maximização

- ocorre o oposto. Se ocorrer de dois ou mais bits apresentarem o mesmo valor para ΔV_i eles são ordenados aleatoriamente com distribuição uniforme.
4. Escolhe-se com igual probabilidade um bit candidato i para sofrer mutação (mudar de 0 para 1 ou de 1 para 0). Gera-se em seguida um número aleatório RAN, com distribuição uniforme, no intervalo $[0,1]$. Se $P_i(k) = k^{-\tau}$ for maior ou igual a RAN, o bit é modificado. Se não, o processo se repete até que um bit seja confirmado para ser modificado.
 5. Para o bit escolhido para sofrer mutação faz $C = C_i$ e $V = V_i$.
 6. Se $V < V_{melhor}$ ($V > V_{melhor}$ para um problema de maximização) então faz $V_{melhor} = V$ e $C_{melhor} = C$.
 7. Repetem-se os passos 2 à 6 até que um dado critério de parada seja satisfeito.
 8. Retorna-se C_{melhor} e V_{melhor} .

4.3.2. Variáveis e Restrições no Método da Otimização Extrema Generalizada

As variáveis contínuas são representadas no GEO de forma binária, com uma precisão p . Variáveis inteiras possuem precisão unitária ($p = 1$) e podem ser tratadas de três formas:

I. Se a relação $(x_{i_sup} - x_{i_inf}) = 2^N - 1$ for satisfeita, haverá uma seqüência de bits que representará todas as N variáveis biunivocamente.

Caso não exista uma correspondência direta entre uma seqüência de bits e as variáveis:

II. O menor número m que satisfaz $2^m > (x_{i_sup} - x_{i_inf}) + 1$ é calculado e para cada uma das N variáveis é associado a uma seqüência de bits. Para as $2^m - N$ variáveis restantes, são atribuídos valores inteiros fora do intervalo das variáveis, os quais são tratados como soluções inviáveis.

III. As $2^m - N$ variáveis restantes são associadas a inteiros dentro do intervalo viável. Neste caso, uma ou mais variáveis serão associadas com mais de uma seqüência de bits. Embora esta última opção evite a necessidade de impor restrições adicionais ao problema, ela implica, no caso do GEO, em uma probabilidade não-uniforme para o processo de seleção de um bit sofrer mutação no passo 4 do algoritmo.

Variáveis discretas podem ser tratadas da mesma forma que as variáveis inteiras. O processo é executado em dois passos: primeiro, para cada variável discreta um número inteiro é

associado e, segundo, uma das três aproximações descritas anteriormente é usada para codificar estes valores de forma binária.

As restrições em otimização podem ser manuseadas de diferentes maneiras. Para o GEO, as restrições laterais (limites das variáveis de projeto) são diretamente incorporadas quando as variáveis são codificadas na forma binária. Restrições de igualdade e desigualdade são facilmente incorporadas dentro dos algoritmos simplesmente dando um valor de adaptabilidade alto (para um problema de minimização) ou baixo (para um problema de maximização), para o bit que, quando invertido, leva a configuração para uma região inviável do espaço de projeto. Por exemplo, em um problema de minimização, quando os valores de adaptabilidade são atribuídos aos bits no passo 2, aquele que quando invertido resulta em uma configuração inviável recebe um alto valor para ΔV_i (o mesmo valor é atribuído para todos bits em que isto ocorre). Isto significa que aqueles bits serão considerados bem adaptados e terão uma baixa probabilidade de serem invertidos no passo 4. Entretanto, eles não são proibidos de serem invertidos, o que faz o algoritmo apto a andar através de regiões inviáveis do espaço de projeto. Isto dá ao algoritmo uma grande flexibilidade que pode, por exemplo, ser aplicada a espaços de projeto que apresentam regiões viáveis descontínuas (o que permite uma solução global no resultado do problema). De fato, o GEO pode até mesmo começar de uma solução inviável. Neste caso, um valor qualquer é atribuído a V_{ref} na inicialização do algoritmo, a qual é substituída pelo primeiro valor viável de V encontrado durante a busca.

Apresentaram-se aqui apenas as principais características do método GEO, entretanto, uma explicação mais detalhada do método pode ser encontrada em De Sousa, 2003.

5. METODOLOGIA DE SOLUÇÃO

Para um ambiente com características previamente definidas, o método se propõe a especificar o posicionamento das fontes e a potência em que devem operar, de modo a atender uma condição de iluminação prescrita. Este é um caso típico de problema inverso, uma vez que algumas superfícies possuem até duas condições de contorno, enquanto outras não possuem nenhuma.

O ambiente de projeto considerado consiste em uma configuração retangular com características de cavidade, isto é, o balanço energético nas superfícies é nulo, indicando que nenhuma energia entra ou sai do sistema, como ocorreria caso, por exemplo, se considerássemos a existência de janelas (iluminação externa). Na solução do problema existem três diferentes classes de superfícies, mostradas na Figura 5.1: superfície de projeto (região cinza), lâmpadas (região amarela) e paredes (demais regiões).

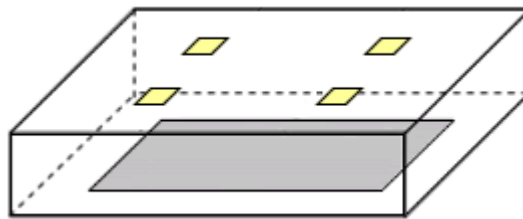


Figura 5.1. Cavidade considerada no problema.

A superfície de projeto é assim denominada pois sobre a mesma se deseja controlar a irradiação incidente. As lâmpadas são modeladas como superfícies fonte de radiação luminosa, sendo delimitados por um elemento de área da malha numérica.

Com exceção das fontes luminosas, as demais superfícies consideradas encontram-se à temperatura ambiente, cerca de 300K. Nesta temperatura o poder emissivo luminoso é de ordem inferior a 10^{-20} lx, de forma que pode ser desprezado ($e_{jd}^{(l)} = e_{jw}^{(l)} \rightarrow 0$), originando a condição de contorno de parede fria.

A malha numérica aplicada às superfícies que compõe a cavidade divide as mesmas em pequenas áreas quadradas, denominadas de elementos de área. Os elementos de área de projeto, que formam a superfície de projeto, são identificados pelo índice jd e possuem a condição de contorno de irradiação prescrita. Os elementos de parede, identificados por jw , formam as demais superfícies frias consideradas. Os elementos de fontes de luz, jl , são os locais

geométricos onde se encontram as fontes de iluminação. Para estes elementos não há qualquer condição prescrita, seja de temperatura, fluxo ou localização, pois é isto que se deseja encontrar com a solução do problema.

As superfícies da cavidade são cinzas, de modo que a emissividade e a absortividade são iguais, e independem do comprimento de onda.

É conveniente adimensionalizar as variáveis do problema de modo que a metodologia a seguir apresentada possa ser aplicada para diferentes cavidades paralelepípedicas com qualquer condição prescrita. Uma das condições que se deseja prescrever é a irradiação da superfície de projeto, sendo que o valor de iluminância prescrito é considerado como referência (q_{ref}''), pela qual todos os fluxos serão divididos:

$$Q = \frac{q''}{q_{ref}''} \quad (5.1)$$

Um cuidado especial deve ser dado ao se utilizar valores adimensionais em operação com características não-lineares, como, por exemplo, no caso da equação de distribuição de Planck, onde existe uma dependência não-linear em relação à temperatura. Neste caso, é necessário adimensionalizar as grandezas, sempre que ocorrerem estas situações, e adimensionalizá-las novamente somente após feitas as devidas operações.

Em síntese, as condições de contorno do problema adimensional são:

- superfícies de projeto: poder emissivo nulo e iluminância total unitária

$$e_{jd}^{(l)} = 0 \quad \text{e} \quad Q_{i,jd}^{prescrito} = 1 \quad (5.2)$$

- superfícies de parede: poder emissivo nulo

$$e_{jw}^{(l)} = 0 \quad (5.3)$$

- superfícies de lâmpada: nenhuma condição de contorno.

Sendo o problema descrito um caso típico de problema inverso, pelos métodos de otimização, o próprio modelo matemático se encarrega de encontrar os fluxos das lâmpadas que atendem às condições prescritas. Também é necessário localizar a posição destas fontes, tornando-se outra incógnita. O fato de algumas superfícies possuírem duas condições de

contorno e outras nenhuma caracteriza o problema como mal-condicionado. Deste modo, é necessário utilizar algum método de regularização para resolver este impasse. Então, pode-se aplicar o método das radiosidades e resolver o problema de forma direta e avaliando o quanto a irradiação no plano de trabalho se aproxima da condição prescrita.

5.1. Formulação do Problema

Objetivando montar um sistema de equações que permita chegar aos valores de potência e posicionamento das lâmpadas, considera-se primeiramente que as superfícies de projeto e de parede, por possuírem condição de temperatura prescrita, possuem equações de balanço descritas em termos de poder emissivo e, mesmo que inicialmente as superfícies de lâmpadas não possuem uma condição de contorno, serão descritas com condição de fluxo radiante conhecido, por serem as superfícies de maior interesse. Para o sistema de equações tem-se:

$$jd: \quad Q_{o,jd} = \varepsilon_{jd} \cdot \frac{e_{jd}^{(l)}}{q_{ref}''} + (1 - \varepsilon_{jd}) \cdot \left(\sum_{jd=1}^{jdt} F_{dd} \cdot Q_{o,jd} + \sum_{jw=1}^{jw\iota} F_{dw} \cdot Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jl\iota} F_{dl} \cdot Q_{o,jl} \right) \quad (5.4)$$

$$jw: \quad Q_{o,jw} = \varepsilon_{jw} \cdot \frac{e_{jw}^{(l)}}{q_{ref}''} + (1 - \varepsilon_{jw}) \cdot \left(\sum_{jd=1}^{jdt} F_{wd} \cdot Q_{o,jd} + \sum_{jw=1}^{jw\iota} F_{ww} \cdot Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jl\iota} F_{wl} \cdot Q_{o,jl} \right) \quad (5.5)$$

$$jl: \quad Q_{o,jl} = Q_{r,jl} + \left(\sum_{jd=1}^{jdt} F_{ld} \cdot Q_{o,jd} + \sum_{jw=1}^{jw\iota} F_{lw} \cdot Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jl\iota} F_{ll} \cdot Q_{o,jl} \right) \quad (5.6)$$

onde jdt , $jw\iota$ e $jl\iota$ representam o número total de superfícies de projeto, paredes e lâmpadas, respectivamente, ε_{jd} e ε_{jw} são a emissividade das superfícies de projeto e parede, F é o fator de forma entre as superfícies indicadas no sub-índice, q_{ref}'' é a iluminância de referência em lx, $e_{jd}^{(l)}$ e $e_{jw}^{(l)}$ são o poder emissivo das superfícies de projeto e parede em cada banda na unidade lx.

Todas as radiosidades ($Q_{o,jd}$, $Q_{o,jw}$ e $Q_{o,jl}$) e os fluxos líquidos ($Q_{r,jl}$) são desconhecidos.

As condições de contorno aplicadas ao problema são:

- superfícies de projeto: $e_{jd}^{(l)} = 0$;

- superfícies de parede: $e_{jw}^{(l)} = 0$;

Aplicando as condições de contorno ao equacionamento, e considerando as relações dos fatores de forma possíveis em cada superfície, tem-se:

$$\text{jd:} \quad Q_{o,jd} = (1 - \varepsilon_{jd}) \cdot \left(\sum_{jw=1}^{jwl} F_{dw} \cdot Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jlt} F_{dl} \cdot Q_{o,jl} \right) \quad (5.7)$$

$$\text{jw:} \quad Q_{o,jw} = (1 - \varepsilon_{jw}) \cdot \left(\sum_{jd=1}^{jdt} F_{wd} \cdot Q_{o,jd} + \sum_{jw=1}^{jwl} F_{ww} \cdot Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jlt} F_{wl} \cdot Q_{o,jl} \right) \quad (5.8)$$

$$\text{jl:} \quad Q_{o,jl} = Q_{r,jl} + \left(\sum_{jd=1}^{jdt} F_{ld} \cdot Q_{o,jd} + \sum_{jw=1}^{jwl} F_{lw} \cdot Q_{o,jw} \right) \quad (5.9)$$

As condições de fluxo líquido ainda são desconhecidas, entretanto, o método da Otimização Extrema Generalizada (GEO) se encarrega de estabelecer a localização de cada lâmpada e os valores dos fluxos, dessa forma, todos os parâmetros desconhecidos passam a ter um valor agregado, e o sistema passa a ser formado por um número de equações igual ao somatório do número de superfícies consideradas e pelo mesmo número de incógnitas, tornando-se um sistema de equações bem-condicionado, com dominância na diagonal, podendo então ser resolvido pelo método de Gauss-Seidel.

É possível encontrar os valores do fluxo líquido nas superfícies de projeto e paredes. As equações correspondentes tornam-se:

$$\text{jd:} \quad Q_{r,jd} = Q_{o,jd} - \left(\sum_{jw=1}^{jwl} F_{dw} \cdot Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jlt} F_{dl} \cdot Q_{o,jl} \right) \quad (5.10)$$

$$\text{jw:} \quad Q_{r,jw} = Q_{o,jw} - \left(\sum_{jd=1}^{jdt} F_{wd} \cdot Q_{o,jd} + \sum_{jw=1}^{jwl} F_{ww} \cdot Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jlt} F_{wl} \cdot Q_{o,jl} \right) \quad (5.11)$$

O erro do fluxo líquido calculado na solução é dado por:

$$\text{erro}_{jd} = \left| \frac{Q_{i,jd}^{\text{atual}} - Q_{i,jd}^{\text{anterior}}}{Q_{i,jd}^{\text{atual}}} \right| \quad (5.12)$$

O equacionamento apresentado ainda pode ser utilizado para realizar os cálculos de forma direta, bastando inserir valores manualmente, fazendo desta forma o papel do método de otimização.

5.2. Pós-Processamento

Depois de obtidos os resultados da metodologia apresentada, é importante realizar um balanço global de energia na cavidade. Para tal, consideram-se os fluxos líquidos das superfícies em termos totais. Portanto, este balanço global da cavidade nada mais é do que o somatório dos fluxos líquidos totais em todas as superfícies. A solução é tanto melhor quanto menor for o desvio do balanço global em relação ao valor nulo, sendo de interesse relacionar o balanço global de energia com a quantidade total de energia em questão, tornando-se esta adimensional. Essa grandeza, denominada balanço global relativo, é dada por:

$$bal = \frac{\sum_{jd=1}^{jdt} Q_{r,jd} + \sum_{jw=1}^{jwt} Q_{r,jw} + \sum_{jl=1}^{jlt} Q_{r,jl}}{\sum_{jd=1}^{jdt} |Q_{r,jd}| + \sum_{jw=1}^{jwt} |Q_{r,jw}| + \sum_{jl=1}^{jlt} |Q_{r,jl}|} \quad (5.13)$$

O balanço global relativo, na Eq. (5.13), possibilita dimensionar a magnitude do balanço global independentemente da quantidade de energia trocada. São comumente utilizados valores da ordem de 10^{-3} para caracterizar uma cavidade numericamente correta.

Por último é avaliada a capacidade desta metodologia em atingir os objetivos, que são definir o posicionamento e a potência das lâmpadas, de forma a atender um fluxo prescrito na superfície de projeto. Para avaliar a busca pelo ótimo global, referente à análise inversa, o problema pode ser formulado pela minimização da função F , que é dado pelo quadrado da diferença entre o fluxo luminoso especificado e o fluxo luminoso obtido, como segue:

$$F = \sum_{jd} \left(|Q_{i,jd}^{prescrito}| - |Q_{i,jd}| \right)^2 \quad (5.14)$$

Ainda cabe avaliar o desvio médio da solução, que corresponde ao valor, em porcentagem, que relaciona a iluminância atingida pela metodologia e a iluminância prescrita:

$$desvio_{m\u00e9dio} = \frac{\sum_{jd} \left| \frac{Q_{i,jd} - Q_{i,jd}^{prescrito}}{Q_{i,jd}^{prescrito}} \right|}{M} \times 100 \quad (5.15)$$

sendo M o n\u00famero de superf\u00edcies de projeto. O desvio m\u00e1ximo encontrado na superf\u00edcie de projeto \u00e9:

$$desvio_{m\u00e1ximo} = \max_{jd} \left| \frac{Q_{i,jd} - Q_{i,jd}^{prescrito}}{Q_{i,jd}^{prescrito}} \right| \times 100 \quad (5.16)$$

6. RESULTADOS

Para a obtenção dos resultados serão executadas configurações de geometria semelhantes às encontradas em Seewald, 2006, com o objetivo de tornar possível uma complementação adequada a respeito do tema proposto. Nesse sentido, considera-se um ambiente na forma de cavidade paralelepípedica, sem janelas, apenas com iluminação artificial gerada por lâmpadas incandescentes instaladas no teto. O comprimento adotado para a sala será $15 \times 12 \times 3$ m, mas, adimensionalizando em relação ao eixo de 15 m, temos: $x = 1$, $y = 0,8$ e $z = 0,2$. É importante salientar que com esta operação, os resultados obtidos podem ser estendidos para outras dimensões que mantenham a mesma proporcionalidade. Para o caso tridimensional considerado, o comprimento, largura e altura, designados respectivamente, por X , Y e Z , terão a proporção adimensional dada por $X/X = 1$ para o comprimento, $Y/X = 0,8$ para a largura e $Z/X = 0,2$ para a altura.

Para simplificar o processamento, será considerada uma simetria com relação a dois planos perpendiculares, como ilustrado na Figura 6.1. Nesta simetria, as dimensões serão consideradas como $X/2$, $Y/2$ e Z .

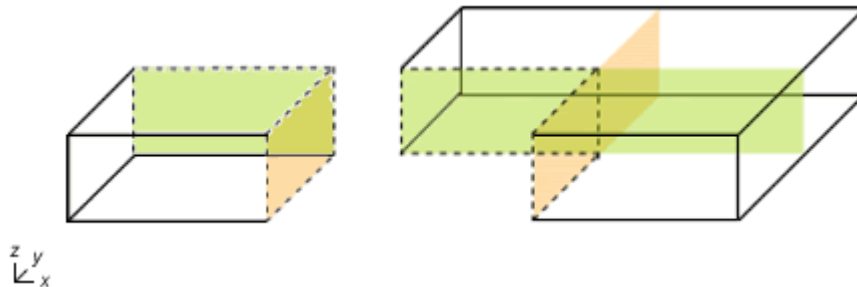


Figura 6.1. Planos de simetria considerados na cavidade.

Estas são as configurações básicas, juntamente com as especificações de emissividade na superfície de trabalho, $\varepsilon_{jd} = 0,9$, e superfícies de parede e teto, $\varepsilon_{jw} = 0,5$. Os valores de iluminância consideradas serão os sugeridos na Tabela 3.5, para tarefas visuais da classe B (trabalhos de escritório). Com estas especificações, e o número de lâmpadas, serão encontrados os demais parâmetros, como a potência e a localização das mesmas.

6.1. Independência de Malha

Um estudo da independência de malha é importante para determinar o número mínimo de elementos a serem utilizados na cavidade, otimizando o cálculo, limitando o consumo de tempo

computacional, e garantindo que o refinamento da mesma não tenha influência na solução obtida. Com essa finalidade, é suficiente utilizar a análise direta com o método das radiosidades, apresentada no Capítulo 2.

Para conduzir os testes uma situação de iluminação é simulada, considerando-se uma sala onde todos os elementos que formam o teto são fontes de luz, em uma dada temperatura, e as demais superfícies (paredes laterais e piso) obedecem à hipótese de paredes frias, as quais possuem poder emissivo luminoso nulo. As características desta cavidade podem ser verificadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Variáveis do projeto proposto para aplicação dos testes iniciais.

| Variáveis de projeto | Valor |
|-----------------------------|--------------------|
| Comprimento | 15 m |
| Largura | 12 m |
| Área | 180 m ² |
| Pé direito | 3 m |
| Refletividade do teto | 0,5 |
| Refletividade da parede | 0,5 |
| Refletividade do piso | 0,1 |
| Iluminância planejada | 550 lx |

Como será visto na seção seguinte, para uma iluminância de 550 lx no piso, o método dos Lúmens prevê que a iluminância do teto seja 932 lx. São testadas 5 malhas, todas compostas por elementos quadrados, onde suas características podem ser verificadas na Tabela 6.2.

Tabela 6.2. Características das diferentes malhas testadas.

| Identificação | Número de elementos | | | Tamanho do elemento (m) |
|----------------------|----------------------------|----------|----------|--------------------------------|
| | x | y | z | |
| 10 | 10 | 8 | 2 | 1,50 |
| 20 | 20 | 16 | 4 | 0,75 |
| 30 | 30 | 24 | 6 | 0,50 |
| 40 | 40 | 32 | 8 | 0,37 |
| 50 | 50 | 40 | 10 | 0,30 |

A iluminância obtida para dois pontos localizados na superfície de projeto pode ser observada na Figura 6.2. Um dos pontos está localizado no centro ($x = 0,5$ $y = 0,4$ e $z = 0,0$ m), onde, para a configuração calculada, se encontra o valor máximo da iluminância, e outro ponto localiza-se em um dos cantos do ambiente ($x = 0,0$ $y = 0,0$ e $z = 0,0$ m), onde a iluminância atinge seu valor mínimo.

Analisando a Figura 6.2 percebe-se que há uma convergência dos valores de iluminância a partir da malha 20 para o vértice e da malha 30 para o centro. Os resultados obtidos com a

configuração de malha 30 podem ser utilizados sem maiores problemas, portanto, esta será a malha utilizada nas soluções que seguem neste trabalho, por ser a que associa uma independência de malha com menor número de elementos.

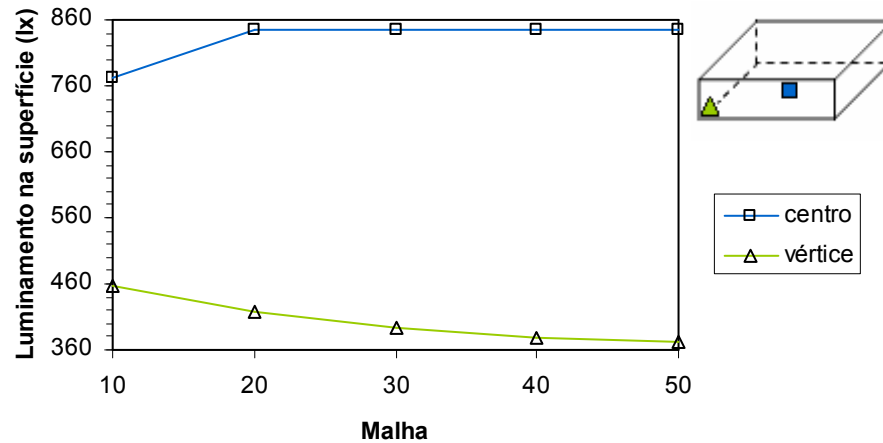


Figura 6.2. Iluminância obtida com diferentes malhas para dois pontos localizados na superfície da cavidade.

O refino da malha propicia o posicionamento mais preciso dos elementos de lâmpadas. Com este intuito, poderiam ser utilizadas as malhas 40 ou 50. Entretanto, vale lembrar que a otimização do tempo de cálculo computacional também é algo a ser levado em consideração na resolução do problema. Este tempo pode ser diminuído em muito, já que da malha 30 para a malha 40 existe uma diferença de 560 pontos a serem verificados para a posição das lâmpadas através da análise inversa, o que poderá diminuir em torno de 10^{12} combinações para a solução de otimização, dependendo do problema em questão.

6.2. Resultados de Métodos Tradicionais

É necessário verificar os resultados encontrados por métodos já existentes, como o Método dos Lúmens, e resultados obtidos por programas comerciais, afim de que seja possível comparar os resultados obtidos através desses métodos com os resultados da análise inversa. O Método dos Lúmens, apresentado no capítulo 4, juntamente com o programa Winelux, serão aplicados inicialmente com as configurações apresentadas na Tabela 6.1.

Utilizando a relação dada pela Eq. (4.10), obtém-se o índice do recinto $\kappa = 2,22$. Com o valor obtido para κ , e com a refletividade das superfícies, é encontrado nas tabelas da Phillips,

1981, o fator de utilização deste projeto, $\eta = 0,59$. O fator de depreciação é estabelecido como $\Pi = 1$, de forma a considerar que o ambiente não será influenciado pela depreciação, e de forma a aproximar os resultados obtidos neste caso com os resultados que serão gerados pelo método inverso, já que no algoritmo do método inverso não são considerados fatores de depreciação.

Utilizando a Eq. (3.11), a iluminância do teto deve ser:

$$q_{teto}^{(l)} = \frac{q^{(l)}}{\eta \cdot \Pi} = \frac{550}{0,59 \times 1,00} = 932 \text{ [lx]}$$

Então, é possível calcular o número de luminárias necessárias para o projeto, utilizando a Eq. (3.12). Para tal, são consideradas lâmpadas de 200 W, do catálogo da Tabela 3.3, onde o fluxo luminoso Φ é igual a 3520 lm. Dessa forma, temos:

$$n = \frac{q_{teto}^{(l)} \cdot A}{\Phi} = \frac{932 \times 180}{3520} = 47,7$$

Este valor pode ser convenientemente arredondado para $n = 48$, de modo que a distribuição das luminárias seja feita em 6 fileiras na largura da sala, e 8 fileiras ao longo do seu comprimento. Este arranjo pode ser verificado na Figura 6.3, onde Δx e Δy , para o caso considerado, são, respectivamente, $15/8$ e $12/6$ (1,87 e 2,00 metros). Desse modo, obtêm-se um fluxo de energia de 53 W/m^2 no teto.

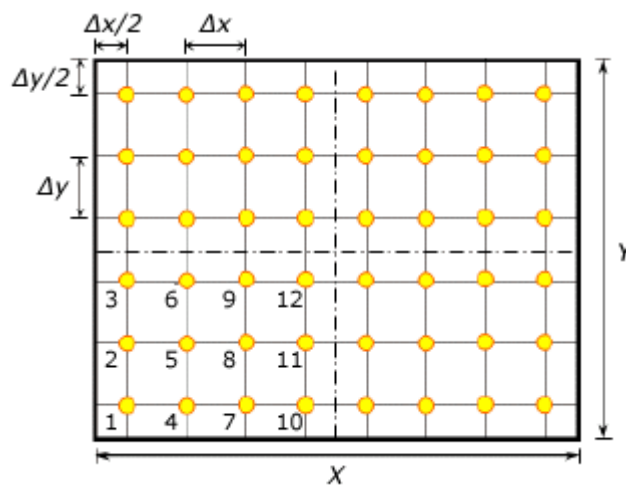


Figura 6.3. Arranjo para instalação de 48 lâmpadas segundo o Método dos Lúmens.

Aplicando diretamente a metodologia apresentada no Capítulo 3, é possível verificar a iluminância especificada, comparando com as condições propostas pelos métodos tradicionais. Aplicando o método das cavidades radiantes, é encontrada uma iluminância na superfície conforme a Figura 6.4(a), onde os valores dados são adimensionais. É importante ressaltar que a iluminância incidente adimensional na superfície de projeto equivale a $Q_{r,jd} = 1$ para a iluminância planejada, neste caso 550 lx.

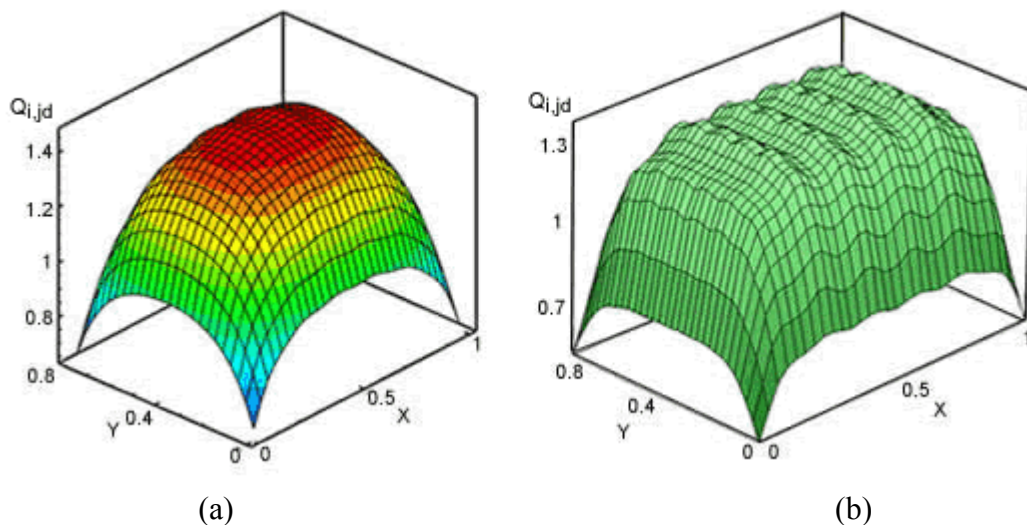


Figura 6.4. Iluminância na superfície de projeto para um arranjo de 48 lâmpadas. (a) De acordo com o método direto. (b) De acordo com o programa WinElux [EEE, 2008].

O valor máximo obtido, adimensional, é 1,45 (no caso considerado, 797 lx) e o mínimo 0,67 (368 lx), com um desvio médio prescrito, dado pela Eq. (5.15), de 24 %. Com isso, percebe-se que o Método dos Lúmens projeta uma condição de iluminância pouco uniforme e muito acima do desejado na área central e muito inferior próximo às paredes.

Com a intenção de validar o resultado encontrado pelo método proposto, é utilizado o software comercial WinElux para gerar resultados a partir da mesma configuração. Simulando os mesmos parâmetros apresentados na Tabela 6.1, com as mesmas configurações calculadas de forma direta pela metodologia apresentada, a distribuição de iluminância na superfície de projeto apresentada pelo WinElux pode ser verificada na Figura 6.4(b). O cálculo realizado pelo WinElux encontrou uma iluminância média na superfície de projeto de 605 lx (de forma adimensional, 1,1), sendo o máximo de 710 lx (1,3) e o mínimo 336 lx (0,61).

Comparando a configuração encontradas pelo WinElux com a encontrada pela metodologia direta, verifica-se uma diferença de 77 lx na iluminância média, sendo esta diferença de 87 lx na iluminância máxima e 32 lx na iluminância mínima. Os valores no cálculo

direto são superiores aos valores encontrados pelo programa Winlux. Entretanto, segundo informações adicionais solicitadas à EEE, 2008, o valor de iluminância final calculado pelo WinElux é afetado por um fator de manutenção, o que explica os valores mais baixos. Além disso, na metodologia utilizada neste trabalho para o cálculo de iluminância, é utilizado o método das radiosidades, enquanto que no programa WinElux é utilizado o método ponto-a-ponto. Com isso, concluí-se que os métodos utilizados seguem uma tendência muito similar de resultados ao longo da superfície, já que os valores de iluminância concentram-se no centro da cavidade e diminuem de intensidade conforme se aproxima das paredes, mas não podem ser efetivamente comparados, uma vez que utilizam diferentes metodologias de resolução.

6.3. Projeto Inverso de Iluminação

No projeto inverso de iluminação é suficiente conhecer a iluminância desejada no plano de trabalho, para que a metodologia se encarregue de determinar o fluxo e a posição de cada lâmpada que melhor atenda a condição prescrita. Entretanto, como será visto, outras configurações devem ser implementadas para uma execução do algoritmo, e, logicamente, para que melhores soluções sejam obtidas.

Como pode-se perceber, na Figura 6.4(a) as regiões mais externas da superfície (nas bordas e nos cantos da cavidade) são fortemente afetadas pela proximidade das paredes, causando uma baixa iluminância nesta área. Por este motivo, é conveniente desprezar os elementos próximos até 1,5 m das paredes laterais, como forma de relaxar a solução inversa. Com isso, o total de elementos de projeto que formam a cavidade será reduzido de 720 para 432 elementos.

Nas análises que seguirão, será otimizada a iluminância na superfície de trabalho, para um dado fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas do teto. A determinação do fluxo luminoso e da posição das lâmpadas se dará conforme as restrições apresentadas na Tabela 6.3. Estas restrições levam em conta limites dimensionais e estruturais, e podem ser implementadas conforme a necessidade do projetista.

Na solução do algoritmo da Otimização Extrema Generalizada (GEO), o número de variáveis do sistema pode mudar de acordo com o número de lâmpadas que serão utilizadas, e conforme a determinação da potência, se esta será a mesma para todas as lâmpadas, ou se cada lâmpada terá uma potência diferente. Caso todas as lâmpadas tenham a mesma potência, esta será representada por apenas 1 variável. Quanto menor o número de variáveis, mais rápido o problema tenderá a uma solução ótima.

Tabela 6.3. Variáveis e restrições impostas no método GEO.

| Parâmetro | Determinação |
|-------------------------------|--|
| Número de variáveis (NX) | Dependente do número de lâmpadas e da condição das potências |
| Número de bits (NBITS) | 9 |
| Parâmetro τ (TAL) | Dependente do problema |
| Número de execuções (NIDOM) | 50 |
| Número de iterações (NFOBMAX) | Dependente do problema |
| Posição das Lâmpadas | $1 \leq x \leq 15$ $1 \leq y \leq 12$ |
| Potência das Lâmpadas | $0 \leq P \leq 50$ |
| Precisão (p) | 0,1 |

O número de bits usados para representar cada variável é definido em função da variável que exige o maior número de bits, no caso, a potência das lâmpadas, que necessita 9 bits para fornecer a precisão de 0,1 definida para a mesma. Este valor é o mesmo para todas as variáveis. A determinação do parâmetro τ será visto na próxima seção.

O valor de NIDOM está estabelecido de acordo com um padrão de execuções encontrado em De Sousa, 2003, sendo que este não é um critério absoluto para o funcionamento do método GEO, mas determinante no momento em que com um maior número de simulações, maior a probabilidade de se ter alcançado valores satisfatórios para a solução do problema. O valor de NFOB, que determina o número máximo de iterações, é estabelecido de acordo com os valores onde a avaliação da função objetivo já não evolui para uma busca do ótimo global, como pode ser observado na Figura 6.5.

As restrições nas posições das lâmpadas estão de acordo com as restrições físicas do sistema, respeitando a simetria imposta, e a identificação de cada elemento no teto da cavidade. As restrições na potência das lâmpadas equivalem a um limite lógico, sendo que não se espera um resultado além desta faixa para a potência das lâmpadas, e também de acordo com os valores estabelecidos por Smith Schneider e França, 2004, de forma a proporcionar uma comparação entre as metodologias de solução aplicadas em cada trabalho, na medida em que este intervalo de solução influencia no tempo computacional de resolução do problema.

6.3.1. Determinação do parâmetro τ

A metodologia GEO indica a necessidade de determinação do parâmetro τ que melhor adapta o algoritmo ao caso considerado. Este parâmetro determina o balanço entre o aleatório e o probabilístico na solução do problema.

O valor de τ foi determinado executando-se buscas nas condições estabelecidas para o projeto, conforme a Tabela 6.3, no intervalo de $\tau \in [0,25; 2,50]$. O número de lâmpadas utilizadas, conforme será visto, foram 32, 36, 40, 44 e 48 (considerando a simetria, 8, 9, 10, 11 e 12 lâmpadas para cada região), e o fluxo luminoso será o mesmo para todas as lâmpadas, o que caracteriza um problema de 17 a 25 variáveis (16 a 24 para as coordenadas x e y de cada lâmpada, e mais 1 para a potência). Para cada τ avaliado neste intervalo foram realizadas 50 execuções independentes do GEO, usando como critério de parada $NFOB \geq 10^5$. Os resultados médios obtidos dos melhores valores encontrados para a iluminância na superfície de trabalho podem ser acompanhados na Figura 6.5, dados em função do parâmetro ajustável τ e a função erro F (Eq.5.14).

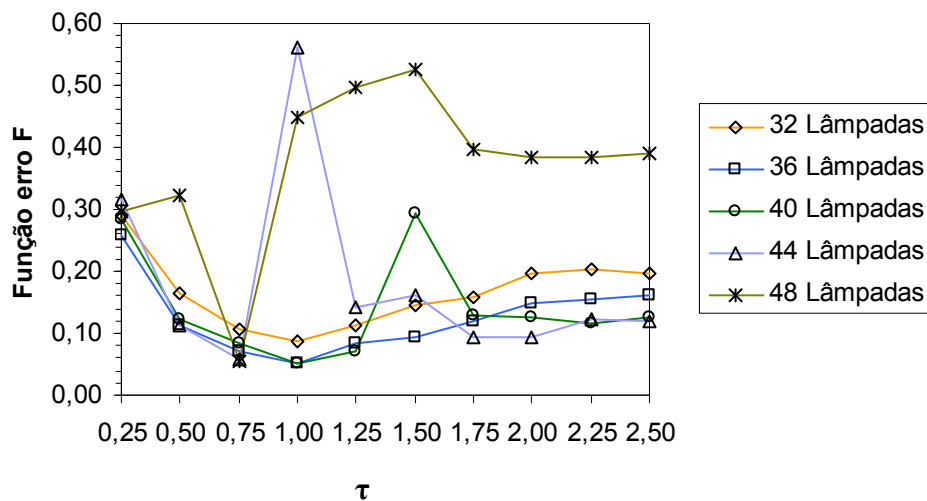


Figura 6.5. Menor valor para a função erro F após $NFOB = 10^5$ em função de τ . Média de 50 execuções independentes.

Conforme os resultados da Figura 6.5, chega-se à conclusão de que os melhores resultados foram obtidos com τ variando entre $[0,75$ e $1,00]$. Para o caso com 32, 36 e 40 lâmpadas, os melhores resultados foram obtidos com $\tau = 1,00$, e com 44 e 48 lâmpadas os melhores resultados foram obtidos com $\tau = 0,75$. Isso indica que cada configuração apresenta um valor de τ particular, sendo que para cada caso apresentado é necessário encontrar um valor para o parâmetro que melhor satisfaça as condições de otimização.

Por este método utilizar além de valores probabilísticos também valores aleatórios, é muito importante sempre realizar um grande número de simulações e extrair uma média para que realmente sejam utilizados os melhores resultados. Dificilmente uma mesma configuração será encontrada na gama de soluções, mas boas soluções sempre serão encontradas. Isso mostra que o

problema não terá uma solução única, e uma vasta possibilidade de configurações poderão ser encontradas para o problema de iluminação.

Como observado na Figura 6.5, devido às propriedades estocásticas da solução, oscilações como no valor de $\tau = 0,75$ para a configuração de 44 e 48 lâmpadas (mesmo que de forma positiva para a solução) e no valor de $\tau = 1,50$ para a configuração de 40 lâmpadas, são observados quando, como por exemplo, no primeiro caso, ocorrem apenas bons resultados, e, no segundo caso, quando algum mal resultado venha a comprometer a média.

Outra característica se reflete na metodologia na medida em que diferentes valores para o parâmetro ajustável τ forem encontrados, como na discordância de resultados em Cassol *et al.*, 2008, onde para uma configuração de 40 lâmpadas foi encontrado um valor de $\tau = 1,75$. Isso indica que além do número de variáveis, também o número de iterações usadas influenciam na busca do valor do parâmetro ajustável τ .

Outra variável, denominada IDOM, mas que é intrínseca na metodologia de solução, portanto não é considerada ajustável, pode ser identificada e de certa forma influencia na solução na medida em que sua variação automática identifica focos de soluções boas e ruins que se repetem. Na medida em que a variável IDOM passa a buscar resultados muito similares, e até mesmo idênticos, conforme as simulações se repetem, gera a dúvida de que esta seja mais uma variável ajustável do problema. Entretanto, uma análise mais apurada deste parâmetro deve ser feita para que se chegue a uma conclusão a respeito da mesma.

6.3.2. Solução do método inverso

Com os valores de τ que otimizam a busca pelo ótimo, encontrados na seção 6.3.1, é possível simular as configurações de lâmpadas para obter os melhores valores em cada situação. Estes resultados podem ser acompanhados na Figura 6.6.

A evolução dos resultados observados na Figura 6.6 indica uma estabilidade a partir de 200.000 iterações. Estes resultados, atrelados ao valor do parâmetro ajustável τ , e em comparação com os resultados obtidos em Cassol *et al.* 2008, onde os melhores resultados foram obtidos a partir de 500.000 iterações, levam a concluir que existe uma forte influência entre o valor do parâmetro ajustável e o valor de NFOB na busca da solução, sendo que é de extrema importância a identificação correta do parâmetro τ no sentido de otimizar a busca.

Objetivando encontrar o menor valor da função erro F , verifica-se que com exceção da configuração com 36 lâmpadas, todas as configurações alcançaram valores muito próximos. Em comparação com o Método dos Lúmens todos os valores foram satisfatórios. Os respectivos

valores dos desvios médio e máximo, assim como a respectiva potência adimensional das lâmpadas, podem ser verificadas na Tabela 6.4.

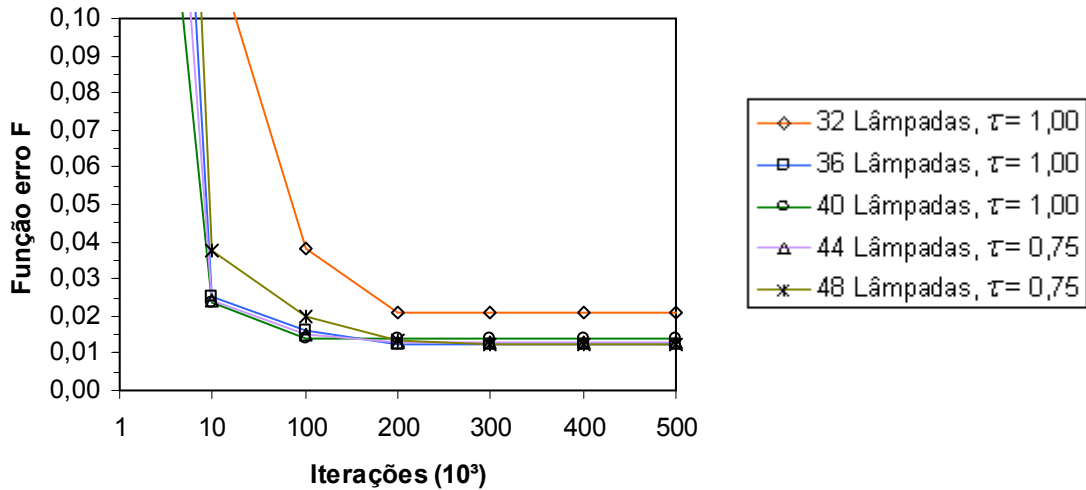


Figura 6.6. Evolução do melhor valor da função erro F em função de NFOB, para 50 execuções.

O gráfico representando a iluminância na superfície de trabalho e o posicionamento das lâmpadas podem ser verificado nas Figuras 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11.

Tabela 6.4. Resultados para as diversas configurações de lâmpadas.

| Nº. Lâmpadas | Função erro F | Desvio médio (%) | Desvio máximo (%) | $Q_{r,il}$ |
|--------------|-----------------|------------------|-------------------|------------|
| 32 | 0,02095 | 1,13 | 3,61 | 30,40 |
| 36 | 0,01215 | 0,82 | 3,95 | 25,20 |
| 40 | 0,01385 | 0,88 | 2,88 | 24,70 |
| 44 | 0,01300 | 0,87 | 3,10 | 21,20 |
| 48 | 0,01233 | 0,84 | 2,65 | 19,50 |

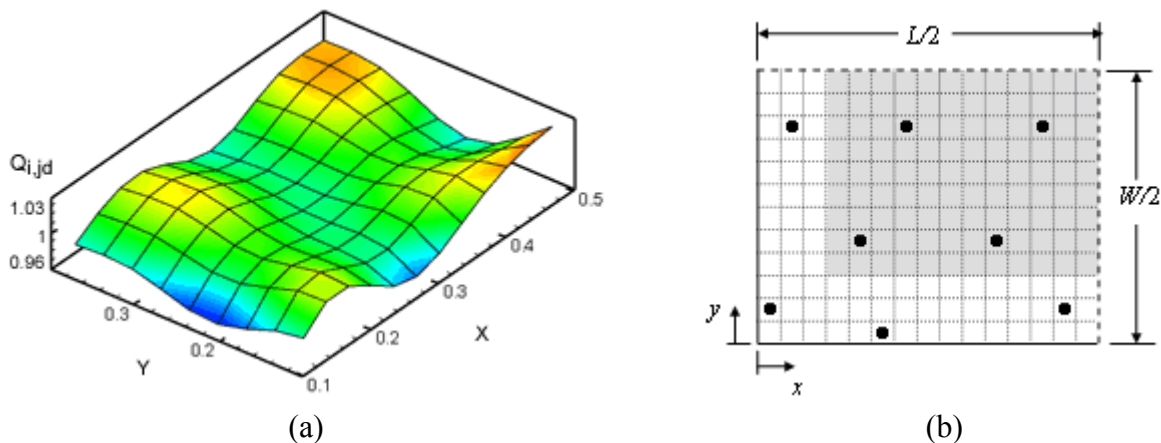


Figura 6.7. Resultado para 8 lâmpadas, de acordo com a simetria considerada. (a) Iluminância na superfície de projeto. (b) Configuração das lâmpadas no teto.

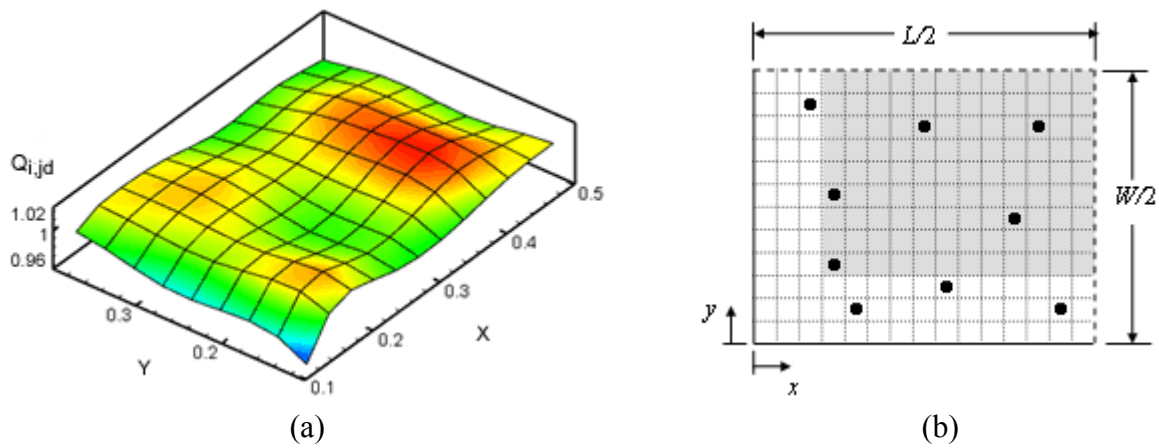


Figura 6.8. Resultado para 9 lâmpadas, de acordo com a simetria considerada. (a) Iluminância na superfície de projeto. (b) Configuração das lâmpadas no teto.

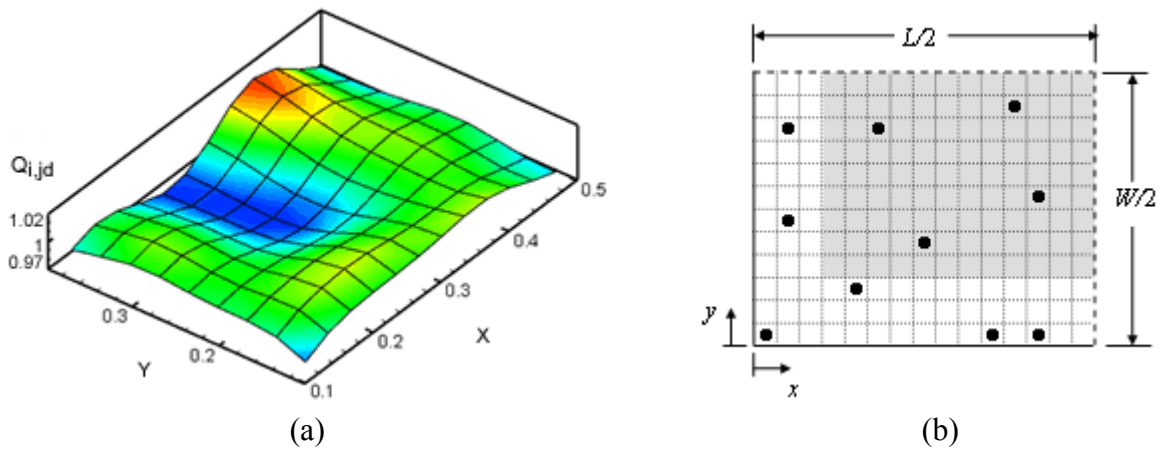


Figura 6.9. Resultado para 10 lâmpadas, de acordo com a simetria considerada. (a) Iluminância na superfície de projeto. (b) Configuração das lâmpadas no teto.

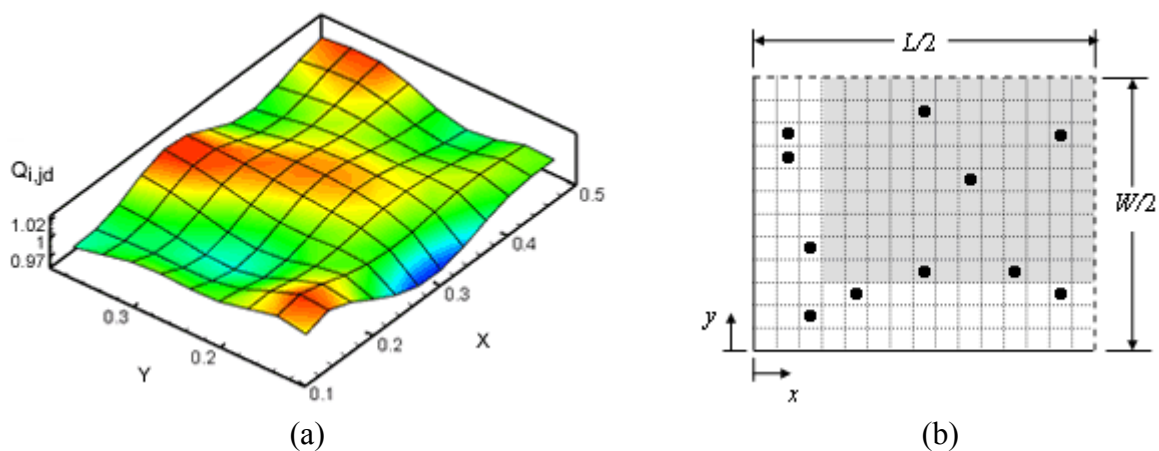


Figura 6.10. Resultado para 11 lâmpadas, de acordo com a simetria considerada. (a) Iluminância na superfície de projeto. (b) Configuração das lâmpadas no teto.

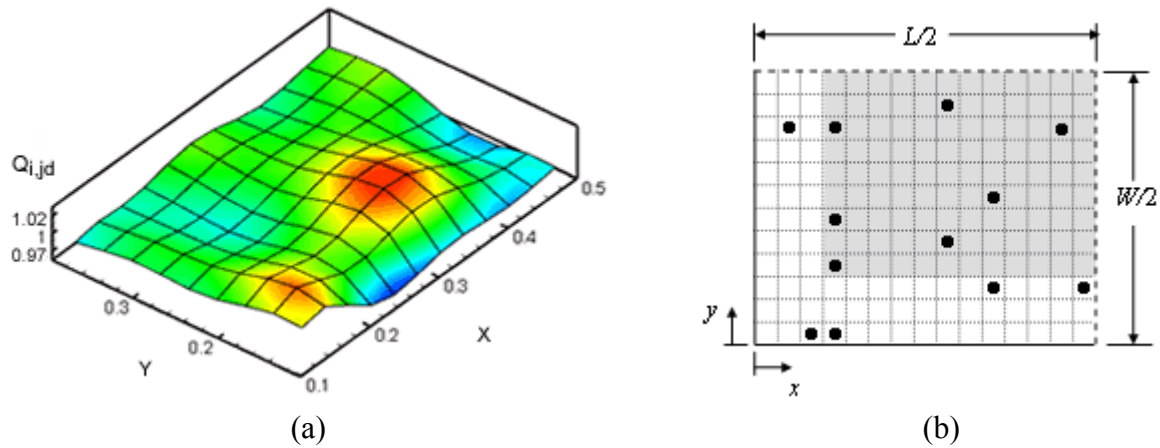


Figura 6.11. Resultado para 12 lâmpadas, de acordo com a simetria considerada. (a) Iluminância na superfície de projeto. (b) Configuração das lâmpadas no teto.

Através dos resultados da Tabela 6.4 é possível perceber que independente do número de lâmpadas é possível encontrar bons resultados para a solução do problema. Apesar de os valores referentes ao desvio médio sempre terem uma relação com os valores da função erro F , o desvio máximo mostra-se dependente de outros fatores.

6.3.3. Otimização de posições e potências

Continuando o problema de otimização através do método inverso, é possível aumentar o grau de otimização adicionando no problema a possibilidade de variar além da posição das lâmpadas também a potência de cada uma. Como já foi proposto em Smith Schneider e França, 2004, e em Mossi *et al.*, 2007, e da mesma forma em Cassol *et. al.*, 2008, onde através de uma posição fixa eram estabelecidos valores para as potências das lâmpadas visando a uma solução com maior uniformidade na iluminância da área de trabalho. Neste trabalho será permitido que os posicionamentos destas fontes também sejam uma variável. De forma a possibilitar uma comparação entre todos os métodos, e para que sejam possíveis conclusões de viabilidade, será estabelecido o número total de lâmpadas em 40, que foi o número de lâmpadas utilizadas nos trabalhos citados. Da mesma forma que as simulações anteriores, será necessário encontrar o valor do parâmetro ajustável τ , o qual pode ser verificado na Figura 6.12. A busca do valor da função erro F pode ser verificada na Figura 6.13. Nestas simulações encontramos para o parâmetro ajustável τ o valor de 1,00 e o ótimo global estabilizou-se para um total de 200.000 iterações.

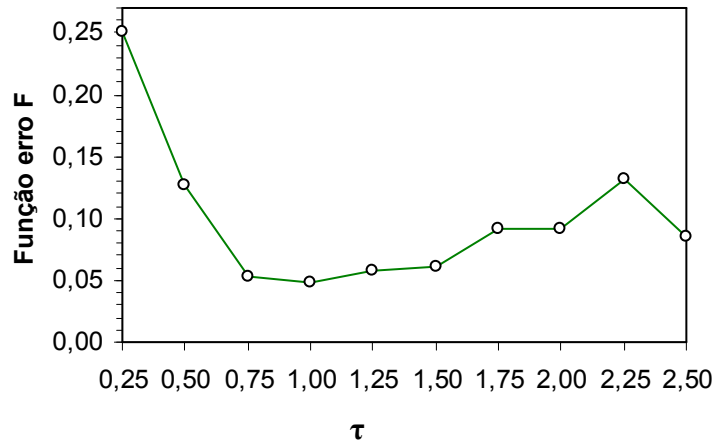


Figura 6.12. Menor valor para a função erro F após $NFOB = 10^5$ em função de τ . Média de 50 execuções independentes.

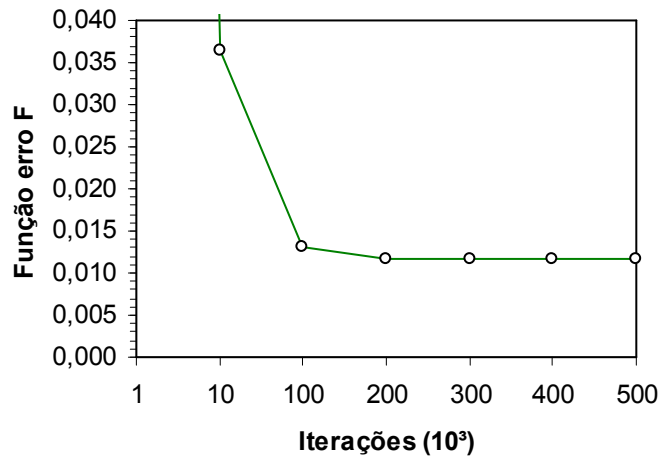


Figura 6.13. Evolução do melhor valor da função erro F em função de NFOB, para 50 execuções. $\tau = 1,00$.

O alto número de variáveis em problemas de iluminação é um problema no momento em que uma simples alteração na configuração altera significativamente os valores da iluminância. Estes resultados apontam que mesmo aumentando significativamente o número de variáveis, a metodologia proposta é capaz de encontrar resultados satisfatórios, como pode ser verificado na Tabela 6.5. O gráfico da iluminância na superfície de trabalho para esta solução pode ser verificado na Figura 6.14(a) e o posicionamento das lâmpadas na Figura 6.14(b).

Observando os resultados da Tabela 6.4 e 6.5 verificamos que apesar de um bom desvio médio o desvio máximo apresentado nas soluções não acompanha a evolução das respostas apresentadas pela função erro F , o que é algo a se tomar cuidado, pois o desvio máximo aponta pontos de descontinuidade que podem desfavorecer a solução.

Tabela 6.5. Configuração de 40 lâmpadas com posições e potências variáveis.

| Função erro F : | 0,01164 | | |
|--------------------|---------|-----|------------|
| Desvio médio (%): | 0,80 | | |
| Desvio máximo (%): | 3,31 | | |
| Lâmpada | i | j | $Q_{r,il}$ |
| 1 | 1 | 3 | 41,70 |
| 2 | 2 | 9 | 30,30 |
| 3 | 3 | 4 | 16,20 |
| 4 | 6 | 11 | 23,70 |
| 5 | 7 | 2 | 18,60 |
| 6 | 8 | 6 | 24,60 |
| 7 | 10 | 8 | 10,80 |
| 8 | 12 | 2 | 38,80 |
| 9 | 13 | 10 | 28,30 |
| 10 | 15 | 5 | 11,10 |

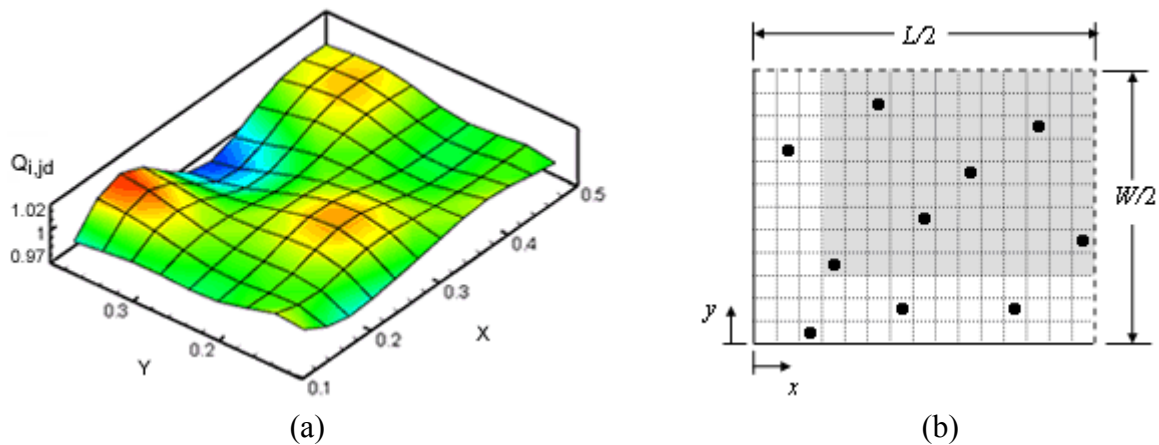


Figura 6.14. Resultado para uma configuração de 10 lâmpadas com posição e potência variáveis, de acordo com a simetria considerada. (a) Iluminância na superfície de projeto. (b) Configuração das lâmpadas no teto.

Comparando os resultados da Figura 6.9 com a Figura 6.14, é possível observar claramente que houve uma mudança na distribuição da iluminância na superfície de trabalho, e também na distribuição das lâmpadas, sendo que pelos resultados da Tabela 6.5 é possível verificar um aumento na potência das lâmpadas localizadas próximas da parede, e uma diminuição da potência nas lâmpadas próximas da região de simetria, o que vem a reforçar a influência da refletividade das paredes na solução do problema.

6.3.4. Avaliação dos Resultados

De acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 6.4 e 6.5, a configuração que apresenta uma maior uniformidade é a configuração encontrada através da simulação com

posições e fontes variáveis. É importante cuidar neste caso para que o fluxo luminoso indicado na configuração não exceda os valores de lâmpadas disponíveis comercialmente, o que impossibilitaria o uso da configuração. Na instalação estudada neste trabalho, para 550 lx, na tabela 6.5, as lâmpadas 1 e 8 excedem este parâmetro, o que obrigaria o projetista a simular novamente os resultados. Uma solução seria já determinar nas restrições do problema, de acordo com a iluminância desejada, o valor máximo referente à potência da lâmpada, o que indicaria um intervalo entre [0 e 35,2] para atingir o valor do fluxo luminoso máximo de 3520 lm da lâmpada INC200. Este valor do fluxo luminoso é determinado através de uma relação com a Eq. (3.12), multiplicado pelo fator encontrado da razão entre a potência adimensional calculada pelo método inverso, e a potência adimensional sem fator de correção.

Caso seja necessário estabelecer a potência real de cada lâmpada, esta será dada através da Eq. 3.2. Este cálculo será necessário quando o valor indicado pelo método inverso não corresponder a uma lâmpada comercial, e for necessário o uso de uma resistência para regular a potência da lâmpada, onde o valor da mesma é dado pela Eq. 3.7. Maiores detalhes deste processo de cálculo podem ser verificados em Seewald, 2006.

Os resultados apresentam uma evolução nas respostas obtidas em Smith Schneider e França, 2004, em Mossi *et al.*, 2007 e em Cassol *et al.*, 2008. Estes resultados podem ser acompanhados através da Tabela 6.6, onde é exposto o melhor resultado encontrado nas simulações executadas neste trabalho. Com estes resultados é possível verificar a vantagem em manter o posicionamento das fontes como uma variável, visto que a radiação não possui um comportamento linear. A obtenção de resultados satisfatórios em praticamente todas as configurações apresentadas mostra a capacidade de resolução do método apresentado. É importante salientar que todas ainda podem ser melhoradas, conforme mais simulações venham a ser executadas.

Tabela 6.6. Comparação entre diversas resoluções para o problema de iluminação.

| | Função erro F | Desvio médio (%) | Desvio máximo (%) |
|--------------------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| Smith Schneider e França, 2004 | 0,01754 | 0,98 | 4,03 |
| Mossi <i>et al.</i> , 2007 | 0,01983 | 1,05 | 3,60 |
| Cassol <i>et al.</i> , 2008 | 0,01573 | 0,92 | 3,56 |
| Presente trabalho | 0,01164 | 0,80 | 3,31 |

6.3.5. Comparação entre método inverso e método tradicional

Com os resultados obtidos até agora, é possível estabelecer a vantagem de se utilizar métodos mais avançados para a determinação de configurações em projetos de iluminação.

Nessas condições, serão utilizados os resultados sugeridos pelo Método dos Lúmens, e os resultados encontrados através do método inverso, verificando as diferenças nos resultados.

Na configuração estabelecida, o Método dos Lúmens indicou um fluxo luminoso no teto de 932 lx, e, para uma determinada potência, a utilização de 48 lâmpadas, dispostas de forma uniforme no teto. A configuração indicada pelo Método dos Lúmens mostrou claramente que a iluminância está concentrada no centro da cavidade e conforme se aproxima dos cantos do ambiente ocorre um acentuado decréscimo nesta iluminância. Os resultados obtidos através do Método dos Lúmens já foram apresentados através das Figuras 6.3 e 6.4 para a configuração das lâmpadas e a iluminância na superfície, respectivamente, e para o método inverso, para a configuração com 48 lâmpadas, foram apresentadas através da Figura 6.11(a), e sua distribuição no teto através da figura 6.11(b). Utilizando do Método dos Lúmens obteve-se um desvio médio de 24%, enquanto que para o método inverso temos um desvio médio de 0,84%, ou seja, uma diferença considerável na uniformidade de iluminação. A partir destes resultados é possível descartar o uso do Método dos Lúmens caso deseje-se a obtenção de uma uniformidade na iluminância.

Em consideração ao número de lâmpadas, uma uniformidade satisfatória na iluminância pode ser encontrada com quaisquer das configurações propostas através do método inverso. Além da maior uniformidade, proporcionando uma resposta desejada para a iluminância, observa-se também que é possível diminuir a potência das mesmas, o que gera uma economia em custos de manutenção e instalação, sendo até 30% menor o valor encontrado pelo método inverso. Este balanço entre o número de lâmpadas, a potência das mesmas e a uniformidade da iluminância fazem com que a escolha da melhor configuração fique atrelada às necessidades de projeto. Portanto, em relação a este requisito, o método inverso também leva vantagem, pois indicou uma economia de potência no projeto.

Desta forma, a utilização do método inverso se consolida, ficando como positivo para o Método dos Lúmens apenas a facilidade de utilização diante da maior complexidade matemática do método inverso, e de seu tempo computacional.

6.3.6. Comparação entre método inverso e busca direta

Outra forma de validar os resultados obtidos através do método inverso, além da comparação com outros programas, como o WinElux, é testar algumas condições através de uma adaptação do método direto, onde é possível testar todas as possibilidades possíveis de posicionamento das lâmpadas, através de uma varredura geral das posições x e y , e comparar

estas soluções com as soluções do método inverso. Como o método de busca direta proposto nesta seção apresenta limitações ao se adicionar variáveis na forma de incógnitas do problema, e neste caso limitações computacionais, já que busca a melhor solução elemento por elemento e valor por valor, a comparação de soluções é possível em relação a apenas um parâmetro na configuração das lâmpadas, ou de potência, ou de posicionamento. De forma a tornar a solução mais interessante, apresentaremos uma simulação referente ao posicionamento, de acordo com o número de lâmpadas, a qual pode ser verificada na Tabela 6.7.

No método de busca direta, a configuração é testada elemento por elemento, sendo que para 1 lâmpada são necessárias 180 iterações (considerando a condição de simetria, serão 4 lâmpadas no total), para 2 lâmpadas 32.400 iterações, e para 3 lâmpadas $5,8 \times 10^6$ iterações. No método inverso, não mais do que 10^2 iterações são necessárias para qualquer das três configurações. Para apenas 1 lâmpada não há qualquer vantagem no método inverso, já que a resolução direta exige menos iterações, mas a partir do aumento do número das mesmas já se pronuncia a necessidade de outro método para a solução.

Para o método de busca direta, 3 lâmpadas é o limite computacional para a simulação. A partir de 4 lâmpadas, a simulação já se torna inviável devido ao alto número de combinações que seriam necessárias para identificar a melhor posição (resultando algo em torno de 10^9 iterações). Na Tabela 6.7 é possível verificar que todos os resultados apontam para uma mesma resolução do problema, ajudando a reforçar a veracidade dos valores encontrados pelo método inverso.

Tabela 6.7. Validação do método inverso através do método de busca direta, para 1, 2 e 3 lâmpadas, considerando a simetria aplicada.

| jl | Busca Direta | | | Método Inverso | | |
|-----------|---------------------|----------|-------------------------|-----------------------|----------|-------------------------|
| | i | j | Q_{r,il} | i | j | Q_{r,il} |
| 1 | 9 | 7 | 180 | 9 | 7 | 180 |
| 1 | 5 | 8 | 90 | 5 | 8 | 90 |
| 2 | 12 | 7 | 90 | 12 | 7 | 90 |
| 1 | 6 | 10 | 60 | 6 | 10 | 60 |
| 2 | 7 | 5 | 60 | 7 | 5 | 60 |
| 3 | 13 | 7 | 60 | 13 | 7 | 60 |

6.3.7. Tempo computacional e considerações finais

A questão do tempo computacional é sempre um fator a ser analisado nos problemas numéricos. Neste trabalho foram extraídos dados referentes a dois computadores, para fator de comparação, um computador pessoal (AMD Sempron 3000, 1.8Ghz, 512Mb RAM) e do Centro

Nacional de Supercomputação, CESUP, da UFRGS (AMD Opteron 2210 Dual Core, 1.8Ghz, 8Gb RAM).

Para o computador pessoal, é possível estabelecer uma relação de 0,341 segundos para cada iteração, e, para o CESUP, 0,022 segundos para cada iteração. Como o algoritmo proposto envolve um procedimento de várias iterações, várias vezes, para determinar o tempo de execução basta multiplicar o tempo de uma iteração pelo total de iterações. Como por exemplo, para uma execução de 100.000 iterações, no computador pessoal, este levaria em torno de 10 horas para ser concluído, e, no CESUP, levaria um tempo aproximado de 40 minutos. Por isso, para o método inverso, é recomendado que seja executado em um computador com grande capacidade de processamento.

No caso da simulação direta, no computador pessoal esta apresentou um tempo de execução de 0,328 segundos, e, no CESUP 0,021 segundos. Como pelo método direto o programa roda apenas uma vez, este tranquilamente pode ser executado em qualquer computador.

Com a experiência do pesquisador, o tempo despendido em execuções pode ser reduzido, através de artimanhas como, por exemplo, utilizar um menor intervalo para a busca do parâmetro ajustável τ , utilizar um menor número de iterações, realizar menos execuções a fim de encontrar o melhor valor, ou diminuir, sempre que possível, os limites dos parâmetros, para que seja reduzido o intervalo de varredura da variável, e assim minimize o número de iterações para convergir a solução. Outras metodologias e outras configurações do problema também podem ser executadas, conforme a necessidade e a percepção do pesquisador.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho considerou problemas de iluminação objetivando uniformidade do fluxo luminoso na superfície de trabalho. Para a solução foram utilizados os conceitos da radiação térmica aplicados a uma cavidade radiante, adaptada para o caso de iluminação, ou seja, considerando a radiação na faixa de luz visível, que corresponde a comprimentos de onda entre 0,4 a 0,7 nm no espectro eletromagnético. Foram utilizados os princípios de métodos inversos, juntamente com o algoritmo da Otimização Extrema Generalizada (GEO), para solucionar o projeto de iluminação.

O problema foi resolvido utilizando-se uma cavidade com características adimensionais, com dimensões $1 \times 0,8 \times 0,2$. Simularam-se configurações com 32, 36, 40, 44 e 48 lâmpadas. Em todas as configurações foram utilizadas relações em que as posições das lâmpadas eram variáveis, e a potência, apesar de também ser variável, foi considerada como única para todas as lâmpadas. Apenas para a configuração de 40 lâmpadas foram executadas simulações em que tanto as posições quanto as potências foram consideradas variáveis independentes, e esta configuração foi a que apresentou os melhores resultados.

Entre os resultados encontrados, tornou-se claro que uma uniformidade na superfície de trabalho não significa necessariamente uma uniformidade no arranjo de lâmpadas, sendo que o principal fator para esta característica nos resultados apresentados é devido à influência da refletividade das paredes. Isto dificulta a obtenção de relações matemáticas para aplicações em metodologias analíticas, já que é difícil encontrar um padrão nas configurações. O tempo computacional, elevado em algumas situações, pode ser solucionado através de melhorias no sistema computacional, como por exemplo, utilizando de métodos de computação em paralelo, o que acelera o processo de resolução.

A proposta deste trabalho de resolver um problema caracterizado como uma cavidade radiante traz a característica da não-linearidade e principalmente da dificuldade de resolução do seu sistema de equações. A metodologia proposta de resolução através do método inverso regularizado com o método GEO foi capaz de gerar resultados satisfatórios. Esta metodologia mostrou-se extremamente estável mesmo lidando com variáveis discretas, não sendo necessário nenhum tipo de correção ou alteração no sistema de variáveis binárias do algoritmo GEO. Problemas inversos em cavidades riantes podem ser resolvidos de forma eficaz com a metodologia proposta, apesar do elevado número de variáveis, devido à grande quantidade de fontes luminosas, o que apenas acarreta no aumento do número de iterações na busca pelo ótimo global. Além disso, os métodos convencionais utilizados para o cálculo de iluminação de

ambientes podem gerar resultados com grande desvio da condição prescrita, além da pouca uniformidade na iluminação da superfície de trabalho, o que acaba se tornando um argumento a mais para a utilização dos métodos inversos.

O problema apresentado ainda é algo pouco estudado, o que representa uma dificuldade adicional, pois poucas são as referências específicas sobre o assunto. Muitas são as teorias envolvendo sistemas de iluminação voltados à ergonomia, entretanto pouco se fala a respeito de otimizações nas configurações das lâmpadas. Por isso, o trabalho proposto aponta a novos focos de estudo nesses sistemas. Um maior número de simulações ainda é necessário para que se chegue a novas conclusões, principalmente no que se refere ao número de lâmpadas ideal para as configurações e a um padrão das configurações apresentadas.

Este trabalho também apresentou uma revisão detalhada das informações que tangem a radiação térmica, e ainda contribuiu para formalizar algumas relações de iluminação, definindo suas unidades fundamentais e apresentando uma modelagem matemática da visão humana e das lâmpadas incandescentes. No geral, a combinação de método inverso regularizado através do algoritmo GEO satisfaz o objetivo proposto de gerar uma iluminação uniforme na superfície de trabalho seguido de uma economia energética, o que torna o sistema apto para novas formas de aplicações.

7.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Frente às inúmeras possibilidades de pesquisa referentes ao tema apresentado, as sugestões de trabalhos futuros ficam por conta de:

- Simular ambientes com diferentes configurações geométricas;
- Utilizar a técnica aplicada em superfícies não-cinzas;
- Utilizar outros métodos de regularização para resolver o sistema de equações;
- Montar um experimento para testar os resultados produzidos pelas simulações, para que este seja validado experimentalmente;
- Verificar a possibilidade de correlações no sistema proposto, com o intuito de equacionar as soluções.
- Estender a metodologia de resolução para outras aplicações relacionadas com a radiação térmica (como, por exemplo, em fornos de tratamento térmico).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, 1992. **“Iluminância de Interiores”**, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Bak, P., Chen, K., 1991. **“Self-Organized Criticality”**, Scientific American, p.26-33.
- Bak, P., Tang, C., Wiesenfeld, K., 1987. **“Self-Organized Criticality: An Explanation of 1/f Noise”**, Physical Review Letters, v.59, n.4, p.381-384.
- Barroso, L. C., Barroso, M. M. A., Campos Filho, F. F., Carvalho, M. L. B., Maia, M. L., 1983. **“Cálculo Numérico”**, Ed. Harbra Ltda, 2º ed., São Paulo.
- Braga Filho, W., 2002. **“Problemas Inversos”**, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, Rio de Janeiro.
- Campos Velho, H. F., 2002. **“Problemas Inversos: Conceitos Básicos e Aplicações”**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório de Computação e Matemática Aplicada, São José dos Campos.
- Cassol, F., Smith Schneider, P., França, F. H. R., De Sousa, F. L., Silva Neto, A. J., 2008. **“Inverse Analysis Applied to Illumination Design: Determination of Optimum Locations of the Light Sources”**, In: 12th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences, ENCIT, Belo Horizonte.
- Castro, P. A., 2002. **“Algoritmos de Otimização e Criticalidade Auto-Organizada”**, Dissertação de Mestrado, Instituto de Física, USP, São Carlos.
- Cavichioli, J. C., Ruggiero, C., Volpe, C. A., Paulo, E. M., Fagundes, J. L., Kasai, F. S., 2006. **“Florescimento e Frutificação do Maracujeiro-Amarelo Submetido à Iluminação Artificial, Irrigação e Sombreamento”**, Revista Brasileira de Fruticultura. vol.28 n.1, Jaboticabal.
- CDEF, 2008. **“Clínica Dermatológica Prof. Emmanuel França”**, Brasil. Disponível em <http://www.emmanuelfranca.com.br>, Acessado em julho de 2008.

Costa, A. C., Sousa, A. A., Ferreira, F. N., 2000. **“Novos Métodos de Design de Iluminação”**, In: 9º Encontro Português de Computação Gráfica, Marinha Grande.

Daun, K., França, F. H. R., Larsen, M., Leduc, G., Howell, J. R., 2006. **“Comparison of Methods for Inverse Design of Radiant Enclosures”**, Journal of Heat Transfer, vol. 128, pp. 269-282, ASME.

De Sousa, F. L., 2003. **“Otimização Extrema Generalizada: Um Novo Algoritmo Estocástico para o Projeto Ótimo”**, Tese de Doutoramento, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos.

De Sousa, F. L., Ramos, F. M., Paglione, P., Girardi, R. M. 2003. **“A New Stochastic Algorithm for Design Optimization”**, AIAA Journal, v. 41, n. 9, p. 1808-1818.

Dorn, W. S., McCracken, D. D., 1978. **“Cálculo Numérico com Estudos de Casos em Fortran IV”**, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo.

EEE, 2008. **“Empresa de Equipamento Elétrico SA”**. Águeda, Portugal. Disponível em <http://www.eee.pt>, Acessado em junho de 2008.

França, F. H. R., Howell, J. R., Ezekoye, O. A., Morales, J. C., 2002. **“Inverse Design of Thermal Systems with Dominant Radiative Transfer”**, Advances in Heat Transfer, vol. 36, pp. 1-110.

Gamba, M., Erturk, H., Ezekoye, O. A., Howell, J. R., 2002. **“Modeling of a Radiative RTP-Type Production Furnace Through Inverse Design: Mathematical Model and Experimental Results”**, Proc. 2002 IMECE, New Orleans, ASME, New York, Vol. 1.

Gamba, M., Pavy, T., Howell, J. R., 2003. **“Inverse Methods for Design and Control of Thermal Systems: Validation in a 2-D Visible Light Enclosure”**, Proc. 2003 IMECE, Washington, DC, ASME, New York, Paper IMECE-2987.

Garrocho, J. S., Amorim, C. N. D., 2004. **“Luz Natural e Projeto de Arquitetura: Estratégias Para Iluminação Zenital em Centros de Compras”**, X ENTAC, Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo.

Grandjean, E., 1998. **“Manual de Ergonomia”**, Editora Bookman, 4º ed., Porto Alegre.

Gubareff, G. G., Jansen, J. E., Torborg, R. H., 1960. **“Thermal Radiation Properties Survey”**, Honeywell Raserch Center, Minneapolis, Minnesota.

Hoffmann, L. T., Silva, J. D. S., Gómez, A. T., 2003. **“Algoritmos para o Problema de Localização de Torres de Radiotransmissão”**, In: III Workshop dos Cursos de Computação aplicada do INPE, Anais do III Workcpa, p.1-7, São José dos Campos.

Howell, J.R., Daun, K., Erturk, H., Gamba, M., Sarvari, M. H., 2003. **“The Use of Inverse Methods for the Design and Control of Radiant Sources”**, JSME International Journal, serie B, vol. 46, nº 4, pp. 470-478.

IESNA – *Illumination engineering society of North América*, 2000. **“The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application”**, 9º ed., Nova Iorque.

Iida, I., 1990. **“Ergonomia: Projeto e Execução”**, Editora Edgard Blünchen, São Paulo.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., 2003, **“Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”**, 5º. Ed., Editora LTC, Rio de Janeiro.

Jordan, R. A., Tavares, M. H. F., 2005. **“Análise de Diferentes Sistemas de Iluminação Para Aviários de Produção de Ovos Férteis”**, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 9, n. 3, p. 420-423, Campina Grande.

Knupp, D. C., Silva Neto, A. J., Sacco, W. F., 2007. **“Estimation of Radiative Properties with the Particle Collicion Algorithm”**, Inverse Problems, Design and Optimization Symposium. Miami.

Kudo, K., Kuroda, A., Eid, A., Saito, T., Oguma, M., 1996. "**Solution of the Inverse Radiative Load Problems by the Singular Value Decomposition**", Radiative Transfer-I: Proceedings of the First International Symposium on Radiation Transfer, pp. 568-578, Begell House, New York.

Lampers, R., Dutra, L., Pereira, F. O. R., 2004. "**Eficiência Energética na Arquitetura**", Editora Prolivros, São Paulo.

Lin, C. Y., Hajela, P., 1992. "**Genetic Algorithms in optimization problems with discrete and integer desing variables**", Engineering Optimization, v.19, p. 309-327.

Mental Help, 2008. "**Mental Help**", Brasil, Disponível em <http://www.mentalhelp.com>, Acessado em julho de 2008.

Mossi, A. C., Smith Schneider, P., França, F. H. R., De Sousa, F. L., Silva Neto, A. J., 2007. "**Application of the Generalized Extremal Optimization (GEO) Algorithm in an Illuminatiuon Inverse Design**", In: 19th International Congress of Mechanical Engineering, COBEM, Brasília.

NASA, 2008. "**My NASA Data: Science Basic**", Disponível em <http://mynasadata.larc.nasa.gov>, Acessado em julho de 2008.

OIT – Organização Internacional do Trabalho, 2001. "**Pontos de Verificação Ergonômica**", Preparado pela ILO – International Labour Office, Fundacentro, São Paulo.

OSRAM, 2005. "**OSRAM - Luz, Lâmpadas, reatores e sistemas de iluminação**", Disponível em <http://www.osram.com.br>, Acessado em junho de 2008.

Papst, A. L., Pereira, F. R., Lamberts, R., 1998. "**Uso de Simulação Computacional para Análise de Iluminação Natural**", VII ENTAC, Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Florianópolis.

Philips Lighting Division, 1981. "**Manual de iluminação**", Centro de Projetos de Iluminação da Philips division, 3ªed, Holanda.

Ryer, A. D., 1997. **“The Light Measurement Handbook”**, International Light, Newburyport, Massachussets, Disponível em: <http://www.intl-light.com>, Acessado em julho de 2008.

Salgado, D. C., 2004. **“Análise do Processamento Térmico de Aço no Interior de um Forno de Reaquecimento”**, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre.

Seewald, A., 2006. **“Projeto Inverso em Cavidades Radiantes com Superfícies não Cinzas: Uma Abordagem para o Projeto de Iluminação”**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), UFRGS, Porto Alegre.

Siegel, R., Howell, J. R., 2002. **“Thermal Radiation Heat Transfer”**, Taylor & Francis, 4ª ed., New York.

Silva, E. C. N., 2008. **“Otimização Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos”**, Apostila, Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da USP, São Paulo.

Silva, T. L. W., 2006. **“Otimização do Controle Eletrônico do Diagrama de Radiação de Arranjos de Antenas Usando Algoritmos Genéticos com Codificação Real”**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Silva Neto, A. J., Moura Neto, F. D., 2005. **“Problemas Inversos: Conceitos Fundamentais e Aplicações”**, Ed. UERJ, Rio de Janeiro.

Smith Schneider, P., França, F. H. R., 2004. **“Inverse Analysis Applied to an Illumination System”**, In: 10th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences. Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences, Rio de Janeiro.

Souza, T. M., Barbosa, J., Bianchi, I., 2004. **“Software para o Cálculo do Número de Lâmpadas, Luminárias e da Distribuição no Meio Ambiente Visando o uso Eficiente da**

Energia Elétrica”, In: 5o. Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída, AGRENER. v. 01. p. 110-118, Campinas.

Tavares, S. G., 2007. “**Simulação Computacional para Projeto de Iluminação em Arquitetura**”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Teixeira, B. O. S., Jota, F. G. Teixeira, M. H., 2007. “**Modelagem, Controle e Otimização do Processo dos Fornos de Reaquecimento de Placas**”, Revista Controle & Automação, Vol. 18, no.1, p.67-93, Campinas.

Vanderplaats, G. N., 1998. “**Numerical Optimization Techniques for Engineerint Design**”, Colorado Springs: Vanderplaats Reserch & Development, 2º edition.

Vera, L. H., Andrade, A. C, Krenzinger, A., 2006. “**Metodologia para Analisar a Uniformidade de Iluminação**”, Anais do V Mercofrio – Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul.