

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

ANÁLISE INVERSA EM CAVIDADES RADIANTES COM SUPERFÍCIES NÃO-CINZAS:
UMA ABORDAGEM PARA PROJETOS DE ILUMINAÇÃO

por

Alexandre Seewald

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, novembro de 2006

ANÁLISE INVERSA EM CAVIDADES RADIANTES COM SUPERFÍCIES NÃO-CINZAS:
UMA ABORDAGEM PARA PROJETOS DE ILUMINAÇÃO

por

Alexandre Seewald
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: Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Antônio José da Silva Neto, UERJ

Prof. Dr. Liliane Basso Barichello, Promec

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer, Promec

Prof. Dr. Flávio José Lorini
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 17, novembro de 2006

RESUMO

Em diversas análises em engenharia, as condições de contorno previamente conhecidas do sistema em estudo não são suficientes para estabelecer um equacionamento bem-posto. Tal situação ocorre com frequência quando as informações disponíveis são originadas de dados medidos ou condições que se deseja alcançar. Esses problemas podem ser interpretados como uma análise inversa de problemas convencionais em que apenas uma condição de contorno é imposta em cada fronteira do sistema. Em projetos de iluminação de interiores, nas áreas de trabalho são especificados tanto o fluxo luminoso (diretamente) quanto o poder emissivo luminoso (indiretamente); as fontes luminosas não possuem qualquer condição prescrita. O objetivo do projeto de iluminação é determinar a posição e o poder luminoso das lâmpadas para satisfazer à condição de iluminação nas áreas de trabalho. Projetos inversos são tipicamente formulados por um sistema de equações mal-condicionado, exigindo métodos especiais de solução, ou regularização, para a obtenção de repostas aproximadas, porém de utilidade prática. 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. O presente trabalho, além de estender a técnica inversa para a solução de problemas de radiação luminosa, levando em conta a eficácia luminosa da visão humana, considera superfícies não-cinzas. Neste caso, o problema é descrito por um sistema de equações não-lineares, por não se conhecer a quantidade de energia luminosa em cada região do espectro de radiação. A não-linearidade é contornada pelo emprego de um método iterativo que define a temperatura necessária nas fontes luminosas para atender à condição calculada pelo método inverso, distribuindo essa energia coerentemente nas bandas espectrais. O presente trabalho apresenta também uma compilação de informações relevantes aos projetos de iluminação, promovendo uma integração dessa área do conhecimento com os conceitos clássicos de radiação térmica. É apresentada uma modelagem matemática da visão humana bem como uma modelagem do comportamento de lâmpadas incandescentes, de modo a aplicar as relações de radiação em projetos de iluminação. A regularização do sistema de equações é realizada pelo método TSVD (*Truncated Singular Value Decomposition*). A metodologia sugerida, aplicada a uma cavidade retangular tridimensional, conduz a resultados satisfatórios, sendo capaz de atingir a convergência na distribuição de energia luminosa nas bandas espectrais em apenas três iterações. Isso demonstra que a metodologia é estável, pois nenhum tipo de relaxação foi necessária. Alguns casos práticos são resolvidos, podendo-se evidenciar a influência das propriedades espectrais das superfícies não-cinzas na potência luminosa das fontes.

ABSTRACT

“Inverse analysis with non-gray surfaces: an approach for illumination design”

In several analyses in engineering, the set of known boundary conditions for the case under study does not establish a well posed system of equations. Such situation often occurs when the available information comes from measured data or conditions which are desired to be achieved. These problems can be interpreted as inverse analysis of conventional problems in which only one condition is imposed on the boundaries of the system. The illumination design of environments: in the working areas, both the luminous flux (directly) and the luminous emissive power (indirectly) are specified, while the light sources are left unconstrained. The objective of the illumination design is to determine the position and the luminous power of the lamps that are capable of providing the required illumination in the working area. Inverse designs are typically formulated by an ill-conditioned system of equations, which requires special methods of solution, or regularization, to achieve approximated, but of practical use, answers. The inverse design technique has proved a successful method to tackle the problem of radiative heat transfer in enclosures with gray walls, that is, having radiative properties that are independent of the wavelength. This work, in addition to extending the inverse technique to illumination, taking into account the luminous efficacy of the human eye, considers non-gray walls. In this case, the problem is described by a system of non-linear equations, since the amount of the luminous energy in the spectral bands is not known a priori. The non-linearity is dealt with the use of an iterative method to determine the temperatures of the illumination sources that satisfy the prescribed conditions on the working area, at the same time leading to a consistent distribution of the luminous energy in the bands. This work also presents a compilation of the relevant information for the illumination design, integrating this area of knowledge to the well established concepts of thermal radiation. The mathematical modeling of the human vision as well as of 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 TSVD (Truncated Singular Value Decomposition) method. The proposed methodology is applied to a three-dimensional enclosure, and leads to satisfactory results after only three iterations, which demonstrates the stability of the method. A few practical cases are solved, showing the influence of the spectrally dependent properties of the non-gray walls on the luminous source powers.

ÍNDICE

1. Introdução.....	1
1.1. Descrição do problema	1
1.2. Motivação	3
1.3. Objetivos.....	5
1.4. Organização do trabalho.....	5
2. Fundamentos de iluminação e radiação térmica.....	7
2.1. Superfícies negras, cinzas e não-cinzas.....	7
2.2. Troca radiante entre superfícies difusas	12
2.3. Unidades Fundamentais de Iluminação.....	14
2.4. O Sentido da Visão.....	16
2.5. Lâmpadas Incandescentes	18
2.6. Demais Tipos de Lâmpadas.....	23
2.7. Aplicações de Iluminação Artificial.....	25
2.7.1. Seres Humanos	25
2.7.2. Plantas.....	27
2.8. Estado da arte dos métodos para projeto de iluminação.....	29
3. Método das Cavidades Radiantes - Abordagem direta.....	32
3.1. Abordagem do problema direto.....	32
3.2. Estratégia de Solução	35
3.3. Limitações de Aplicação	39
4. Problemas Inversos.....	41
4.1. Equação Integral de Fredholm de Primeira Espécie.....	42
4.1.1. A condição de Picard.....	44
4.1.2. Regularização	44
4.2. Discretização do problema mal-condicionado	45
4.2.1. Decomposição em valores singulares (SVD) da matriz de coeficientes	45
4.3. Métodos de Regularização	47
4.3.1. Decomposição em valores singulares truncada (TSVD).....	47
4.3.2. Outros métodos de regularização	49
5. Metodologia de Solução	51
5.1. Estimativa inicial	55
5.2. Radiosidades das lâmpadas – análise inversa.....	55
5.3. Temperatura das Lâmpadas	57
5.4. Problema Direto.....	59
5.5. Fechamento do Problema – nova distribuição.....	61
5.6. Pós-processamento	62
6. Resultados.....	64
6.1. Independência de malha	64
6.2. Resultados de métodos empíricos	66
6.3. Projeto inverso de iluminação	69
6.3.1. Teto coberto por lâmpadas	70
6.3.2. Número limitado de lâmpadas.....	75
6.3.3. Análise de luminamento por bandas.....	82
7. Conclusões.....	85
7.1. Sugestão para Trabalhos futuros	86
Referências Bibliográficas.....	87

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área	m^2
\mathbf{A}	Matriz de coeficientes	-
a	Elementos da matriz \mathbf{A}	-
\mathbf{b}	Vetor independente	-
b	Elementos do vetor \mathbf{b}	-
bal	Valor do balanço global de energia da solução	adimensional
bn	Banda, intervalo discreto do espectro	-
BN	Número total de bandas consideradas	adimensional
$desvio$	Valor do desvio da solução relativo à condição prescrita	adimensional
e	Poder emissivo	$W/m^2\mu m$
e	Número de Euler	adimensional
$erro$	Valor de erro considerado da solução	adimensional
F	Fator de forma entre duas superfícies	adimensional
f	Função	-
g	Função	-
i	Intensidade de radiação	$W/m^2\mu m$
I	Corrente elétrica	A
j	Demais superfícies de uma cavidade	-
jd	Superfícies de projeto	-
jdI	Número total de superfícies de projeto	-
jl	Superfícies de lâmpadas	-
jlI	Número total de superfícies de lâmpadas	-
jw	Superfícies de parede	-
jwI	Número total de superfícies de parede	-
k	Superfície qualquer de uma cavidade	-
K	<i>Kernel</i> ou Núcleo	-
M	Número de equações	-
N	Número de incógnitas	-
n	Número de lâmpadas	-
P	Potência elétrica	W
p	Parâmetro de regularização	-
Q	Luminamento adimensional	adimensional [lx/lx]
q	Luminamento ou Fluxo radiante	lx ou W/m^2
$q^{(l)}$	Luminamento	lx
$q^{(w)}$	Fluxo radiante	W/m^2

q^+	Fluxo luminoso ou Potência radiante	lm ou W
$q^{+(l)}$	Fluxo luminoso	lm
$q^{+(W)}$	Potência radiante	W
R	Resistência elétrica	Ω
\mathbf{r}	Vetor resíduo	-
S	Distância entre duas superfícies	m
s	Variável qualquer	-
T	Temperatura	K
t	Variável qualquer	-
U	Tensão elétrica	V
u	Função singular de K	-
V	Eficiência luminosa fotópica	adimensional
v	Função singular de K	-
\mathbf{x}	Vetor solução	-
x	Posição relativa no comprimento	adimensional
X	Comprimento	m
y	Posição relativa na largura	adimensional
Y	Largura	m
Z	Altura	m
z	Posição relativa na altura	adimensional
α	Absortividade	adimensional
β	Norma das linhas da matriz \mathbf{A}	-
ε	Emissividade	adimensional
ζ	Critério de convergência	adimensional
η	Fator de utilização	adimensional
Θ	Hemisfério	-
θ	Ângulo zenital	rad
ι	Número total de superfícies que formam uma cavidade	adimensional
κ	Índice do recinto	adimensional
λ	Comprimento de onda	nm ou μm
μ	Valores singulares de K	-
Π	Fator de depreciação	adimensional
ρ	Refletividade	adimensional
σ	Valores singulares de \mathbf{A}	-
τ	Transmissividade	adimensional
Φ	Fluxo radiante da lâmpada	lm
φ	Ângulo azimutal	rad
ω	Ângulo sólido	sr

SUBÍNDICES

a	Quantidade absorvida por uma superfície
bn	Grandeza na faixa de uma banda espectral genérica
bnf	Limite no fim da banda considerada
bni	Limite no início da banda considerada
CN	Relativo ao corpo negro
e	Quantidade emitida por uma superfície
fil	Filamento da lâmpada incandescente
i	Quantidade incidente em uma superfície
jd	Referente às superfícies de projeto
jl	Referente às superfícies de lâmpadas
jw	Referente às superfícies de parede
L	Lâmpada
N	Direção normal à direção considerada
o	Quantidade que deixa uma superfície
op	Grandeza no ponto de operação
r	Quantidade líquida em uma superfície
ref	Grandeza de referência
s	Ligação em série no circuito elétrico
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

SUPERÍNDICES

+	Indica que a quantidade não é por unidade de área
(<i>l</i>)	Quantidade luminosa
<i>req</i>	Quantidade requerida
(<i>W</i>)	Quantidade radiante

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Relação de causa e efeito para as abordagens direta e inversa. FONTE: Silva Neto, 2005.....	1
Figura 2.1 Lei do cosseno de Lambert para emissão direcional. FONTE: Siegel e Howell, 2002. 8	8
Figura 2.2 Intensidade de radiação do elemento de área dA através do ângulo sólido $d\omega$	8
Figura 2.3 Energia incidente em um elemento de área.	10
Figura 2.4 Superfícies difusas em troca térmica radiante.	13
Figura 2.5 A definição de candela.....	15
Figura 2.6 Seção transversal do olho humano. Fonte: Iida, 1990.	16
Figura 2.7 Eficiência luminosa fotópica para diferentes comprimentos de onda.	17
Figura 2.8 Efeito da temperatura na emissividade hemisférica total de vários metais e um dielétrico. FONTE: Gubareff <i>et al.</i> , 1960.	19
Figura 2.9 Emissão de um filamento de tungstênio de uma lâmpada incandescente em comparação com a emissão do corpo negro, ambos a 3000 K. FONTE: IESNA, 2000.....	19
Figura 2.10 Variação da vida útil e fluxo luminoso de lâmpadas de filamento de tungstênio de acordo com a tensão aplicada. FONTE: Ryer, 1997.	21
Figura 2.11 Circuito para reduzir potência luminosa de lâmpadas.	22
Figura 2.12 Fluorescência do fósforo. Fonte: IESNA, 2000.....	24
Figura 2.13 Emissão espectral para 3 tipos de lâmpadas fluorescentes. Fonte: Ryer, 1997.....	25
Figura 3.1 Abordagens de balanço energético em uma superfície.....	34
Figura 3.2 Planos de um sistema bem condicionado 3×3 com determinante normalizado igual a 0,8.....	37
Figura 3.3 Fluxograma do processo direto de cálculo.	39
Figura 4.1 Representação geométrica de um sistema mal-condicionado 6×6 com determinante normalizado igual a 7×10^{-7}	42
Figura 5.1 A cavidade considerada no problema.	51
Figura 5.2 Demonstração do comportamento da emissividade para as três classes de superfícies não-cinzas.....	52
Figura 5.3 Metodologia para cavidades formadas por superfícies cinzas proposta por Schneider e França (2004).	54
Figura 5.4 Metodologia proposta para cavidades formadas por superfícies não-cinzas.....	55
Figura 6.1 Planos de simetria considerados na cavidade.	64
Figura 6.2 Luminamento obtido com diferentes malhas para dois pontos localizados na superfície de projeto.....	65
Figura 6.3 Luminamento para uma seção da superfície de projeto.....	66
Figura 6.4 Arranjo segundo Método Lúmen para instalação de 48 lâmpadas.	68
Figura 6.5 Luminamento na superfície de projeto para um arranjo de 48 lâmpadas instaladas uniformemente no teto.	68
Figura 6.6 Luminamento na superfície de projeto para um arranjo de 30 luminárias, de acordo com o programa WinElux (EEE, 2002) e pelo método das radiosidade.....	69
Figura 6.7 Emissividade de superfícies reais (a) e a respectiva modelagem como superfícies não-cinzas (b).	70
Figura 6.8 Região de simetria para uma configuração de 720 lâmpadas instaladas no teto.	71
Figura 6.9 Valores singulares para o teto coberto por lâmpadas (Figura 6.8) e arranjo com 48 lâmpadas (Figura 6.4).....	72
Figura 6.10 Temperatura das lâmpadas no teto (a) e conseqüente luminamento na superfície de projeto (b) para $p=12$	73
Figura 6.11 Temperatura das lâmpadas no teto (a) e conseqüente luminamento na superfície de projeto (b) para $p=2$	74
Figura 6.12 Temperatura das lâmpadas no teto (a) e conseqüente luminamento na superfície de projeto (b) para $p=6$	74

Figura 6.13 Luminamento obtido com $p=5$ para a configuração de 48 lâmpadas uniformemente distribuídas.	76
Figura 6.14 Região de simetria para uma configuração de 40 lâmpadas no teto sugerida por Schneider e França, 2004.	77
Figura 6.15 Fluxo líquido adimensional para lâmpada n ^o 4 da Figura 6.14 (a) calculado pela análise inversa e (b) com a correção de temperatura.	78
Figura 6.16 Luminamento adimensional para o elemento localizado no centro da superfície de projeto (a) calculado pela análise direta e (b) a nova distribuição.	78
Figura 6.17 Valores singulares para quatro arranjos abordados na seção 6.3.2.....	80
Figura 6.18 Emissividade espectral hemisférica para superfícies claras.	81
Figura 6.19 Região de simetria para uma configuração de 24 lâmpadas no teto para baixos valores de luminamento.	81
Figura 6.20 Emissividade espectral hemisférica dividida em cinco bandas.	83
Figura 6.21 Luminamento obtido para arranjo com 40 lâmpadas.....	83
Figura 6.22 Distribuição de luminamento no espectro visível para ponto ($x=0,5$; $y=0,5$).....	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Resumo das grandezas de iluminação com suas unidades e símbolos.....	16
Tabela 2.2 Catálogo de lâmpadas incandescentes. FONTE: OSRAM, 2005.	20
Tabela 2.3 Dados calculados com base nas informações do catálogo.	21
Tabela 2.4 Luminamento por classe de tarefas visuais da NBR 5413. FONTE: ABNT, 1992.	26
Tabela 2.5 Luminamento recomendado para plantas em um período de 14 horas por dia. FONTE: IESNA, 2000 e Lorenzi e Souza, 1999.	29
Tabela 2.6 Variáveis de projeto para o método Lúmen.	30
Tabela 6.1 As diferentes malhas testadas.	65
Tabela 6.2 Variáveis do projeto proposto para aplicação do Método Lúmen.....	67
Tabela 6.3 Resultados com o teto coberto por lâmpadas com diferentes números de valores singulares considerados.....	72
Tabela 6.4 Condições para luminamento de 900 lx e desvio de 2,81% com 48 lâmpadas uniformemente distribuídas.....	76
Tabela 6.5 Condições para luminamento de 900 lx e desvio de 0,98% com 40 lâmpadas distribuídas conforme Figura 6.14.	80
Tabela 6.6 Resultados para o arranjo de 24 lâmpadas e luminamento de 400 lx.....	82

1. INTRODUÇÃO

1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Uma área de forte interesse na pesquisa científica consiste no estudo e elaboração de métodos para aperfeiçoar o projeto de sistemas no interior dos quais há a transferência de calor radiante, combinada ou não com outros mecanismos de transporte. Tal situação ocorre em fornos, aquecedores de passagem, caldeiras, entre outros. Um caso particular de troca de energia radiante em cavidade é a iluminação de ambientes. Para tal, o espectro eletromagnético é reduzido para a faixa visível e a forma com que o sentido da visão percebe a energia neste intervalo deve ser considerada.

Em diversos casos, a principal dificuldade encontrada é projetar o sistema para se atingir a condição desejada. No caso de fornos, por exemplo, deseja-se atingir a temperatura na face de uma peça para realizar adequadamente um tratamento térmico. No caso de projetos de iluminação, objetiva-se atingir uma condição de iluminação apropriada no plano onde as tarefas de trabalho são realizadas. Utilizando-se os métodos convencionais, o projeto é elaborado com base na experiência do projetista e em métodos empíricos. Uma vez que se estipula uma configuração, métodos exatos de cálculo são utilizados para verificar se o projeto realmente atende à condição prescrita. Como, de modo geral, tal condição não é prontamente atendida, o projetista deve se valer novamente de sua experiência para fazer as alterações necessárias, uma vez que esta metodologia não aponta a direção que irá aprimorar sua solução. Este processo pode se tornar muito trabalhoso, pois é possível que deva ser repetido por diversas vezes até a obtenção do luminamento desejado.

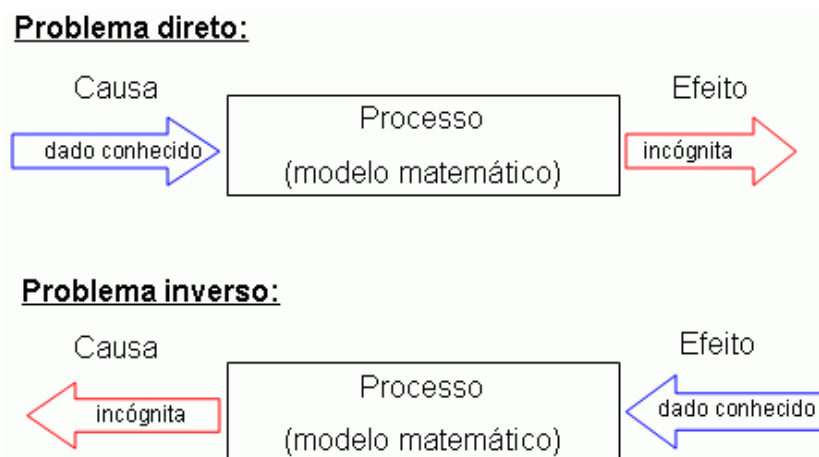


Figura 1.1 Relação de causa e efeito para as abordagens direta e inversa. FONTE: Silva Neto, 2005.

Este procedimento segue uma abordagem direta (Figura 1.1), onde a causa do fenômeno físico é conhecida, ou estimada, e, submetendo estes dados a um modelo matemático, é possível determinar o efeito resultante.

No entanto, a formulação do problema descrito é tipicamente um problema inverso (Figura 1.1), uma vez que o dado conhecido é o luminamento que se deseja obter a partir de um conjunto de lâmpadas. Neste caso, tem-se que o sistema de equações a ser resolvido apresenta-se geralmente como mal-condicionado. Os métodos convencionais de solução de sistemas lineares não são capazes de solucionar satisfatoriamente esse tipo de problema, de modo que métodos especiais de solução, denominados regularização, devem ser utilizados. Hansen, 1998, apresenta uma descrição dos métodos disponíveis para solucionar problemas mal-condicionados. Uma revisão detalhada de problemas inversos aplicados a radiação térmica é feita por França *et al.*, 2002, que aplica alguns destes métodos e compara o desempenho obtido. De acordo com Daun *et al.*, 2006, os métodos de regularização mais comumente utilizados são o Tikhonov, o TSVD (*Truncated Singular Value Decomposition*) e o CG (*Conjugated Gradient*). Em Daun *et al.*, 2006, estes três métodos são aplicados a uma mesma cavidade radiante, o que possibilitou concluir que os resultados obtidos foram muito similares. 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 gera soluções mais suaves e proporciona ao projetista um melhor controle do parâmetro de regularização, por outro lado é complexo determinar seu parâmetro de regularização. O trabalho indica certa vantagem à regularização TSVD, pois, apesar de demandar o maior tempo computacional, essa regularização permite uma percepção apurada do grau de mal-condicionamento do problema em questão. A validação dos resultados obtidos por esses métodos de regularização foi feita por comparação com resultados experimentais por Gamba *et al.* (2002, 2003).

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. Nesses termos, Morales, 1998, apresenta um estudo da troca radiante em cavidades bi e tridimensionais em meio participante com temperatura uniforme. Kudo *et al.*, 1996, utilizam 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, utilizam métodos de regularização em cavidades formadas por superfícies cinzas e propõem um esquema para otimização de

geometria. Em diferentes exemplos, este trabalho determina de forma inversa as propriedades das superfícies, as condições de contorno e a geometria da cavidade. Métodos de otimização também foram aplicados à metodologia inversa por Daun *et al.*, 2006, com o objetivo de encontrar o arranjo que minimiza o número de fontes necessárias para atender a condição prescrita. Para tal, foram utilizados os métodos de minimização quasi-Newton e recozimento simulado. França e Howell, 2005, propõem a solução de um problema inverso transiente para o projeto de um forno com paredes cinzas e difusas. O objetivo é determinar a potência de um arranjo de aquecedores que satisfaça uma determinada curva de temperatura ao longo do tempo de modo que uma peça passe pelas alterações metalúrgicas desejadas. Silva Neto e Moura Neto (2005) apresentaram métodos alternativos aos apresentados neste trabalho para tratar de problemas inversos. Schneider e França, 2004, utilizaram pela primeira vez a análise inversa em projeto de iluminação, com a hipótese de superfícies cinzas, assim como os demais trabalhos citados acima.

Em diversas situações, a hipótese de superfície cinza não pode ser feita pois pode-se incorrer em grandes desvios relativos à uma situação prática. Nesses casos, deve ser utilizada uma modelagem mais criteriosa, na qual a dependência das propriedades em relação ao comprimento de onda é considerada. Ao se considerar superfícies não-cinzas, o problema de cavidades radiantes se torna não-linear e uma metodologia para lidar com esta não-linearidade do problema inverso deve ser implementada.

1.2. MOTIVAÇÃO

Projetos de iluminação têm o objetivo de prover um ambiente com conforto visual para que as pessoas exerçam suas atividades com bom desempenho. Para tal, é necessário considerar a forma com que a energia radiante é transformada em informação pela visão, bem como as implicações físicas, fisiológicas e cognitivas decorrentes de determinadas condições de iluminação. É possível criar ambientes com condições propícias para estimular diferentes comportamentos tais como criatividade, concentração e relaxamento. O instinto faz com que, não só as pessoas, mas também outros animais, a exemplo dos insetos, sejam atraídos por níveis de iluminação mais intensos, fazendo possível que projetos de iluminação sejam utilizados para direcionar a circulação em locais movimentados ou em situações de emergência. Como descrito por IESNA, 2000, uma redução significativa nos níveis sonoros dos corredores de uma escola foram medidas quando a iluminação fora reduzida.

O não atendimento das condições de conforto visual pode provocar diferentes sintomas. Entre os mais comuns, os olhos ficam vermelhos, irritadiços e lacrimejantes. Quando combinado

com outros fatores, podem ainda ocorrer dores de cabeça, problemas gastrointestinais e dores devidas à má postura. Uma das reações comuns em ambientes com dificuldade visual é o observador curvar-se para se aproximar do objeto. Dessa forma, os músculos que envolvem o olho se ajustam para manter a imagem do objeto focada na retina. Esta função pode gerar, diretamente, a fadiga destes músculos e, indiretamente, a fadiga de outros músculos pela postura não usual adotada pelo observador. Outra situação de dificuldade visual ocorre quando se dirige sob forte chuva ou neblina. 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. Como será visto adiante neste trabalho, objetos brilhantes em movimento ou piscantes são facilmente detectados pela visão periférica, que são analisados com detalhe pela região central da visão. Caso o observador conclua não ter interesse nestes objetos, os mesmos passam a ser fontes de dificuldade visual, pois persistem no campo visual causando distração. Todos estes são sintomas de desconforto visual e devem ser evitados por meio de um bom projeto de iluminação.

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 e o ciclo de respiração vegetal.

Um estudo descrito por IESNA, 2000, mostra o efeito 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 locais de frente a áreas claras. Quando as áreas escuras se tornam claras e vice-versa, a escolha migra sempre para a área clara.

Na medicina, o tratamento com exposição à luz em cabines sob condições de radiação controladas apresenta bons resultados [CDEF, 2006] no tratamento de doenças como psoríase, vitiligo, linfomas cutâneos, icterícia neo-natal, entre outras. 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 [Mental Help, 2006]. A depressão sazonal ocorre com maior frequência nas mulheres e nos meses mais escuros. 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.

Vera *et al.*, 2006, mostra que a uniformidade espacial e temporal dos níveis de iluminação são fatores decisivos em ensaios de desempenho de painéis fotovoltaicos. O projeto de uma câmara de ensaio deve garantir tal uniformidade com um desvio máximo especificado. O não

atendimento destes requisitos pode levar a resultados sem validade por não permitir a inter-comparação de desempenho de painéis.

1.3. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo central propor uma metodologia que possibilite resolver problemas inversos de radiação térmica envolvendo superfícies não-cinzas, uma situação que traz uma não-linearidade ao problema que não foi ainda considerada em outras análises inversas, conforme revisão bibliográfica. Deseja-se determinar o fluxo luminoso de determinados arranjos de lâmpadas que propiciem uma condição de iluminação prescrita na superfície de trabalho. O método TSVD será empregado para regularização do sistema de equações mal-condicionado, e a influência do parâmetro de regularização p será avaliada. Para driblar a não-linearidade inerente ao problema com superfícies não-cinzas, será utilizado um processo iterativo que corrige a radiosidade das superfícies de acordo com as propriedades de cada banda espectral considerada.

Como objetivo secundário, pretende-se fazer uma revisão das particularidades de projetos de iluminação, isto é, determinar as unidades utilizadas, revisar os métodos atualmente empregados e os resultados que são capazes de apresentar. Pretende-se ainda determinar uma modelagem para o sentido da visão humana, de modo que a iluminação possa ser equacionada com o uso das relações já conhecidas para radiação térmica.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho se divide em seis capítulos. No Capítulo 2 são apresentados os fundamentos básicos para a construção deste trabalho. Em oito seções, são apresentados os conceitos de transferência de calor por radiação térmica e sua relação com 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.

No Capítulo 3 é apresentado o método para solução de transferência de calor em cavidades. A abordagem direta de cavidades é apresentada juntamente com as hipóteses feitas. Em seguida, são discutidas as limitações de utilização de uma abordagem direta, o que conduz à necessidade de aplicação de uma abordagem inversa no capítulo seguinte.

O Capítulo 4 descreve algumas características principais dos problemas inversos. É apresentado inicialmente a equação integral de Fredholm, um problema inverso que mantém semelhança com o sistema utilizado no método das cavidades radiantes apresentado no capítulo

anterior. Em seguida, é apresentada a discretização do problema mal-condicionado, chegando-se aos métodos de decomposição em valores singulares que possibilitam a obtenção de resultados para a análise inversa.

O Capítulo 5 apresenta a maior contribuição deste trabalho, qual seja, uma metodologia proposta para resolver o problema inverso em cavidade radiante com superfícies não-cinzas. É proposto um esquema de solução no qual a fonte de não-linearidade pode ser isolada e dessa forma, a solução do problema pode evoluir iterativamente, utilizando alternadamente a metodologia inversa e a metodologia direta.

No Capítulo 6 são apresentados resultados para um caso típico de cavidade radiante. É adotado um ambiente com dimensões e propriedades bem conhecidas no qual se deseja escolher um arranjo adequado para diferentes níveis de iluminação. São feitas algumas comparações de resultados obtidos com métodos que representam o estado da arte. A metodologia inversa para superfícies não-cinzas, proposta no Capítulo 5, é aplicada para diferentes arranjos de lâmpadas e são apresentados os desvios médios e máximos relativos aos níveis de iluminação prescritos. São determinados os parâmetros operacionais das lâmpadas para que se obtenha a devida distribuição de iluminação, conforme modelagem de lâmpadas incandescentes do Capítulo 2. Por fim, é feita uma análise da influência de cada banda espectral na iluminação.

2. FUNDAMENTOS DE ILUMINAÇÃO E RADIAÇÃO TÉRMICA

Diferentes áreas do conhecimento se complementam para possibilitar o entendimento mais amplo do problema de iluminação. A fim de estabelecer um método para o projeto de iluminação de ambientes se faz necessária a apresentação de conceitos que envolvem transferência de calor, as particularidades da visão humana e os fenômenos físicos pelos quais a luz é gerada nas lâmpadas.

Neste capítulo são feitas, inicialmente, algumas deduções matemáticas que permitem equacionar o fenômeno de transferência de calor radiante. São definidos os conceitos de corpo negro, superfícies cinzas e não-cinzas. A radiação em superfícies é apresentada e, a partir do conceito de fator forma, é detalhada a troca de calor entre as mesmas. Posteriormente, a radiação térmica é levada para o campo da iluminação onde as grandezas são quantificadas por meio de unidades específicas. A forma com que o olho humano percebe a energia luminosa é abordada assim como os tipos de fontes luminosas e a forma de tratá-las matematicamente. Por fim, as metodologias atuais para projetos de iluminação são apresentadas.

2.1. SUPERFÍCIES NEGRAS, CINZAS E NÃO-CINZAS

O corpo negro é definido como uma superfície ideal que apresenta o seguinte comportamento:

1. Absorve toda energia radiante, independentemente do comprimento de onda;
2. Para uma dada temperatura, a energia radiante emitida é máxima para cada comprimento de onda;
3. A radiação emitida pelo corpo negro em todas as direções depende apenas da temperatura e do comprimento de onda.

O estudo conduzido por Max Planck publicado no ano de 1901 (Siegel e Howell, 2002) utilizou exclusivamente relações termodinâmicas para deduzir a equação que descreve o poder emissivo do corpo negro a uma dada temperatura em um dado comprimento de onda. Conhecida como distribuição de Planck do poder emissivo hemisférico espectral do corpo negro, apresenta a seguinte forma:

$$e_{\lambda,CN}(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot C_1}{\lambda^5 \cdot e^{\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)} - 1} \quad (2.1)$$

em $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$, onde λ é o comprimento de onda em μm , T é a temperatura absoluta da superfície em K, C_1 e C_2 são constantes que valem respectivamente $0,59 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ e $14.387,75 \mu\text{m} \cdot \text{K}$.

Superfícies negras obedecem à lei de emissão direcional de Lambert, por isso são denominadas superfícies difusas. Segundo a lei do cosseno de Lambert, em superfícies difusas a emissão de energia segue uma distribuição cossenoidal relativa ao ângulo θ , sendo máxima na direção normal à superfície e nula na direção paralela à mesma (Figura 2.1).

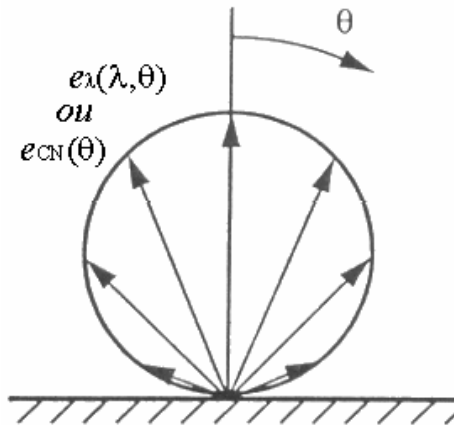


Figura 2.1 Lei do cosseno de Lambert para emissão direcional. FONTE: Siegel e Howell, 2002.

Seja uma superfície difusa de área infinitesimal dA centrada na origem do plano cartesiano XY 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.

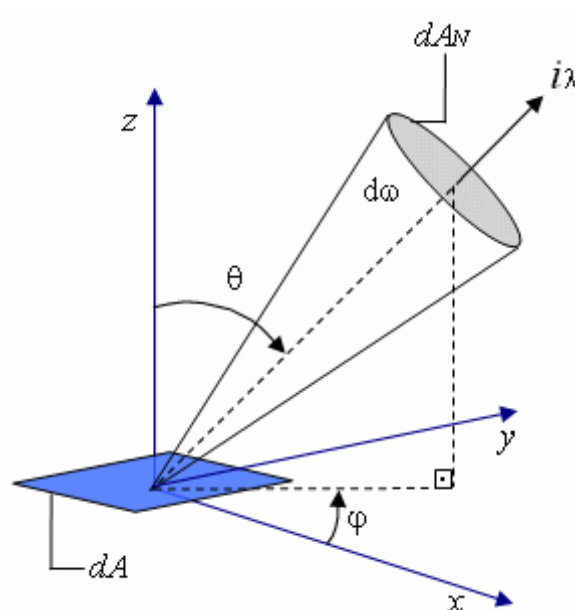


Figura 2.2 Intensidade de radiação do elemento de área dA através do ângulo sólido $d\omega$.

A intensidade de radiação (i) que cruza a superfície de controle dA_N é definida como:

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

onde a variável $d^3 q_{\lambda,\theta}^{+(W)}$ é a taxa de energia emitida por elemento diferencial de área, através de um ângulo sólido diferencial $d\omega$ em um intervalo diferencial de comprimento de onda $d\lambda$, centrado em λ .

Por ser definida em relação ao cosseno do ângulo de emissão, a intensidade de radiação do corpo negro não depende da direção de emissão, isto é:

$$i_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T) = i_{\lambda}(\lambda, T) \quad (2.3)$$

Além disso, em meios não participantes a intensidade de radiação mantém-se constante. Logo, a intensidade de radiação não representa a energia emitida em cada direção, mas sim uma relação da energia emitida com o cosseno do ângulo de emissão.

Para superfícies difusas, como o corpo negro, é possível encontrar uma relação simples entre o poder emissivo e a intensidade de radiação, isto é, comparar uma quantidade emitida em todo hemisfério com uma quantidade emitida em uma única direção através de $d\omega$. Sendo o poder emissivo definido como a totalidade da radiação emitida por uma superfície, temos que:

$$e_{\lambda} = \frac{d^2 q_{\lambda}^{+(W)}}{dA \cdot d\lambda} \quad (2.4)$$

combinando as Eqs. (2.2) e (2.4) chega-se a:

$$d^2 q_{\lambda}^{+(W)} = \int_{\Theta} d^3 q_{\lambda}^{+(W)} \quad (2.5)$$

isto é,

$$e_{\lambda} = \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{2\pi} i_{\lambda} \cos \theta \sin \theta d\varphi d\theta \quad (2.6)$$

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

$$e_{\lambda} = \pi i_{\lambda} \quad (2.7)$$

Uma vez que o comportamento do corpo negro é muito bem definido através das relações acima apresentadas, é possível modelar as demais superfícies com a utilização de parâmetros comparativos, que são exatamente as propriedades físicas das superfícies. O poder emissivo de

uma superfície qualquer é relacionado com o poder emissivo do corpo negro através de sua emissividade. A emissividade direcional espectral de uma superfície é definida, portanto, como:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta} = \frac{i_{\lambda}(\lambda, \theta, \varphi, T)}{i_{\lambda,CN}(\lambda, T)} \quad (2.8)$$

Para superfícies perfeitamente difusas, as propriedades físicas da mesma não dependem da direção considerada. Logo, utilizando-se a Eq.(2.7) a emissividade fica:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{e_{\lambda}(\lambda, T)}{e_{\lambda,CN}(\lambda, T)} \quad (2.9)$$

onde ε_{λ} é a emissividade hemisférica espectral. Conseqüentemente, o poder emissivo total hemisférico da superfície é:

$$e = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} e_{\lambda,CN} d\lambda \quad (2.10)$$

A energia incidente em uma superfície por unidade de área 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 2.3.

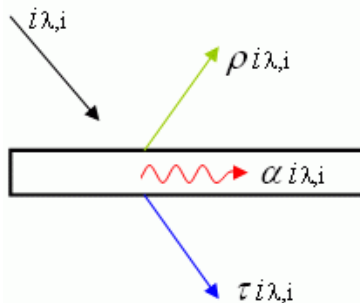


Figura 2.3 Energia incidente em um elemento de área.

As propriedades que definem este comportamento são, respectivamente, a absorvidade (α), a refletividade (ρ) e a transmissividade (τ). Um balanço energético realizado com a energia incidente da Figura 2.3, conduz a:

$$\alpha_{\lambda,\theta} + \rho_{\lambda,\theta} + \tau_{\lambda,\theta} = 1 \quad (2.11)$$

Uma hipótese comumente adotada é de que as superfícies sejam opacas, de modo que energia não é transmitida através da mesma. Desta forma, a Eq.(2.11) fica:

$$\alpha_{\lambda,\theta} + \rho_{\lambda,\theta} = 1 \quad (2.12)$$

A absorptividade, sendo a parcela de radiação incidente absorvida por uma superfície qualquer em relação ao corpo negro, que a absorve por completo, é definida como:

$$\alpha_{\lambda,\theta} = \frac{i_{\lambda,i,a}(\lambda, \theta, \varphi, T)}{i_{\lambda,i}(\lambda, T)} \quad (2.13)$$

Para superfícies irradiadas de forma difusa, a absorptividade hemisférica espectral é:

$$\alpha_{\lambda} = \alpha_{\lambda,\theta} = \frac{i_{\lambda,i,a}(\lambda, T)}{i_{\lambda,i}(\lambda, T)} \quad (2.14)$$

Algumas superfícies especiais são ditas cinzas quando a emissividade e a absorptividade hemisféricas espectrais não dependem do comprimento de onda, ou seja, as superfícies cinzas emitem e absorvem parcelas fixas relativas ao corpo negro ao longo de todo espectro eletromagnético. A hipótese de superfície cinza é geralmente feita em associação com a hipótese de superfície difusa, chegando-se com isso na seguinte forma funcional das propriedades:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T) &= \varepsilon(T) \\ \alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T) &= \alpha(T) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Apesar disto, tais propriedades podem ainda apresentar dependência com relação à temperatura da superfície.

Gustav Robert Kirchhoff mostrou que para qualquer superfície, a seguinte relação entre emissividade e absorptividade é válida:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta} = \alpha_{\lambda,\theta} \quad (2.16)$$

Esta dependência é denominada Lei de Kirchhoff, resultante de uma análise da 2ª lei da termodinâmica. A lei de Kirchhoff para as superfícies cinzas e difusas se simplifica em:

$$\varepsilon = \alpha \quad (2.17)$$

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.(2.10). Afim de contornar esta dificuldade, é realizada uma discretização de 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 o mesmo seja calculado para cada banda. Para cada banda bn previamente definida do espectro, tem-se da Eq.(2.17):

$$\epsilon_{bn} = \alpha_{bn} \quad (2.18)$$

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

$$e_{bn} = \epsilon_{bn} \int_{\lambda_{bni}}^{\lambda_{bnf}} e_{\lambda,CN} d\lambda \quad (2.19)$$

onde $e_{\lambda,CN}$ é dado pela Eq.(2.1) e λ_{bni} e λ_{bnf} são os comprimentos de onda que delimitam a região do espectro que forma a banda considerada.

2.2. TROCA RADIANTE ENTRE SUPERFÍCIES DIFUSAS

A taxa de energia por unidade de área que deixa um elemento de área dA , como o da Figura 2.2, é o resultado da energia emitida somada com a energia refletida, esta última devido a irradiação como mostrado na Figura 2.3. A soma dessas parcelas é denominada de radiosidade q_o , tal que:

$$d^2q_{o,\lambda}^+ = d^2q_{e,\lambda}^+ + \rho_{\lambda} d^2q_{i,\lambda}^+ \quad (2.20)$$

Logo, a Eq.(2.2) escrita para radiosidade da superfície 1 se torna:

$$i_{o,\lambda} = \frac{d^3q_{o,\lambda}^+}{dA \cos \theta \cdot d\lambda \cdot d\omega} \quad (2.21)$$

Da definição de taxa e fluxo radiante tem-se que:

$$d^2q_{o,\lambda}^+ = q_{o,\lambda} dAd\lambda \quad (2.22)$$

A relação estabelecida na Eq.(2.5) conduz a:

$$q_{o,\lambda} dAd\lambda = \left(\int_{\Theta} i_{o,\lambda} \cos \theta d\omega \right) dAd\lambda \quad (2.23)$$

Assim:

$$q_{o,\lambda} = \pi \cdot i_{o,\lambda} \quad (2.24)$$

e, integrando-se ao longo do espectro, pode-se também chegar a:

$$q_o = \pi \cdot i_o \quad (2.25)$$

A partir desses resultados para a energia que deixa uma superfície, pode-se obter a taxa ou fluxo total de energia radiante que deixa uma superfície para chegar à outra. Sejam as superfícies 1 e 2 da Figura 2.4, tem-se que o ângulo sólido $d\omega$ é definido como:

$$d\omega_1 = \frac{dA_2 \cdot \cos \theta_2}{S^2} \quad (2.26)$$

Considerando o meio como não-participante, a intensidade de radiação, Eq.(2.21), escrita para a radiosidade que sai de uma superfície e chega à outra fica:

$$d^3q_{\lambda, dA_1 \rightarrow dA_2}^+ = i_{o,\lambda,1} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{S^2} dA_1 \cdot dA_2 \cdot d\lambda \quad (2.27)$$

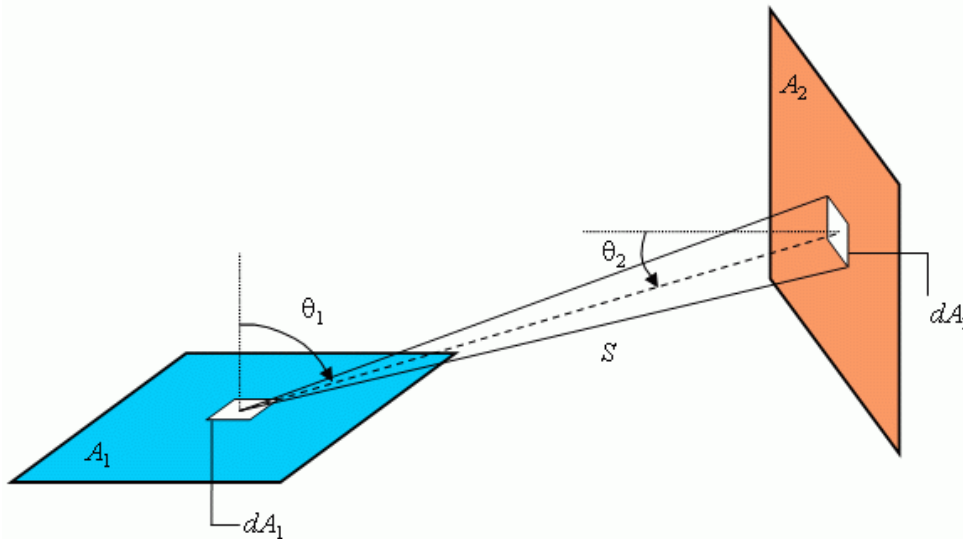


Figura 2.4 Superfícies difusas em troca térmica radiante.

A energia radiante que sai de A_1 e chega em A_2 é:

$$dq_{\lambda, A_1 \rightarrow A_2}^+ = \int_{A_1} \int_{A_2} i_{o,\lambda,1} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{S^2} dA_1 \cdot dA_2 \cdot d\lambda \quad (2.28)$$

Lembrando que, devido a forma com que fora definida, a intensidade de radiação é independente da direção em superfícies difusas, $i_{o,\lambda,1}$ é retirada da integral. Dessa forma, o resultado anteriormente obtido na Eq.(2.24) pode ser utilizado:

$$q_{\lambda,1 \rightarrow 2} = \left(\frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi S^2} dA_1 dA_2 \right) q_{o,\lambda,1} d\lambda \quad (2.29)$$

Portanto, integrando-se todo o espectro da energia radiante que sai de A_1 e chega em A_2 , tem-se que:

$$q_{1 \rightarrow 2} = \left(\frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi S^2} dA_1 dA_2 \right) q_{o,1} \quad (2.30)$$

Os termos entre parênteses dependem unicamente da geometria e orientação entre as superfícies. A essa dependência é dado o nome de fator de forma (F), como segue:

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi S^2} dA_1 dA_2 \quad (2.31)$$

e a Eq.(2.30) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$q_{1 \rightarrow 2} = F_{1 \rightarrow 2} q_{o,1} \quad (2.32)$$

Comparando a Eq.(2.30) com a equação equivalente à mesma para a energia radiante que sai de A_2 e atinge A_1 , chega-se a um resultado denominado regra da reciprocidade, onde o fator de forma nos sentidos inversos de troca radiante se relacionam da seguinte maneira:

$$A_1 F_{1 \rightarrow 2} = A_2 F_{2 \rightarrow 1} \quad (2.33)$$

No caso em que superfícies formam um sistema de troca radiante no qual a energia se conserva, isto é, a energia emitida por cada superfície é completamente absorvida pelas demais, este sistema é denominado de cavidade. A análise de conservação de energia em uma cavidade leva ao resultado de que o fator de forma das k superfícies que a formam devam obedecer à seguinte relação de balanço:

$$\sum_{j=1}^l F_{k \rightarrow j} = 1 \quad (2.34)$$

A troca radiante no interior uma cavidade é detalhada no Capítulo 3

2.3. UNIDADES FUNDAMENTAIS DE ILUMINAÇÃO

Dentre as sete unidades de base do sistema internacional (SI) encontra-se uma grandeza relativa à área de iluminação. Mesmo podendo ser definida através de unidades derivadas, como o watt, a intensidade luminosa recebe unidade específica denominada candela (cd).

Candela é definida por INMETRO, 2003, 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 2.5).

Na definição acima se percebe a distinção entre intensidade luminosa e intensidade energética. Isto ocorre devido à maneira particular com que percebemos a parcela de energia do espectro chamada luz visível, assunto detalhado adiante neste trabalho, o que justifica a manutenção da candela como unidade SI de base.

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 2.5. À 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 (1cd), enquanto que a luminância daquela superfície diminui devido ao aumento de área da superfície cinza.

A totalidade da energia luminosa que atinge a superfície de controle, grandeza denominada fluxo luminoso, pode ser obtida integrando-se a intensidade luminosa que cruza a superfície de controle em todas direções de emissão. O fluxo luminoso tem unidade candela vezes esterradiano e recebe o nome lúmen (lm).

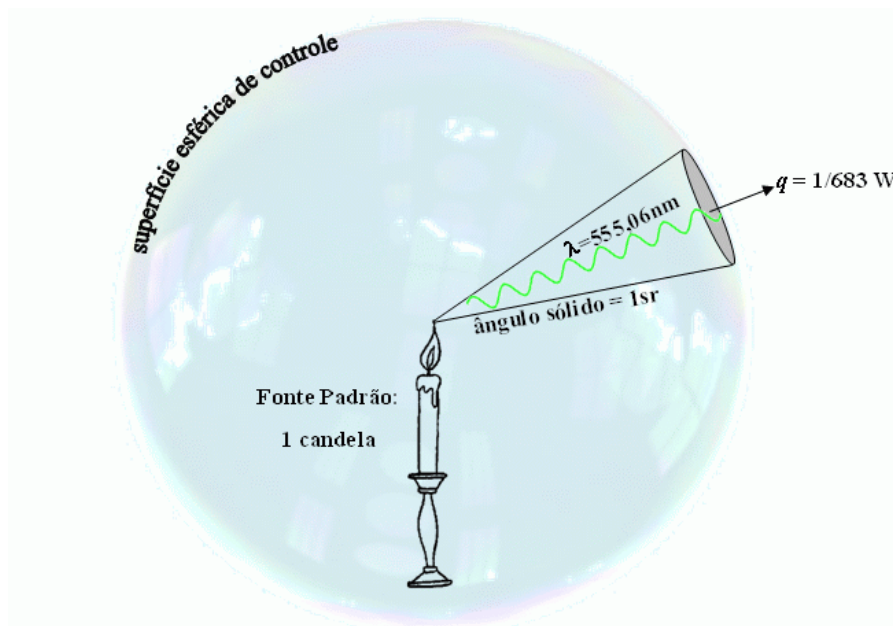


Figura 2.5 A definição de candela.

A grandeza que quantifica o fluxo luminoso por unidade de área é denominada luminamento, sendo sua unidade lúmen por metro quadrado, denominada lux (lx). O luminamento é a grandeza utilizada em tabelas que fornecem os níveis de iluminação mais favoráveis para cada situação, assunto abordado adiante neste trabalho.

Tabela 2.1 Resumo das 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	(cd·sr) = lúmen	lm
luminamento	(lm/m ²) = lux	lx

Nas unidades utilizadas em engenharia, o fluxo luminoso é equivalente ao que se denomina taxa, de unidade watt, enquanto que o luminamento equivale ao denominado fluxo, de unidade watt por metro quadrado. É interessante notar que o conceito de fluxo em engenharia não se aplica à iluminação, o que pode ser fonte de um certo desconforto para alguns.

2.4. O SENTIDO DA VISÃO

De acordo com a Sociedade de Engenharia de Iluminação da América do Norte [IESNA, 2000], 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 interpretados como uma imagem. A parte responsável pela geração dos sinais elétricos é a retina, com grande sensibilidade na região da Fóvea Central. Para atingi-la, os raios luminosos, ou fótons, passam através da Córnea, do Cristalino e do Humor Vítreo, como pode ser visto na Figura 2.6. Estes meios servem como filtros e devem transmitir a radiação incidente sem excessiva absorção ou espalhamento.

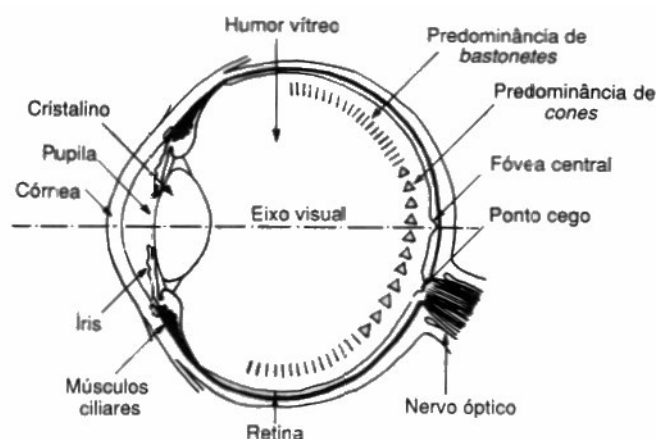


Figura 2.6 Seção transversal do olho humano. Fonte: Iida, 1990.

A transmitância do olho varia com o comprimento de onda e é reduzida significativamente ao longo da vida. Para a média da população, os comprimentos de onda visíveis estão na faixa compreendida entre 380nm até 780nm já que os meios pelos quais a radiação é transmitida no olho possuem transmissividade nula fora deste intervalo.

Ao atingir a retina, a radiação atinge duas classes distintas de células fotossensíveis, os cones e os bastonetes. 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 3cd/m^2 [IESNA, 2000]. Por sua vez, os bastonetes, ou receptores escotópicos, encontram-se mais esparsos na retina. Não distinguem cor, apenas forma [Iida, 1990], e são responsáveis pela visão em níveis de luminância muito baixos, menores que $0,001\text{cd/m}^2$ [IESNA, 2000] e portanto não são considerados neste trabalho.

Para a visão fotópica é utilizada uma razão entre a percepção luminosa [lúmen] e a irradiação no olho humano [watt], chamada de eficácia luminosa. Ao longo do espectro a eficácia luminosa possui diferentes valores, logo, algumas cores são vistas com maior intensidade que outras. A sensibilidade mais apurada do olho humano encontra-se no centro do espectro visível, nas cores verde e amarelo, e é gradativamente reduzida nos extremos deste intervalo para as cores laranja, azul, vermelho, anil e violeta.

A maior quantidade de energia, no valor de 683 lúmens por watt, é percebida no comprimento de onda de 555,016 nm. Para os demais comprimentos de onda é estabelecida uma função adimensional com valores relativos ao valor máximo acima citado, à qual é dado o nome de eficiência luminosa fotópica (V_λ), apresentada na Figura 2.7. De acordo com Iida, 1990, esta curva de sensibilidade é devida a sete tipos diferentes de receptores cromáticos localizados na fóvea central.

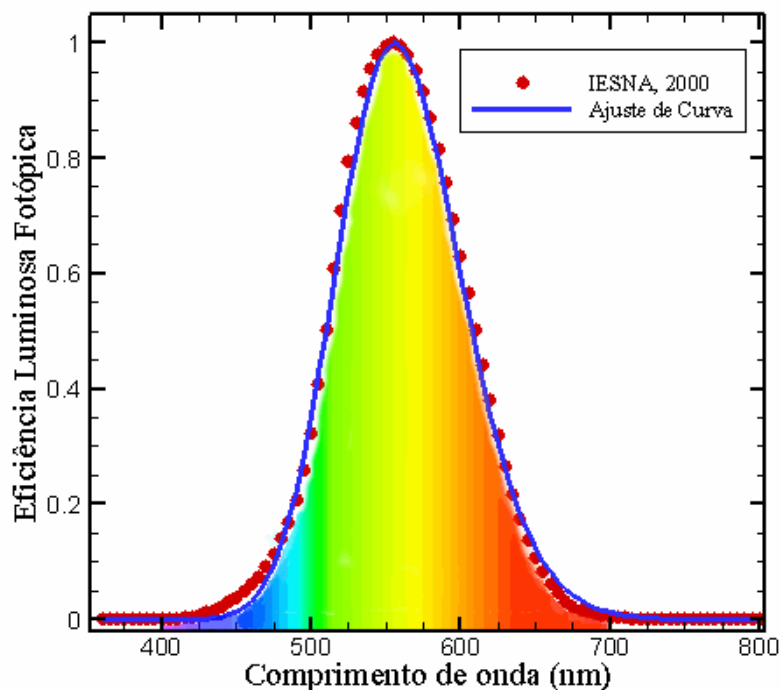


Figura 2.7 Eficiência luminosa fotópica para diferentes comprimentos de onda.

Um ajuste de dados permite equacionar tal comportamento com a expressão abaixo:

$$V_{\lambda} = \frac{1}{d} e^{\left(a + \frac{b}{\lambda} + c \ln(\lambda)\right)} \quad (2.35)$$

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 $360 \text{ nm} \leq \lambda \leq 800 \text{ nm}$. Assim, uma relação matemática para a obtenção do fluxo luminoso a partir de um fluxo radiante é estabelecida:

$$q^{+(l)} = 683 \int_{\lambda_f}^{\lambda_v} V_{\lambda} q^{+(w)} d\lambda \quad (2.36)$$

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

Em atividades de intenso uso da visão, alguns fatores podem vir a causar fadiga visual, entre eles: fixação de detalhes, iluminação inadequada, pouco contraste, pouca definição, objetos em movimento e má postura. A fadiga visual, de acordo com Iida, 1990, é provocada principalmente pelo esgotamento dos pequenos músculos ligados ao globo ocular, responsáveis pela movimentação, fixação e focalização dos olhos. Ela provoca tensão e desconforto e como consequência os olhos ficam avermelhados, lacrimejantes e piscam mais frequentemente. Em graus mais avançados, a fadiga visual causa dores de cabeça, náuseas, depressão e irritabilidade emocional.

2.5. LÂMPADAS INCANDESCENTES

Lâmpadas incandescentes são fabricadas utilizando-se um filamento de tungstênio, devido ao seu alto ponto de fusão. O filamento é envolto por um bulbo de vidro que contém, em seu interior, um gás inerte. Estas lâmpadas emitem radiação eletromagnética através do efeito Ohm, fenômeno eletrônico em que um elétron é excitado e, ao retornar à posição de maior estabilidade, libera energia. 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 Figura 2.8 mostra a variação da emissividade total hemisférica do tungstênio para

diferentes temperaturas. A extrapolação dos valores mostrados na Figura 2.8 até as temperaturas de operação do filamento leva a concluir que a emissividade espectral de filamentos de tungstênio na temperatura de operação é igual a 0,36 com variação insignificante na faixa de trabalho compreendida entre 2700 K e 3000 K.

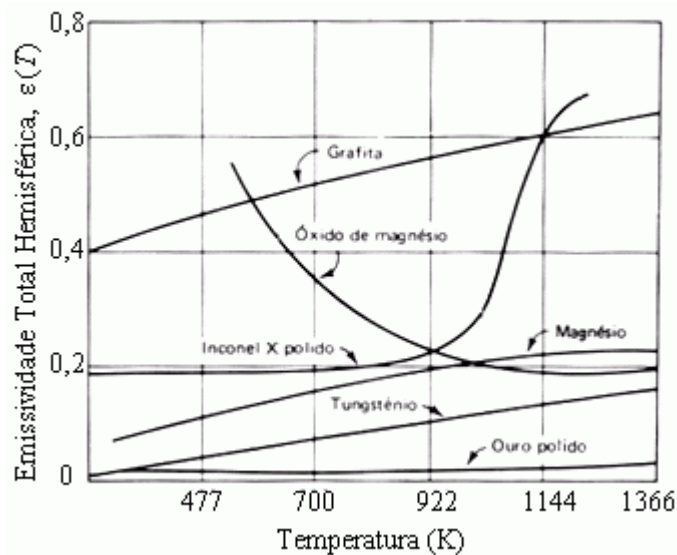


Figura 2.8 Efeito da temperatura na emissividade hemisférica total de vários metais e um dielétrico. FONTE: Gubareff *et al.*, 1960.

Esta análise está em concordância com o comportamento apresentado na Figura 2.9 que compara a emissão espectral do corpo negro com a de um filamento incandescente de tungstênio a 3000 K. A Figura 2.9 leva, ainda, à conclusão de 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 superfícies cinza de emissividade igual a 0,36.

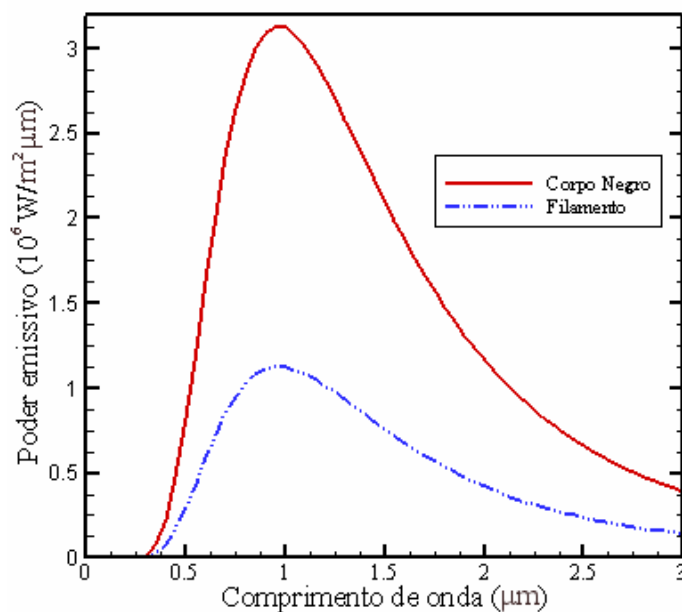


Figura 2.9 Emissão de um filamento de tungstênio de uma lâmpada incandescente em comparação com a emissão do corpo negro, ambos a 3000 K. FONTE: IESNA, 2000.

O poder emissivo espectral de uma lâmpada incandescente com filamento de tungstênio a uma dada temperatura T dada pela Eq.(2.9) é:

$$e_{\lambda} = 0,36 \cdot e_{\lambda,CN} \quad (2.37)$$

Logo, o poder emissivo luminoso $e^{(l)}$ destas lâmpadas, com base na Eq.(2.36), é:

$$e^{(l)} = 683 \cdot 0,36 \int_{\lambda_{bmi}}^{\lambda_{bmf}} V_{\lambda} \cdot e_{\lambda,CN} d\lambda \quad (2.38)$$

Catálogos de fabricantes fornecem os dados essenciais para modelagem de lâmpadas. Na Tabela 2.2 são apresentadas as informações de um fabricante nacional relativas à sua linha de lâmpadas denominada “clássica”. A partir dos dados de potência e de fluxo luminoso constantes nessa tabela, pode-se montar o seguinte sistema de equações:

$$q^{+(W)} = A_{fil} \int_0^{\infty} \varepsilon \cdot e_{\lambda,CN}(T) d\lambda \quad (2.39)$$

$$q^{+(l)} = A_{fil} \int_{0.4}^{0.7} 683 \cdot V_{\lambda} \cdot \varepsilon \cdot e_{\lambda,CN}(T) d\lambda \quad (2.40)$$

em que 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 (2.39) e (2.40).

Tabela 2.2 Catálogo de lâmpadas incandescentes. FONTE: 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

Este sistema de equações foi resolvido para cada modelo de lâmpada e os pares (A_{fil}, T) obtidos são mostrados na Tabela 2.3. Na mesma tabela são apresentados os valores de corrente e resistência elétricas calculados para a condição de operação de potência e tensão fornecida pelo fabricante.

Tabela 2.3 Dados calculados com base nas informações do catálogo.

Modelo	Temperatura de operação (K)	Área de filamento (m ²)	Corrente de operação (A)	Resistência (Ω)
INC25	2565,74	$2,826 \times 10^{-5}$	0,197	645,160
INC40	2728,53	$3,535 \times 10^{-5}$	0,315	403,225
INC60	2787,71	$4,867 \times 10^{-5}$	0,472	268,817
INC100	2855,08	$7,373 \times 10^{-5}$	0,787	161,290
INC150	2873,21	$1,078 \times 10^{-4}$	1,181	107,527
INC200	2905,26	$1,375 \times 10^{-4}$	1,575	80,645

Ocorre que valores intermediários dentre aqueles apresentados em catálogos podem ser requeridos quando, por exemplo, um projeto de iluminação exigir uma condição pré-definida de fluxo luminoso em determinada região. Nestes casos, deve-se modificar o ponto de operação das lâmpadas, isto é, mudar as condições de utilização sugeridas pelo fabricante para atingir as condições desejadas. Não é aconselhado, todavia, a operação em temperaturas superiores à temperatura de operação, uma vez que tal procedimento pode reduzir drasticamente a vida útil da lâmpada ou até mesmo queimá-la instantaneamente. Para temperaturas inferiores à temperatura de operação não há restrições de uso, pelo contrário, é inclusive aconselhado por estender a vida útil da lâmpada.

Com base nos dados de projeto, seleciona-se uma lâmpada incandescente com potência nominal superior e mais próxima possível da potência requerida. Em seguida modifica-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 mostra a Figura 2.10.

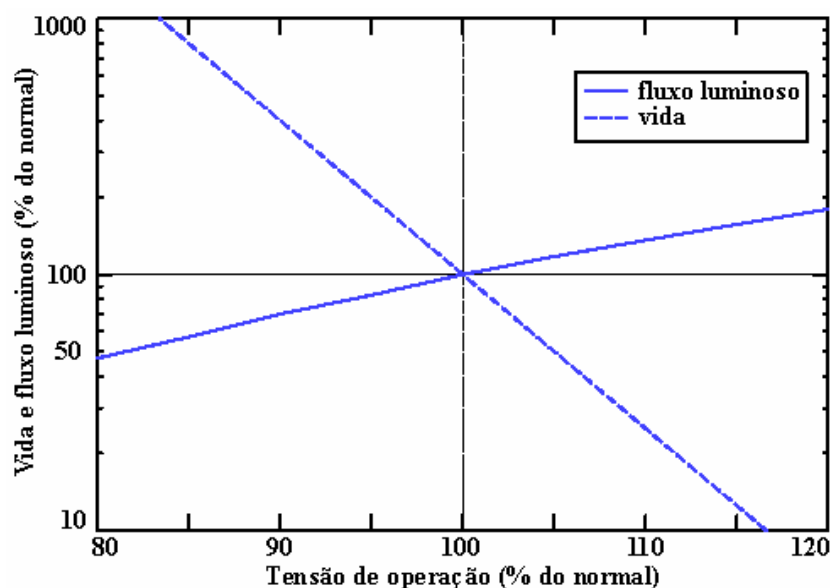


Figura 2.10 Variação da vida útil e fluxo luminoso de lâmpadas de filamento de tungstênio de acordo com a tensão aplicada. FONTE: Ryer, 1997.

O ajuste do ponto de operação de uma lâmpada incandescente é feito no circuito elétrico a ela associado, pelo controle da tensão do seu filamento. Há basicamente dois dispositivos para o controle de tensão: resistores ou controlador de tensão do tipo *dimmer*. O controle de tensão por resistores apresenta-se como uma solução simples e de baixo investimento inicial. No entanto, não é considerada por muitos como uma alternativa válida por realizar o controle de tensão ao custo de dissipar energia na forma de calor. Com o avanço da eletrônica, foram criados os *dimmers*, dispositivos eletrônicos capazes de abrir e fechar o circuito rapidamente, ocultando assim uma parte da onda de corrente alternada. Desse modo, o montante de energia consumida em cada ciclo é reduzido. O ponto de fechamento do circuito é fixo (em $V(t)=0$) enquanto que o ponto de abertura pode ser controlado continuamente. A vantagem do uso de *dimmers* é a alta eficiência obtida no controle de tensão. Por outro lado, a instalação de diversos destes dispositivos, como será necessária nos projetos apresentados no capítulo 6, pode não ser viável pelo alto investimento inicial que este requer. Os critérios para escolha do modo de controle de tensão podem envolver diversas variáveis, não sendo este o foco do presente trabalho. Desta maneira, serão projetados circuitos com resistores, não significando que este seja o melhor método a ser empregado. O fato importante reside unicamente em atingir o ponto de operação que os cálculos de projeto solicitarem, ficando o método para tal controle ao gosto do projetista.

Para atingir tal condição, pode-se utilizar um circuito simples como o da Figura 2.11, que faz uso de uma resistência variável colocada em série com a lâmpada.

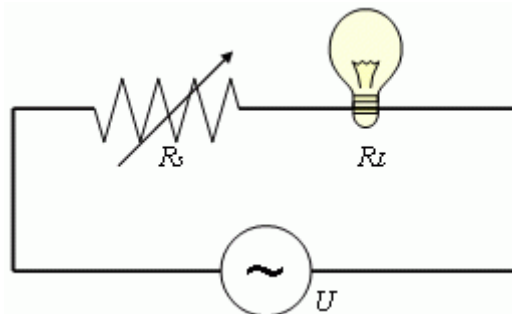


Figura 2.11 Circuito para reduzir potência luminosa de lâmpadas.

O uso deste circuito permite a obtenção precisa do fluxo luminoso requerido pelo projeto, bastando, para isso, determinar o valor da resistência R_S que deve ser ligada em série com a lâmpada. As relações básicas de circuitos conduzem à seguinte relação:

$$R_S = R_L \left(\frac{U}{P_L^{req}} \sqrt{\frac{P_L^{req}}{R_L}} - 1 \right) \quad (2.41)$$

onde P_L^{req} é a potência em watt requerida pelo projeto, R_L a resistência do filamento da lâmpada e U a tensão de linha da rede, encontrados na Tabela 2.2 e na Tabela 2.3. A potência total consumida pelo circuito é:

$$P_{total} = I_{op}^2 (R_S + R_L) \quad (2.42)$$

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

Utilizando-se esta solução, além de se conseguir atingir o ponto de operação desejado, a vida útil da lâmpada é aumentada significativamente, como mostra a Figura 2.10, devido à sensibilidade dos filamentos com relação à tensão aplicada.

Um circuito com resistência em paralelo à lâmpada também pode ser utilizado, no entanto, apresenta potência dissipada maior do que o circuito em série. Além disto, o circuito em paralelo reduz somente a corrente de operação da lâmpada, enquanto que a redução da tensão de operação é o fator que aumenta de forma mais significativa a vida útil da lâmpada (Ryer, 1997).

2.6. DEMAIS TIPOS DE LÂMPADAS

Lâmpadas de halogênio são muito semelhantes às lâmpadas incandescentes anteriormente descritas, no entanto, possuem no interior do bulbo de vidro, além de gases inertes, o halogênio [OSRAM, 2005]. O halogênio captura os átomos de tungstênio que evaporam no processo de aquecimento fazendo-os retornar ao filamento e evitando seu depósito no bulbo de vidro. Assim, o fluxo luminoso das lâmpadas halógenas não se deteriora significativamente ao longo de sua vida útil. Conseqüentemente, os bulbos de vidro das lâmpadas halógenas podem ser menores do que aqueles de lâmpadas incandescentes comuns, chegando a dimensões da ordem de até 30 mm de comprimento por 10 mm de largura. Ainda assim, proporcionam uma luz mais branca e brilhante com vida útil entre 2000 e 3000 horas. Na maioria dos modelos, possuem emissão direcionada por espelhos dicróticos, com propriedades seletivas que refletem a luz visível para o plano de trabalho e transmitem a parcela de infravermelho para o teto, evitando assim o aquecimento excessivo do ambiente.

Por sua vez, as lâmpadas fluorescentes [IESNA, 2000] fornecem iluminação através do fenômeno de luminescência seguido do fenômeno denominado fluorescência. Por esse processo, um elétron livre emitido pelo cátodo colide com um dos dois elétrons livres de valência do mercúrio, componente do meio gasoso entre o cátodo e o ânodo. Uma vez excitado, o átomo de mercúrio tem seu nível de energia aumentado. O elétron livre perde velocidade no impacto e muda de direção, mas continua ao longo do tubo para excitar ou ionizar outros átomos antes de

esgotar sua energia. Este geralmente termina na parede do tubo onde se recombina com um átomo ionizado. Alguns destes são também coletados no ânodo. O elétron livre ganha energia do campo elétrico para então manter a descarga luminosa ao longo do tubo. Rapidamente o elétron de valência retorna ao seu nível normal de energia em uma transição de um ou vários passos. A cada passo, fótons são emitidos dando fim ao ciclo do fenômeno de luminescência. A radiação ultravioleta resultante da luminescência do vapor de mercúrio é convertida em luz pelo revestimento de fósforo por fluorescência, conforme Figura 2.12.

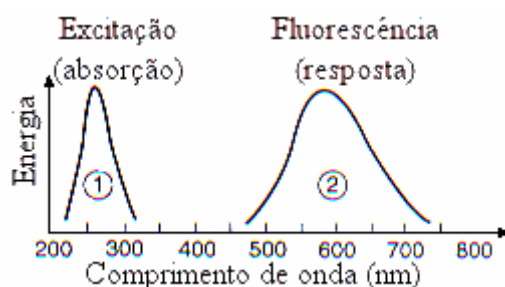


Figura 2.12 Fluorescência do fósforo. Fonte: IESNA, 2000.

Ativadores químicos podem ser utilizados juntamente ao fósforo de modo a proporcionar uma diversidade de efeitos de cores na fluorescência. Entre os diversos tipos de lâmpadas fluorescentes, as duas mais utilizadas recebem o nome de “luz do dia” e “luz branca” (*Daylight* e *Cool White*). A primeira possui emissão mais concentrada em comprimentos de onda menores, dando uma tonalidade amarelada à luz. A segunda responde com emissão bem distribuída em toda faixa visível, conferindo-lhe tonalidade branca. Além destas, na Figura 2.13 é apresentado o comportamento espectral da lâmpada denominada *Warm White*, que possui emissão deslocada para comprimentos de onda maiores, conferindo-lhe a característica de calor e conforto. Este efeito de composição de cores, conseguido através dos ativadores, caracteriza uma grande vantagem deste tipo de lâmpadas, além do fato de possuírem alto rendimento luminoso e longo tempo de vida.

Por outro lado, devido à natureza de geração de energia luminosa, as lâmpadas fluorescentes apresentam um comportamento cintilante ou estroboscópico. Segundo Grandjean, 1998, há nestas lâmpadas uma cintilação invisível e uma visível. A referência afirma que esta última é muito incômoda e provoca forte fadiga nos olhos com importantes perturbações; além disso, cita pesquisas que concluem claramente que lâmpadas fluorescentes com alta modulação (baixa frequência) produzem aumento considerável na incidência de dores de cabeça nos trabalhadores de um escritório. A referência cita, ainda, uma técnica para reduzir o efeito cintilante através do uso de luminárias triplas na qual cada lâmpada fluorescente é ligada em uma fase diferente da rede.

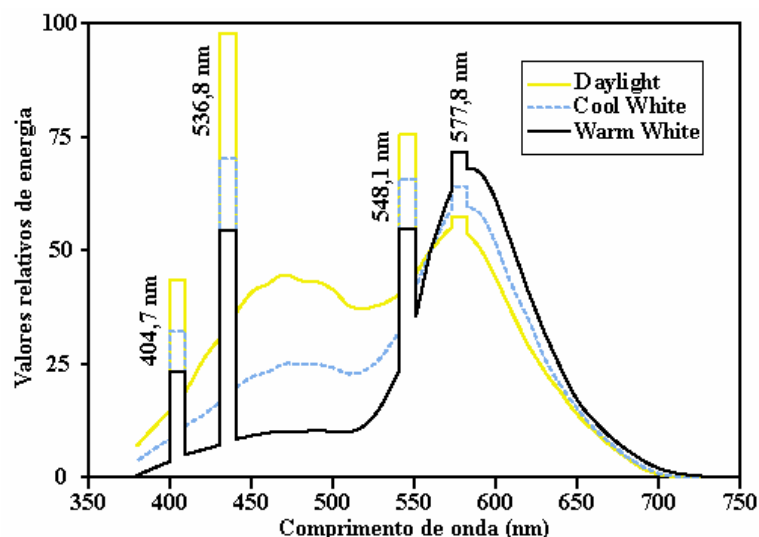


Figura 2.13 Emissão espectral para 3 tipos de lâmpadas fluorescentes. Fonte: Ryer, 1997.

Da maneira semelhante ao apresentado na seção anterior para lâmpadas incandescentes, é de interesse em trabalhos futuros que sejam apresentadas modelagens para lâmpadas fluorescentes. No entanto, dificuldades podem ser encontradas quanto ao ajuste de potência desejada destas lâmpadas. Deve ser estudado o comportamento destas lâmpadas sob diferentes condições de operação para poder estabelecer um modelo que o represente.

2.7. APLICAÇÕES DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

Vera *et al.*, 2006, descrevem a utilização de iluminação artificial para o ensaio de painéis solares fotovoltaicos, onde a uniformidade temporal e espacial da iluminação é importante para a obtenção de resultados adequados. Luz artificial é também amplamente utilizada na medicina para o tratamento de doenças da pele. Além destas aplicações, a iluminação artificial é aplicada para a iluminação de ambientes, postos de trabalho e viveiros de plantas. As condições de luminamento ideais para as diferentes situações de projetos comumente encontradas são apresentadas a seguir.

2.7.1. Seres Humanos

A fonte oficial de níveis de iluminação adequados para diferentes atividades é a norma NBR5413 (ABNT, 1992) que já foi utilizada como referência para a Norma de Regulamentação de Segurança do Ministério do Trabalho, de cunho compulsório. Por ser uma norma, sua utilização é de uso voluntário, entretanto, fornece informações confiáveis para o êxito de projetos de iluminação, tais como o luminamento adequado para o exercício de diferentes atividades (Tabela 2.4).

O luminamento sugerido pela norma NBR5413 apresenta um valor mínimo, médio e máximo para cada atividade. Para melhor situar a iluminação adequada neste intervalo, a norma apresenta algumas considerações mais específicas sobre as atividades e ainda demonstra uma metodologia na qual pondera fatores como idade do observador, velocidade e precisão requeridas para a tarefa e ainda a refletância da superfície ao fundo do campo de visão.

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 um luminamento mais intenso que o normalmente exigido [Phillips, 1981].

Tabela 2.4 Luminamento por classe de tarefas visuais da NBR 5413. FONTE: ABNT, 1992.

Classe	Luminamento (lx)	Tipo de Atividade
	20 – 30 – 50	Área pública com arredores escuros.
A		
Iluminação geral para áreas usadas interruptamente ou com tarefas visuais simples.	50 – 75 – 100	Orientação simples para permanência curta.
	100 – 150 – 200	Recintos não usados para trabalho contínuo, depósitos.
	200 – 300 – 500	Tarefas com requisitos visuais limitados, trabalho bruto de maquinaria, auditório.
B		
Iluminação geral para área de trabalho.	500 – 750 – 1000	Tarefas com requisitos visuais normais, trabalho médio de maquinaria, escritórios.
	1000 – 1500 – 2000	Tarefas com requisitos especiais, gravação manual, inspeção, indústria de roupas.
C		
Iluminação adicional para tarefas visuais difíceis.	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.

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

De acordo com Moraes e Pequini, 2000, o luminamento considerado ideal para postos de trabalho de digitadores em terminais informatizados é 500 lx. Grandjean, 1998, cita um levantamento realizado com operadores de microcomputadores que podiam regular a intensidade de iluminação do seu ambiente de trabalho, cujo resultado indicou preferência pelos níveis mais baixos, compreendidos entre 322 lx e 241 lx.

Segundo Iida, 1990, o rendimento das tarefas visuais tende a crescer com o logaritmo do luminamento, a partir de 10 lx até cerca de 1000 lx, enquanto que a fadiga visual se reduz. A partir deste ponto, o aumento do luminamento não provoca melhora considerável no rendimento, enquanto que a fadiga visual começa a aumentar. Grandjean, 1998, apresenta resultados estatísticos que demonstram insatisfação de trabalhadores de um escritório submetidos a intensidades de luminamento superiores a 1000 lx. Por este motivo Iida, 1990, recomenda o valor de 2000 lx como limite máximo de luminamento e, excepcionalmente, valores de 3000 lx para tarefas de montagem ou inspeção.

Além do nível de luminamento outros fatores são constantemente citados pelas referências como de importância decisiva para o conforto visual [Iida, 1990; Grandjean, 1998; IESNA, 2000], tais como ofuscamento, uniformidade espacial e uniformidade temporal. Vera *et al.*, 2006, propõem um método para analisar a uniformidade espacial de iluminação por meio de fotografias digitais.

O planejamento adequado do uso de cores e contraste pode ter efeito sobre a produtividade em determinada atividade devido às características psicológicas e simbólicas das cores. Segundo Iida, 1990, a pintura de uma forjaria em azul proporciona uma sensação de frescor, apesar do calor reinante. Da mesma forma, a sensação de frio em vestiários pode ser reduzida com o uso racional de cores quentes como o amarelo e o vermelho.

2.7.2. Plantas

As plantas fazem uso da luz para fins diferentes daqueles utilizados pelos seres humanos, conseqüentemente desenvolveram uma sensibilidade diferente. As plantas, através da clorofila, utilizam a energia luminosa para converter o dióxido de carbono mais água em carboidratos, em um processo denominado fotossíntese. É basicamente um processo de transformação de energia radiante em energia química, com o fim de produzir o alimento fundamental do vegetal. O processo complementar da fotossíntese é a respiração, que ocorre de maneira ininterrupta, independentemente de iluminação. Na respiração, a planta oxida os carboidratos produzidos na fotossíntese que se convertem em dióxido de carbono, água e energia. Em níveis adequados de irradiação, a fotossíntese prevalece sobre a respiração, de modo que as células vegetais passam a

armazenar carboidrato. Caso os níveis de irradiação sejam reduzidos, chega-se a um ponto em que a quantidade de carboidratos produzidos é igual àquele consumido na respiração, denominado ponto de compensação. Plantas iluminadas próximo ao ponto de compensação não sobrevivem por um longo período, caracterizando-se, pois, a iluminação, como um fator primordial em ambientes de cultivo.

Todos os aspectos relacionados ao ciclo de vida da planta são dependentes da incidência luminosa, como a germinação, florescência, frutificação, movimento, forma, entre outros aspectos. Níveis regulares de iluminação são importantes para que as plantas não se deformem em busca de níveis mais adequados de iluminação. Não obstante a importância da iluminação, outros fatores devem estar presentes para proporcionar um crescimento acelerado de vegetais, tais como água, nutrientes, temperatura e dióxido de carbono.

A iluminação artificial de plantas pode ser utilizada com dois propósitos: fotossíntese e fotoperiodismo. Para a fotossíntese, a luz é utilizada para prover as condições de alimentação da planta de acordo com o crescimento desejado, enquanto que para o fotoperiodismo, a luz é utilizada para manter a iluminação durante o tempo necessário para se atingir determinadas condições de florescência. De modo geral, os níveis de iluminação para fotossíntese são de 10 a 100 vezes maiores do que aqueles demandados para o fotoperiodismo.

Para a iluminação fotossintética para cultivo com propósitos comerciais ou de pesquisa são comumente utilizados ambientes fechados nos quais a iluminação é obtida somente por meio de lâmpadas. As condições ambientais são controladas e, para se obter um luminamento adequado na superfície das plantas, é sugerido o uso de lâmpadas fluorescentes levemente afastadas e instaladas sob um teto branco. Entre as lâmpadas fluorescentes, são instaladas lâmpadas incandescentes de 60 W ou 100 W. O calor gerado pelas lâmpadas deve ser exaurido.

A iluminação fotoperiódica é largamente utilizada para controlar a florescência fora de época. Durante o inverno é essencial estender ou reduzir o período diurno, de acordo com o tipo de planta que se deseja abrir em flor. A Tabela 2.5 indica os níveis de luminamento desejáveis para manutenção de plantas usualmente utilizadas como adorno.

Segundo Lorenzi e Souza, 1999, as plantas ornamentais têm preferências diferentes com relação à luminosidade proporcionada pelo sol. As espécies que não suportam sombra perdem vigor, tornam-se esguias e não florescem ou florescem pobremente. As que não suportam sol têm o crescimento reduzido e a folhagem queimada ou descorada. Entre as plantas floríferas e as de folhagem existem tanto aquelas que prosperam bem a pleno sol como à meia sombra. Há necessidade, portanto, de conhecê-las e localizá-las acertadamente nos canteiros, jardineiras ou floreiras. A luz difusa de terraços em interiores permite certa elasticidade no uso de plantas

decorativas. Entretanto, interiores escuros limitam decisivamente o desenvolvimento das plantas, visto não haver plantas que resistam a ambientes escuros.

Tabela 2.5 Luminamento recomendado para plantas em um período de 14 horas por dia.
FONTE: IESNA, 2000 e Lorenzi e Souza, 1999.

Espécie		Luminamento (lx)	Observação
Nome popular	Nome científico		
Cheflera	<i>Brassaia actinophylla</i>	750 - 2000	
Palmeira-bambú	<i>Chamaedorea elegans</i>	250 - 750	Plantas de 0,6 até 1,8m de altura
Palmeira-moinho-de-vento	<i>Chamaerops humilis</i>	superior a 2000	
Araucária	<i>Araucaria excelsa</i>	superior a 2000	Árvore de 1,5 até 3m de altura
Maranta-pena-de-pavão	<i>Maranta leuconera</i>	750 - 2000	
Cipó-uva	<i>Cissus rhombifolia</i>	750 - 2000	Plantas de mesa
Café-de-salão	<i>Aglonema commutatum</i>	250 - 750	

Hewitt, 1966, faz uma extensa revisão bibliográfica de trabalhos relacionados à iluminação de vegetais e os efeitos fisiológicos decorrentes.

2.8. ESTADO DA ARTE DOS MÉTODOS PARA PROJETO DE ILUMINAÇÃO

O método apresentado por IESNA, 2000, para o cálculo do fluxo luminoso em interiores é muito semelhante ao apresentado por Phillips, 1981, e também por OSRAM, 2005. O método Lúmen é uma forma prática de se calcular rapidamente uma configuração de luminárias para atender às restrições de projeto. No entanto, não há como assegurar que a configuração encontrada gera o fluxo luminoso correto no plano de trabalho ou que haja uniformidade deste fluxo ao longo do plano de trabalho.

O método Lúmen 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. Para tal, é necessário definir as variáveis de projeto mostradas na Tabela 2.6.

De posse dos requisitos de projeto, tem-se que o fluxo luminoso planejado para o plano de trabalho é descrito por:

$$q^{+(l)} = q^{(l)} \cdot A \quad (2.43)$$

Tabela 2.6 Variáveis de projeto para o método Lúmen.

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}
Luminamento planejado	$q^{(l)}$

No entanto, não se pode afirmar que um conjunto de lâmpadas que emitam $q^{+(l)}$ atendam ao luminamento planejado pois há diversos fatores de perda envolvidos. Primeiramente se considera a perda por meio das absorções de radiação luminosa que ocorrem nas paredes do ambiente, que no método Lúmen é corrigida pelo fator de utilização (η). Para determiná-lo, utiliza-se o chamado índice do recinto (κ), que é definido como:

$$\kappa = \frac{X \cdot Y}{Z(X + Y)} \quad (2.44)$$

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.

As condições de manutenção a que as lâmpadas, luminárias e as paredes estão sujeitas também contribuem para reduzir o luminamento. A poeira pode prejudicar significativamente a reflexão nas superfícies bem como tornar o bulbo das lâmpadas opaco. Além disso, como visto nas seções anteriores, o bulbo das lâmpadas de filamento também se torna opaco pelo depósito de tungstênio. Enfim, são diversos os itens que constituem o fator de depreciação (Π) que, por não ser tabelado, deve ser estimado com base na experiência do projetista. Em Phillips, 1981, encontra-se uma tabela para o fator de depreciação com os valores 0,8, 0,7 e 0,6 para recintos limpos, médios e sujos, respectivamente. Para OSRAM, 2005, o fator de depreciação igual a 1,25 pode ser utilizado em ambiente salubre e com boa manutenção, isto é, em caso de queima a lâmpada é trocada imediatamente e a limpeza das luminárias é feita a cada 6 meses. Com esses dados, o luminamento do teto deve ser:

$$q_{\text{teto}}^{(l)} = \frac{q^{(l)}}{\eta \cdot \Pi} \quad (2.45)$$

valor a ser atendido pelo conjunto de lâmpadas instaladas. Para o cálculo do número de lâmpadas é necessário escolher o modelo de lâmpadas que será utilizado. Dados do fabricante indicam o fluxo luminoso de cada tipo de lâmpada (Φ), como mostrado na Tabela 2.2. Assim, o número de lâmpadas que devem ser utilizadas no projeto é dado por:

$$n = \frac{q_{teto}^{(l)} \cdot A}{\Phi} \quad (2.46)$$

O valor encontrado deve ser ajustado para o mais próximo, para permitir uma distribuição uniforme no teto. As referências recomendam que a distância entre as luminárias seja o dobro da distância entre a mesma e a parede lateral.

Uma forma mais elaborada para cálculo de iluminação de interiores é feita pelo programa WinElux apresentado por EEE, 2002. O programa dispõe de um banco de dados com diversos tipos de lâmpadas que o usuário pode selecionar e então posicioná-las no teto do ambiente. Caso o usuário deseje atingir um luminamento prescrito na superfície de trabalho, o programa efetua um cálculo que dimensiona a quantidade de lâmpadas a ser utilizada através de uma metodologia muito semelhante ao método Lúmen acima descrito. Em um ambiente gráfico amigável ao usuário, o WinElux calcula o luminamento da superfície de trabalho e apresenta os resultados em um gráfico de superfície. Segundo EEE, 2002, o método utilizado pelo programa para cálculo do luminamento é denominado ponto-a-ponto, no qual as superfícies recebem um fator de reflexão de acordo com a cor e textura das superfícies. Com o auxílio do programa WinElux, a tarefa do projetista é bastante simplificada pois a resposta obtida para uma configuração de lâmpadas é imediatamente analisada e modificações podem ser feitas até se atingir as condições desejadas.

3. MÉTODO DAS CAVIDADES RADIANTES - ABORDAGEM DIRETA

O método das cavidades radiantes é utilizado frequentemente no projeto de ambientes onde a radiação é a forma dominante de transferência de calor, senão a única. Este método é comumente empregado devido à simplicidade de sua formulação e solução. Na abordagem direta, assim denominada por França *et al*, 2002, em oposição à abordagem inversa apresentada no Capítulo 4, somente uma condição de contorno para cada superfície é considerada. A solução do problema consiste em determinar a condição de contorno não conhecida.

Esta metodologia é de grande valia quando se deseja verificar o efeito de um grupo de condições de contorno previamente estabelecidas. Neste Capítulo, o método das cavidades radiantes é apresentado bem como a sua solução. Com a finalidade de simplificar a apresentação das equações, neste capítulo será omitido o superíndice (W) junto ao símbolo q , uma vez que todos os fluxos radiantes encontram-se em termos de watt, e não em termos de lux. Ao final do Capítulo são apresentadas as limitações deste método e as vantagens de sua utilização em conjunto com uma análise inversa.

3.1. ABORDAGEM DO PROBLEMA DIRETO

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. Como exemplo pode-se citar o método de Monte Carlo [Siegel e Howell, 2002], desenvolvido de modo a acompanhar a trajetória de pacotes de energia emitidos pelas fontes, até sua completa extinção. Segundo este método, as propriedades das paredes são tratadas como distribuições probabilísticas às quais cada pacote de energia estaria sujeito. Esta metodologia estocástica é extremamente flexível às configurações e propriedades das superfícies. Por outro lado se mostra consideravelmente pesada em termos computacionais, uma vez que um vasto número de pacotes de energia deve ser considerado até a convergência da solução.

O método das radiosidades para cavidades radiantes é, provavelmente, o método mais amplamente 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.

Neste problema, a cavidade é modelada de acordo com as seguintes hipóteses:

1. superfícies são finitas;
2. a temperatura é uniforme em cada superfície;

3. superfícies são difusas ($\epsilon_{\lambda,\theta} = \epsilon_\lambda$ e $\alpha_{\lambda,\theta} = \alpha_\lambda$);
4. superfícies são opacas ($\tau = 0$ | $\alpha = 1 - \rho$);
5. superfícies são não-cinzas, com emissividade e absortividade constantes em cada banda bn ($\epsilon_\lambda = \epsilon_{bn}$ e $\alpha_\lambda = \alpha_{bn}$);
6. toda energia incidente, emitida e refletida é uniforme em cada superfície;
7. regime estacionário;
8. meio não-participante.

Em problemas reais, as superfícies possuem condições, fluxo de calor e temperatura, que variam continuamente ao longo do domínio. No entanto, a discretização do domínio é implementada para possibilitar a solução por métodos numéricos, dividindo as superfícies em diversos elementos de área. Testes de independência de malha devem ser conduzidos para garantir que a mesma não exerce influência significativa na solução obtida. Na mesma medida, a discretização do espectro eletromagnético deve ser feita, dividindo o mesmo em bandas, conforme hipótese 5.

Como consequência da hipótese 3, tem-se que o conceito de fator de forma, apresentado na Seção 2.2, é aplicável. Como a geometria da cavidade é previamente conhecida, os fatores de forma entre os elementos de área podem ser determinados.

Pela hipótese 4 e 5, pode-se estabelecer a relação da Eq.(2.18), deduzida da lei de Kirchhoff, que indicando que a emissividade é igual à absortividade em cada banda do espectro, independentemente da direção considerada. Logo, a hipótese 4 pode ser escrita para um dada banda da seguinte forma:

$$\rho = (1 - \epsilon) \quad (3.1)$$

A apresentação da refletividade em uma relação com a emissividade pode, eventualmente, parecer inadequada, uma vez que o senso físico leva a relacionar a refletividade com a absortividade, como é feito na hipótese 4. No entanto, sempre que o termo $(1 - \epsilon)$ for encontrado no equacionamento, deve-se recordar que nele está embutida a lei de Kirchhoff, o que o mesmo nada mais é que a própria refletividade ρ . Esta transformação é feita com o intuito simplificar o equacionamento, trabalhando em termos de uma única propriedade de superfície que seja capaz de representar as demais.

É importante ressaltar a restrição adicionada na hipótese 8, já que nos casos em que o meio deva ser considerado participante, o equacionamento apresentado neste capítulo não pode ser aplicado.

O método das radiosidades utiliza unicamente relações de balanço energético em termos das radiosidades (q_o) dos elementos de área. Cada elemento emite radiação e também absorve a radiação proveniente das demais superfícies em proporções que dependem de propriedades, geometria e posição relativa entre as mesmas. Uma superfície possui duas condições térmicas independentes: fluxo líquido e temperatura. Por este motivo, é necessário chegar a duas equações de balanço para equacionar a superfície. A Figura 3.1 apresenta duas abordagens de balanço energético em um elemento de área.

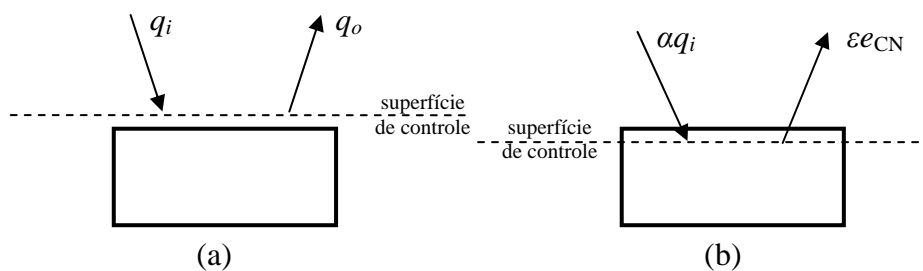


Figura 3.1 Abordagens de balanço energético em uma superfície.

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 3.1.a. Considerando-se a convenção de que a energia que sai de uma superfície é positiva, tem-se:

$$q_r = q_o - q_i \quad (3.2)$$

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

$$q_{i,k} = \sum_{j=1}^{\iota} F_{kj} q_{o,j} \quad (3.3)$$

onde F_{kj} é o fator de forma de k para j . No somatório, j assume valores que representam todas as superfícies da cavidade, em que ι indica o número total de superfícies. Substituindo na Eq.(3.2) e rearranjando obtém-se a seguinte relação para radiosidade:

$$q_o = q_r + \sum_{j=1}^{\iota} F_{kj} q_{o,j} \quad (3.4)$$

Em superfícies com temperatura prescrita, a outra abordagem de um balanço na superfície de controle (Figura 3.1.b) é utilizada. Assim, o fluxo líquido de calor é:

$$q_r = \varepsilon e_{CN} - \alpha q_i \quad (3.5)$$

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 a absorptividade total hemisférica da superfície. Pela relação existente entre emissividade e absorptividade, como descrito anteriormente, pode-se reescrever a equação acima da seguinte forma:

$$q_r = \varepsilon (e_{CN} - q_i) \quad (3.6)$$

No intuito de chegar a uma relação em termos de radiosidade, combina-se a equação acima com as Eqs.(3.2) e (3.3), chegando em:

$$q_o = \varepsilon e_{CN} + (1 - \varepsilon) \sum_{j=1}^l F_{kj} q_{o,j} \quad (3.7)$$

As Eqs.(3.4) e (3.7) são as relações básicas de balanço radiante em termos da radiosidade de uma superfície. Tendo a superfície em questão propriedades radiantes variáveis ao longo do espectro, de acordo com a hipótese 5 é possível reescrever aquelas relações, resultando em:

$$q_{o,bn} = q_{r,bn} + \sum_{j=1}^l F_{kj} q_{o,j,bn} \quad (3.8)$$

$$q_{o,bn} = \varepsilon_{bn} e_{CN,bn} + (1 - \varepsilon_{bn}) \sum_{j=1}^l F_{kj} q_{o,j,bn} \quad (3.9)$$

onde

$$e_{CN,bn} = \int_{\lambda_{bni}}^{\lambda_{bnf}} e_{\lambda,CN} d\lambda \quad (3.10)$$

em que λ_{bni} e λ_{bnf} são os comprimentos de onda que marcam respectivamente o início e o fim da banda bn .

3.2. ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

Escreve-se uma equação de radiosidade para cada superfície, isto é, a Eq.(3.8) ou a Eq.(3.9), quando esta possuir fluxo prescrito ou temperatura prescrita, respectivamente. Com isto, chega-se a um sistema linear de M equações e M incógnitas para cada banda, onde M é o

número de superfícies discretas do domínio. Repete-se esta operação para cada banda do espectro considerada, em que o sistema de equações de cada banda é desacoplado em relação aos sistemas das demais bandas. Para cada banda, chega-se a um sistema do tipo:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (3.11)$$

onde \mathbf{x} é o vetor das radiosidades a ser calculado, \mathbf{A} é uma matriz de dimensão $M \times M$ e o vetor \mathbf{b} guarda a informação da condição prescrita. A forma geral da matriz \mathbf{A} é:

$$\begin{bmatrix} 1 & (\varepsilon_1 - 1)F_{12} & \cdots & (\varepsilon_1 - 1)F_{1(M-1)} & (\varepsilon_1 - 1)F_{1M} \\ (\varepsilon_2 - 1)F_{21} & 1 & \cdots & (\varepsilon_2 - 1)F_{2(M-1)} & (\varepsilon_2 - 1)F_{2M} \\ \vdots & \vdots & 1 & \vdots & \vdots \\ -F_{(M-1)1} & -F_{(M-1)2} & \cdots & 1 & -F_{(M-1)M} \\ -F_{M1} & -F_{M2} & \cdots & -F_{M(M-1)} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{o1} \\ q_{o2} \\ \vdots \\ q_{o(M-1)} \\ q_{oM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 e_{1,CN} \\ \varepsilon_2 e_{2,CN} \\ \vdots \\ q_{r(M-1)} \\ q_{r1M} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

onde as primeiras linhas referem-se a elementos com temperatura prescrita enquanto as últimas referem-se a elementos com fluxo líquido prescrito.

Antes de se tentar solucionar este sistema linear, primeiramente se procura saber sob quais condições existe solução. Segundo Barroso *et al*, 1983, um modo de classificar o sistema de equações é através do cálculo do seu determinante normalizado, dado por:

$$\det(\mathbf{NormA}) = \frac{\det(\mathbf{A})}{\beta_1 \beta_2 \cdots \beta_M} \quad (3.13)$$

onde $\beta_k = \sqrt{a_{k1}^2 + a_{k2}^2 + \cdots + a_{kM}^2}$, para $k=1,2,\dots,M$. Sendo que:

$$|\det(\mathbf{NormA})| \leq 1 \quad (3.14)$$

Esta referência cita que, sendo o determinante normalizado da matriz \mathbf{A} maior do que 10^{-2} , o sistema da Eq.(3.12) é possível e determinado. Abaixo deste valor, tal sistema começa a apresentar sinais de mal-condicionamento e atenção deve ser dispensada nestes casos.

Para exemplificar, considera-se uma única banda de uma cavidade formada por 3 superfícies. Quando todas as três superfícies possuem condição de temperatura prescrita, a matriz \mathbf{A} resultante possui o seguinte formato:

$$\begin{bmatrix} 1 & (\varepsilon_1 - 1)F_{12} & (\varepsilon_1 - 1)F_{13} \\ (\varepsilon_2 - 1)F_{21} & 1 & (\varepsilon_2 - 1)F_{23} \\ (\varepsilon_3 - 1)F_{31} & (\varepsilon_3 - 1)F_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

e o vetor \mathbf{b} correspondente é:

$$\left[\epsilon_1 e_{1,CN} \quad \epsilon_2 e_{2,CN} \quad \epsilon_3 e_{3,CN} \right]^T$$

Arbitrando alguns valores típicos para emissividades de superfícies e temperaturas, pode-se chegar em valores numéricos para \mathbf{A} e \mathbf{b} e com isso calcular o seu determinante normalizado. Resultados mostram que os valores típicos de determinantes normalizados para estes casos ficam acima de 0,5, geralmente em torno de 0,8. Os planos que satisfazem cada equação estão dispostos como mostra a Figura 3.2, onde o ponto escuro na intersecção dos planos evidencia a localização do ponto de solução do sistema.

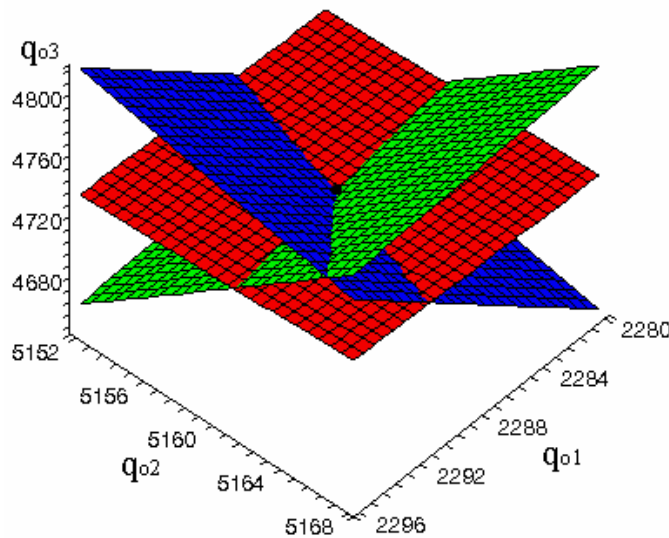


Figura 3.2 Planos de um sistema bem condicionado 3×3 com determinante normalizado igual a 0,8.

No caso em que todas superfícies da mesma cavidade anteriormente considerada possuem condição de fluxo prescrito, a matriz fica:

$$\begin{bmatrix} 1 & -F_{12} & -F_{13} \\ -F_{21} & 1 & -F_{23} \\ -F_{31} & -F_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

enquanto que o vetor \mathbf{b} é:

$$\left[q_{r1} \quad q_{r2} \quad q_{r3} \right]^T$$

Pode-se notar nos sistemas das Eqs. (3.15) e (3.16) a dominância da diagonal principal, característica típica de um sistema bem-condicionado.

Mesmo para diferentes cavidades, o determinante normalizado da matriz \mathbf{A} da Eq.(3.16) se mantém em torno de 0,8. Esta fato leva a concluir que os sistemas lineares formados a partir do método das cavidades radiantes são sistemas sempre bem condicionados por características

intrínsecas do método. Por isso, ao utilizar a formulação utilizada neste capítulo, pode-se fazer uso de métodos clássicos para solução do sistema de equações lineares. Barroso *et al*, 1983, descrevem os métodos com número finito de operações, como o de Gauss e de Jordan, além dos métodos iterativos, como Jacobi e Gauss-Seidel. De acordo com Dorn, 1978, os erros de arredondamento de máquina nos métodos finitos conduzem a uma solução que pode conter sérios erros que podem, contudo, ser significativamente reduzidos com o uso de um método iterativo para refino da solução. Para evitar a utilização de duas técnicas de solução, opta-se diretamente pelo uso de um método iterativo para solução do sistema linear. O método de Gauss-Seidel é preferido sobre o método de Jacobi pois, segundo Barroso *et al*, 1983, converge mais rapidamente para a solução. Para o método Gauss-Seidel, tem-se que é condição suficiente para convergência a matriz \mathbf{A} possuir diagonal dominante (Dorn, 1978):

$$|a_{kk}| \geq \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^M |a_{kj}| \quad \text{para } k=1,2,\dots,M$$

Em ambos exemplos citados acima esta condição é atendida levando à conclusão de que o método das cavidades radiantes não são somente bem condicionados como também convergem em metodologias de solução iterativa.

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

$$\mathbf{x}^{(0)} = \begin{bmatrix} x_1^{(0)} & x_2^{(0)} & \dots & x_M^{(0)} \end{bmatrix}$$

Calcula-se, então, a seqüência de aproximações $\mathbf{x}^{(1)}$, $\mathbf{x}^{(2)}$, ..., $\mathbf{x}^{(\gamma)}$, ..., utilizando-se as equações:

$$x_k^{(\gamma+1)} = \frac{1}{a_{kk}} \left(b_{kk} - \sum_{j=1}^{k-1} a_{kj} x_j^{(\gamma+1)} + \sum_{j=k+1}^M a_{kj} x_j^{(\gamma)} \right) \quad (3.17)$$

onde γ representa o número da iteração, até que o critério de convergência seja satisfeito:

$$\max \left| \frac{x_k^{(\gamma+1)} - x_k^{(\gamma)}}{x_k^{(\gamma+1)}} \right| < \zeta \quad (3.18)$$

onde ζ é um valor definido neste trabalho como 10^{-6} .

Uma vez resolvido o sistema de equações em termos das radiosidades, a condição de contorno desconhecida é calculada com a equação de balanço que ainda não fora utilizada, seja esta a Eq.(3.8) ou Eq.(3.9).

Considerando uma cavidade com BN bandas espectrais, a solução deste sistema permite chegar às radiosidades totais das superfícies:

$$q_o = \sum_{bn=1}^{BN} q_{o,bn} \quad (3.19)$$

3.3. LIMITAÇÕES DE APLICAÇÃO

O projeto de iluminação guarda relação direta com o projeto de um forno, o qual será utilizado como exemplo para demonstrar as limitações da abordagem direta. Ao projetar o forno, o projetista deseja dimensionar os aquecedores de modo a se obter condições determinadas para o tratamento térmico de uma peça. O processo de determinação da potência nos aquecedores é esquematizado na Figura 3.3. Previamente, são determinadas a geometria da cavidade, suas dimensões e as propriedades das paredes que a compõem, o que pode ser denominado de pré-projeto. Em seguida, o projetista discretiza as paredes em pequenas superfícies para aplicar métodos numéricos de solução. Algumas destas superfícies representam fontes de calor, os aquecedores, outras representam superfícies que atuam passivamente. Para algumas destas últimas, o projetista deve determinar duas condições de contorno, temperatura e fluxo de calor, necessários no tratamento térmico de uma peça. Tais superfícies com duas condições de contorno são denominadas superfícies de projeto. O projetista deve fazer uso de sua experiência para determinar as condições de contorno das demais superfícies. Em seguida, utiliza apenas uma das condições de contorno das superfícies de projeto, o potência dos aquecedores, para resolver o sistema de equações no método das cavidades radiantes e, ao chegar à solução, verifica se a condição determinada no pré-projeto fora atendida. Caso negativo, o projetista deve ser capaz de determinar novos valores para a potência dos aquecedores para reiniciar o processo. O atendimento da condição desejada pode ser conseguido após exaustivas repetições deste ciclo.

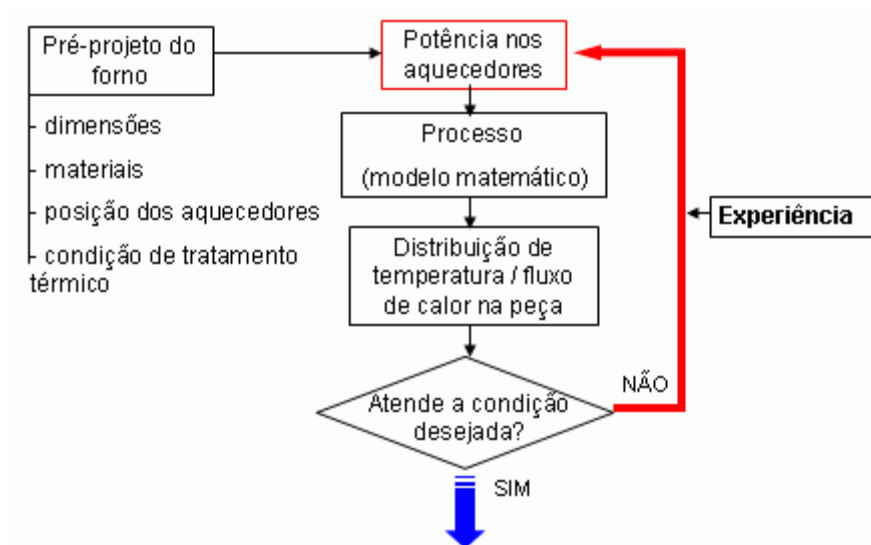


Figura 3.3 Fluxograma do processo direto de cálculo.

França *et al*, 2002, propõe que a metodologia direta das cavidades radiantes pode ser utilizada para verificar o erro do resultado fornecido pela análise inversa, na qual são encontradas as condições de contorno desconhecidas sem necessidade de tentativa e erro.

4. PROBLEMAS INVERSOS

Em situações comuns de projeto, como descrito na Seção 3.3, não se possui um número de condições de contorno suficiente para dimensionar o problema radiante em uma cavidade. Da discretização das superfícies, são criados três tipos de elementos distintos. Os elementos de projeto possuem duas condições de contorno definidas, os elementos de parede com apenas uma condição prescrita e ainda os aquecedores sem qualquer condição de contorno. Logo, de acordo com a metodologia das cavidades riantes do Capítulo 3, não é possível construir o sistema da Eq.(3.12) sem que se faça uso do método da tentativa e erro com sucessivas estimativas.

Com a finalidade de ilustrar as dificuldades associadas à análise inversa, considera-se uma única banda espectral de uma cavidade formada por seis superfícies em forma de cubo. Neste, três faces são elementos de projetos (1, 2 e 3) e as demais faces são elementos fontes (4, 5 e 6). Não havendo elementos de parede e utilizando-se a formulação para radiosidades como apresentada na Seção 3.1, chega-se a dois sistemas lineares do tipo $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$, cuja dedução detalhada é feita no Capítulo 5. No entanto, pode-se adiantar que um destes sistemas é semelhante àquele solucionado na Seção 3.2 enquanto o outro possui $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x}$ na forma:

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

No exemplo proposto, tal matriz \mathbf{A} possui determinante normalizado igual a 7×10^{-7} , isto é, extremamente mal condicionada. Esta é, por sua vez, a característica intrínseca de problemas inversos que será encontrada para qualquer outra configuração proposta. O mal-condicionamento é evidenciado pela tendência ao paralelismo dos planos-solução do sistema, representados na Figura 4.1. Portanto, tem-se que as linhas da Eq.(4.1) formam equações com certa dependência linear entre si.

Como consequência do mal-condicionamento da matriz de coeficientes, o ponto em que os planos da Figura 4.1 se interceptam não pode ser facilmente distinguido, uma vez que os planos se encontram muito próximos ao longo de uma grande região do espaço. Como consequência disto, qualquer vetor de solução \mathbf{x} que se encontre nesta grande região pode ser considerado solução do sistema, a menos de um pequeno erro.

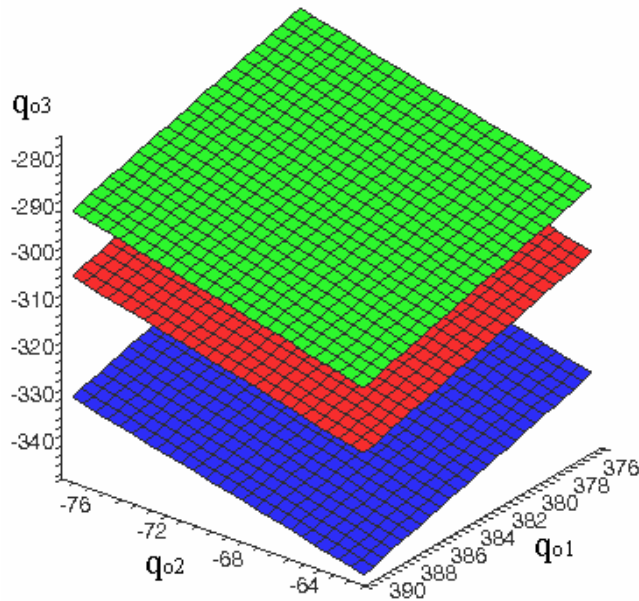


Figura 4.1 Representação geométrica de um sistema mal-condicionado 6×6 com determinante normalizado igual a 7×10^{-7} .

Além disso, frequentemente o número de equações (elementos de projeto) é diferente do número de incógnitas (elementos de aquecedores), o que conduz antecipadamente à inviabilidade de métodos como eliminação gaussiana ou Gauss-Seidel para solucionar este classe de problemas. Problemas inversos requerem métodos numéricos para estabilizar o problema e permitir a escolha de soluções aproximadas, se houver alguma. Estes algoritmos numéricos são denominados de métodos de regularização.

Este capítulo descreve alguns dos métodos de regularização disponíveis, dando especial atenção à decomposição em valores singulares truncada, do inglês *Truncated Singular Value Decomposition* (TSVD). Por estarem os problemas inversos que envolvem radiação térmica fortemente ligados à equação integral de Fredholm de primeira espécie, a solução pela expansão do valor singular, do inglês *Singular Value Expansion* (SVE), é abordada inicialmente, como apresentada em Hansen (1998). Sob muitos aspectos a SVE assemelha-se à TSVD utilizada no problema discretizado, de tal forma que a descrição da SVE permite um bom entendimento das características relacionadas ao sistema de equações mal-condicionado. No capítulo seguinte, a TSVD é utilizada como uma ferramenta que permite evitar a aplicação de métodos empíricos, muito utilizados em cavidades e particularmente em projetos de iluminação.

4.1. EQUAÇÃO INTEGRAL DE FREDHOLM DE PRIMEIRA ESPÉCIE

A equação integral de Fredholm de primeira espécie representa uma relação muito semelhante àquela que comumente se encontra na análise inversa de transferência radiante. Por

este motivo, o estudo de métodos de solução para esta equação integral é interessante neste ponto. Esta equação pode se genericamente expressa por:

$$\int_0^1 K(s,t)f(t)dt = g(s) \quad (4.2)$$

para $0 \leq s \leq 1$. No problema inverso, a função g e o núcleo K são conhecidos, enquanto que a função f deve ser encontrada. Como será visto adiante, em problemas de transferência radiante, a função K representa os fatores de forma.

A Eq.(4.2) pode ser resolvida pelo método da expansão do valor singular (SVE) do núcleo K . Para tal, o quadrado de K deve ser integrável, o que significa afirmar que

$$\|K\|^2 = \int_0^1 \int_0^1 K(s,t)^2 dsdt \quad (4.3)$$

é finito. Se a Eq.(4.3) é satisfeita, então o SVE pode ser aplicado de forma a expressar o núcleo K em termos de uma soma infinita:

$$K(s,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \mu_i u_i(s) v_i(t) \quad (4.4)$$

As funções u_i e v_i são funções singulares de K e são ortonormais entre si com respeito ao produto interno:

$$(u_i \bullet u_j) = (v_i \bullet v_j) = \begin{cases} 1 \rightarrow i = j \\ 0 \rightarrow i \neq j \end{cases} \quad (4.5)$$

onde o produto interno é definido por

$$(u_i \bullet u_j) = \int_0^1 u_i(\xi) u_j(\xi) d\xi \quad (4.6)$$

Os números μ_i , denominados valores singulares de K , são não-negativos.

Sendo as funções u_i e v_i ortonormais, a norma de K é:

$$\|K\| = \sum_{i=1}^{\infty} \mu_i^2 \quad (4.7)$$

Conseqüentemente, os valores singulares μ_i decaem mais rapidamente que $i^{-1/2}$ para que a norma de K seja finita, como requerido anteriormente.

Os parâmetros μ_i , u_i , v_i são únicos para um dado núcleo K . A solução para a função f pode ser expressa em termos da função g e dos parâmetros:

$$f(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(u_i, g)}{\mu_i} v_i(t) \quad (4.8)$$

4.1.1. A condição de Picard

A solução f existe somente se o lado direito da Eq.(4.8) convergir. A condição de Picard garante que para a solução f existir a função g deve satisfazer:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{(u_i, g)}{\mu_i} \right)^2 < \infty \quad (4.9)$$

Esta condição impõe que o valor absoluto do produto interno de u_i e g deve ser menor que $\mu_i t^{-1/2}$ a partir de algum termo do somatório da Eq.(4.9).

Diz-se que a função g pertence à faixa de K quando esta satisfaz à condição de Picard. É claro que nem toda função g levará a Eq.(4.9) à convergência, especialmente quando sabe-se que os coeficientes μ_i decaem mais rapidamente do que $t^{-1/2}$. Na verdade, quanto mais suave for o núcleo K , mais rapidamente os valores singulares decaem a zero, fazendo a condição de Picard ainda mais restritiva. Mesmo que g pertença à faixa de K , uma pequena perturbação em g fará com que a condição de Picard seja violada. É esta instabilidade que faz com que a equação integral seja mal-condicionada.

4.1.2. Regularização

Do exposto acima, a equação integral de Fredholm é muito instável, o que torna necessária a imposição de restrições adicionais para estabilizar o problema e então encontrar uma solução válida e estável, denominada f_r . Este é o propósito dos métodos de regularização. Em geral, a regularização de um problema gera um resíduo associado à solução regularizada, definido como:

$$\rho(f_r) = \left\| \int_0^1 K(s, t) f_r(t) dt - g(s) \right\|_2 \quad (4.10)$$

e então se utiliza um dos quatro métodos:

1. Minimizar $\rho(f_r)$ sob a restrição de que f_r pertence a um conjunto específico de funções;
2. Minimizar a função $\rho(f_r)$ sob a restrição de que o tamanho de f_r , $\omega(f_r)$, seja menor que algum valor específico;
3. Minimizar a função $\omega(f_r)$ para que $\rho(f_r)$ seja menor que um valor especificado;

4. Minimizar uma combinação linear de $\rho(f_r)^2$ e $\omega(f_r)^2$:

$$\min \left[\rho(f_r)^2 + \lambda^2 \omega(f_r)^2 \right],$$

onde λ é um fator de ponderação. Este é o esquema clássico de regularização de Tikhonov.

Todos os quatro métodos buscam encontrar soluções aproximadas de f_r para a Eq.(4.2) quando a função g não pertence à faixa de K , ou quando o problema exato sofre alguma perturbação. Com o fim de evitar que a função f tenha tamanho infinito (o que ocorre sempre que a condição de Picard não é obedecida), é imposta uma restrição no tamanho de $\omega(f_r)$, ao custo de introduzir um resíduo $\rho(f_r)$ à solução. Os diferentes métodos de regularização propõem diferentes formas de ponderar estes dois parâmetros.

4.2. DISCRETIZAÇÃO DO PROBLEMA MAL-CONDICIONADO

A grande maioria dos problemas inversos térmicos é descrita por um sistema de equações que não pode ser resolvido analiticamente, mas sim por meio de discretização numérica, seguida de solução computacional de um sistema de equações algébricas, representado por:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (4.11)$$

Quando um problema mal-condicionado é discretizado, as dificuldades inerentes à solução analítica são eliminadas. Assim como acontece com os valores singulares do núcleo K do problema contínuo, os valores singulares da matriz de coeficientes \mathbf{A} decaem gradativamente a zero. Se uma regularização não é aplicada ao problema, a solução apresenta uma norma muito grande (uma analogia ao problema contínuo, que diverge para uma solução de tamanho infinito), não tendo assim um significado físico ou aplicação prática.

De forma análoga à expansão do núcleo K , a matriz \mathbf{A} pode ser decomposta em uma combinação de matrizes ortogonais e valores singulares, chamada de decomposição em valores singulares (SVD). A SVD tem uma função essencial na solução de problemas mal-condicionados pois permite um rápido diagnóstico do quão mal condicionado é o problema, além do fato de que diversos métodos de regularização são dela derivados.

4.2.1. Decomposição em valores singulares (SVD) da matriz de coeficientes

Conforme descrito por Hansen (1998), a matriz $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{M \times N}$ (onde M e N não são necessariamente iguais) pode ser decomposta conforme:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{\Sigma} \cdot \mathbf{V}^T \quad (4.12)$$

onde Σ é uma matriz diagonal da mesma dimensão de \mathbf{A} formada pelos valores singulares σ_i da matriz \mathbf{A} . Os valores singulares são números não-negativos e ordenados de forma que $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_N \geq 0$. As matrizes $\mathbf{U} = (\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_M) \in \mathbf{R}^{M \times M}$, e $\mathbf{V} = (\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_N) \in \mathbf{R}^{N \times N}$ são ortonormais. Isto significa que os vetores colunas \mathbf{u}_i e \mathbf{v}_i (também denominados vetores singulares de \mathbf{A}) formam uma base ortogonal, onde o produto interno é:

$$(\mathbf{u}_i \bullet \mathbf{u}_j) = (\mathbf{v}_i \bullet \mathbf{v}_j) = \begin{cases} 1 \rightarrow i = j \\ 0 \rightarrow i \neq j \end{cases} \quad (4.13)$$

Conseqüentemente tem-se que

$$\mathbf{U}^T \mathbf{U} = \mathbf{V}^T \mathbf{V} = \mathbf{I} \quad (4.14)$$

A SVD é semelhante à decomposição em autovalores da matriz simétrica $\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^T = \mathbf{U} \cdot \Sigma^2 \cdot \mathbf{V}^T$ e $\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} = \mathbf{V} \cdot \Sigma^2 \cdot \mathbf{U}^T$. Isto é, o quadrado dos valores singulares de \mathbf{A} correspondem aos autovalores de $\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^T$ ou $\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}$. Como será visto adiante, isto relaciona a SVD ao método do gradiente conjugado CG.

Uma aplicação imediata da decomposição em valores singulares é a determinação da matriz pseudo-inversa de \mathbf{A} pela simples operação de \mathbf{U} , Σ e \mathbf{V} , tal que:

$$\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{V} \cdot \Sigma^{-1} \cdot \mathbf{U}^T \quad (4.15)$$

onde Σ^{-1} é a matriz diagonal cujos elementos são $1/\sigma_i$. A solução da Eq.(4.11) fica

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{b} = \mathbf{V} \cdot \Sigma^{-1} \cdot \mathbf{U}^T \cdot \mathbf{b} \quad (4.16)$$

o que é equivalente a

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^N \frac{\mathbf{u}_i^T \cdot \mathbf{b}}{\sigma_i} \mathbf{v}_i \quad (4.17)$$

Como visto, a solução do vetor \mathbf{x} corresponde à combinação linear dos vetores \mathbf{v}_i onde os coeficientes são dados por $\mathbf{u}_i^T \cdot \mathbf{b} / \sigma_i$.

A análise dos valores singulares σ_i permite um diagnóstico preciso da causa do mal-condicionamento da matriz \mathbf{A} :

- Posto deficiente: neste caso há uma descontinuidade abrupta muito bem determinada entre valores singulares, indicando que algumas linhas ou colunas de \mathbf{A} são linearmente dependentes entre si;

- Discretização: o mal-condicionamento ocorre em razão da discretização numérica da equação integral de Fredholm de primeira espécie. Os valores singulares decaem continuamente e não há um intervalo significativo entre estes. Os vetores singulares \mathbf{u}_i e \mathbf{v}_i que correspondem ao menor σ_i tendem a apresentar mudanças de sinal.

As características do problema mal-condicionado discreto são conseqüências do fato da SVD de \mathbf{A} ser intimamente relacionada à SVE do núcleo K . Em muitos casos, os valores singulares de \mathbf{A} , σ_i , são bastante próximos dos valores singulares μ_i de K , enquanto que os vetores singulares \mathbf{u}_i e \mathbf{v}_i de \mathbf{A} podem trazer informações das funções singulares de K .

4.3. MÉTODOS DE REGULARIZAÇÃO

A análise da Eq.(4.17) explica muitas das dificuldades que envolvem sua solução. Na medida em que os valores singulares são muito pequenos, os elementos do vetor \mathbf{x} assumem valores absolutos muito grandes (com alternância de sinal), exceto se o vetor \mathbf{b} se encontrar no domínio de \mathbf{A} (o que significa que $\mathbf{u}_i^T \cdot \mathbf{b}$ decresce mais rapidamente que os valores singulares σ_i). O problema é extremamente instável na medida em que uma pequena perturbação em \mathbf{b} é amplificada pelos altos valores de $1/\sigma_i$. Em alguns casos, os valores singulares podem assumir valores abaixo da precisão do computador ($\sim 10^{-15}$). Caso não haja uma filtragem destes termos, a solução será corrompida, mesmo que \mathbf{b} esteja no domínio de \mathbf{A} .

Os métodos de regularização se propõem a estabilizar a solução a partir da introdução de restrições adicionais ao problema. Esta modificação introduz inevitavelmente um erro à solução, que se torna maior na medida em que o grau estabilização imposto aumenta. Há, portanto, um balanço a ser feito entre estes dois aspectos da solução: estabilidade e resíduo. Os métodos de regularização podem ser divididos em diretos e iterativos. Os métodos diretos são baseados em uma espécie de decomposição, como a SVD. Os métodos iterativos geram um novo vetor solução a cada iteração, onde o número de iterações exerce a função do parâmetro de regularização.

Em seguida, são abordados os métodos de regularização que vêm sendo empregados em projetos inversos. É apresentada em detalhe a decomposição em valores singulares truncada (TSVD) por ser a metodologia utilizada neste trabalho.

4.3.1. Decomposição em valores singulares truncada (TSVD)

A TSVD é um método direto para a solução de problemas mal-condicionados, que deriva diretamente da solução por SVD de problemas singulares. Se o sistema de equações for singular,

então alguns valores singulares da matriz \mathbf{A} serão nulos. Os vetores \mathbf{v}_i que correspondem aos valores singulares σ_i que são nulos formam o espaço nulo de \mathbf{A} , isto é

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{v}_i = 0 \quad (4.18)$$

Os vetores \mathbf{v}_i que correspondem aos valores singulares não-nulos ampliam a faixa de \mathbf{A} . Se o vetor \mathbf{b} se encontrar na faixa de \mathbf{A} (isto é, se \mathbf{b} puder ser obtido por uma combinação linear dos vetores \mathbf{u}_i), então há infinitas soluções \mathbf{x} para o problema, já que qualquer combinação linear de vetores \mathbf{v}_i no espaço nulo de \mathbf{A} pode ser adicionado a \mathbf{x} para formar uma nova solução. A solução da SVD é obtida eliminando-se da combinação linear da Eq.(4.17) os termos relativos aos valores singulares nulos:

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^p \frac{\mathbf{u}_i^T \cdot \mathbf{b}}{\sigma_i} \mathbf{v}_i \quad (4.19)$$

onde $\sigma_{p+1}, \dots, \sigma_N$ são iguais a zero. O vetor \mathbf{x} obtido pela equação acima é aquele que possui a menor norma entre todas as soluções possíveis. Quando o vetor \mathbf{b} não pertence ao domínio de \mathbf{A} , não há solução exata para o problema. Neste caso, a SVD pode ainda ser aplicada para encontrar a solução com desvio mínimo, $\min|\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{b}|$. Infinitos vetores \mathbf{x} atendem a esta condição.

Na solução de problemas mal-condicionados com descontinuidade nos valores singulares, tais valores podem não ser zeros, mas decaem, continuamente ou não, a valores muito baixos. Como discutido anteriormente, as soluções obtidas da Eq.(4.17) tendem a ser muito sensíveis a perturbações e, freqüentemente, os elementos de \mathbf{x} apresentam oscilações abruptas entre grandes valores positivos e negativos, caso os métodos de regularização não sejam aplicados. A regularização TSVD consiste em trocar \mathbf{A} por uma matriz semelhante com posto deficiente. A solução TSVD pode ser conduzida exatamente como a solução SVD de um problema com valores singulares descontínuos, isto é:

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^p \frac{\mathbf{u}_i^T \cdot \mathbf{b}}{\sigma_i} \mathbf{v}_i \quad (4.20)$$

onde $\sigma_{p+1}, \dots, \sigma_N$ são menores que um valor especificado, σ_{min} . A solução TSVD é a solução mínima quadrática do problema de mínimos quadrados $\min|\mathbf{A}_p \cdot \mathbf{x} - \mathbf{b}|$. \mathbf{A}_p é uma matriz com valores singulares descontínuos obtida da Eq.(4.15) quando os menores valores singulares $\sigma_{p+1}, \dots, \sigma_N$ da matriz Σ são substituídos por zeros.

Como qualquer método de regularização, a TSVD busca estabilizar a solução de um problema mal-condicionado, ainda que com isso seja introduzido um resíduo na solução, definido pelo vetor:

$$\mathbf{r} = |\mathbf{A}_p \cdot \mathbf{x} - \mathbf{b}|$$

uma vez que \mathbf{A}_p é diferente de \mathbf{A} . A estabilização é alcançada eliminando-se os termos de alta ordem da relação canônica da Eq.(4.17), que são responsáveis pelas instabilidades do sistema e, algumas vezes, corrompidos por erros computacionais já comentados. O número de valores singulares mantidos na combinação linear da Eq.(4.19), p , é o parâmetro de regularização do método TSVD. Para menores valores de p , ou seja, maiores valores singulares mínimos σ_{min} , o sistema de equações é mais estável, mas o resíduo \mathbf{r} é maior. Logo, a solução TSVD requer um balanço entre p e \mathbf{r} .

Um aspecto importante da TSVD é que esta pode ser aplicada a problemas onde o número de equações e incógnitas são diferentes. Quando o número de equações é menor do que o número de incógnitas ($M < N$), o problema é singular, e há infinitas soluções exatas para o problema. A Eq.(4.20) gera a solução de menor norma, que pode ser adicionada a qualquer combinação linear dos vetores do espaço nulo \mathbf{v}_i para obter todas soluções possíveis. No caso em que o número de equações é maior que o número de incógnitas ($M > N$), a Eq.(4.20) gera a solução \mathbf{x} com mínimo quadrado.

4.3.2. Outros métodos de regularização

O método clássico do gradiente conjugado, do inglês *Conjugated Gradient* (CG), foi originalmente destinado para o caso em que a matriz de coeficientes é positiva, simétrica e definida. Para uma matriz genérica \mathbf{A} , o método também pode ser aplicado multiplicando-se ambos os lados da Eq.(4.11) por \mathbf{A}^T , de modo que a matriz de coeficientes $\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}$ se torne simétrica, positiva e definida.

Para uma computação com precisão infinita, o resíduo do algoritmo CG será exatamente zero após n iterações (sendo n a dimensão da matriz quadrada $\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}$). No problema mal-condicionado, onde os valores singulares decaem a valores muito baixos, a taxa de convergência com precisão de máquina requer bem mais do que n iterações. É comum propor um pré-condicionamento da matriz \mathbf{A} para melhorar a convergência, mas para problemas mal-condicionados não há razões para melhorar o condicionamento de \mathbf{A} , pois a solução assim obtida é afetada pelas instabilidades relacionadas aos termos de alta ordem da SVD. Na verdade, na maioria dos casos, somente algumas iterações são necessárias para atingir a solução inversa desejada. Após isto, a solução se torna muito instável, apresentando grandes oscilações.

Caso a estimativa inicial para o vetor solução seja $\mathbf{x}_0=0$, então a norma do vetor solução, $|\mathbf{x}|$, aumenta com o número de iterações, enquanto a norma do resíduo, $|\mathbf{r}|$ diminui. Este comportamento é essencial para o critério de parada das iterações da regularização CG.

Freqüentemente, o método CG produz, a cada iteração, vetores nos quais os componentes espectrais associados aos maiores autovalores tendem a convergir mais rapidamente do que os demais componentes. Nos problemas mal-condicionados discretos o mesmo comportamento é observado quando o método CG é aplicado à equação normal $\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{b}$. Como os autovalores de $\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}$ são simplesmente σ_i^2 , os elementos da SVD associados aos maiores valores singulares tendem a convergir mais rapidamente que os demais elementos. Portanto, o algoritmo CG possui um efeito regulador que lembra a TSVD.

Hansen (1998) apresentou uma revisão dos métodos de regularização disponíveis para a solução de problemas de posto deficiente e mal-condicionados. Os métodos podem ser divididos em diretos e iterativos. Os métodos de regularização diretos baseiam-se em uma espécie de decomposição canônica, como SVD ou RRQR (*rank-revealing QR decomposition*). Dentre estes métodos estão o TSVD, MTSVD, o Tikhonov clássico e relacionados, o modelo linear regularizado de Gauss-Markov, entre outros que não utilizam a norma euclidiana. A maioria dos métodos iterativos de regularização empregados são baseados no gradiente conjugado, como o CGLS e implementações de Lanczos.

Estudos de projetos inversos em cavidades radiantes [Morales *et al* (1996), Matsumura (1997) e Matsumura *et al* (1998)] utilizaram o método MTSVD (TSVD modificado). Neste método, uma aproximação inicial é obtida calculando-se a solução TSVD para um dado parâmetro p de regularização. A correção desta estimativa inicial é realizada fazendo-se a minimização do problema, onde são introduzidas restrições adicionais, tais como derivada segunda mínima para assegurar maior suavidade. Morales, 1998, também aplicou a regularização de Tikhonov, que propõe a minimização de uma combinação linear da norma euclidiana da solução e do vetor de resíduos, similar ao quarto método de regularização descrito na Seção 4.1, onde o parâmetro de ponderação especificado, λ , é o parâmetro de regularização. A comparação entre os métodos MTSVD e Tikhonov mostra que o primeiro gera soluções com comportamento mais suave.

5. METODOLOGIA DE SOLUÇÃO

Este capítulo tem o objetivo de apresentar uma metodologia para o cálculo de iluminação em um ambiente composto por superfícies não-cinzas. Para uma sala com características previamente definidas e com o posicionamento das lâmpadas determinado, o método se propõe a especificar as condições em que as lâmpadas devem operar de modo a atender uma condição de luminamento prescrita. A descrição do método demonstrará que este é um caso típico de problema inverso, uma vez que algumas superfícies possuem duas condições de contorno, enquanto outras não possuem nenhuma condição de contorno prescrita. Ao modelar as superfícies como não-cinzas, o problema se torna não-linear, de modo que os métodos de solução de problemas mal-condicionados falham pois foram desenvolvidos para sistemas lineares. Assim, uma sistemática é proposta e aplicada para lidar com a não linearidade do problema.

Inicialmente considera-se uma sala retangular com características de cavidade, isto é, o balanço energético nas superfícies que compõem a sala é nulo, indicando que nenhuma energia entra ou sai do sistema, como ocorreria caso, por exemplo, houvesse janelas. Na solução do problema são consideradas três diferentes classes de superfícies, mostradas na Figura 5.1: superfície de projeto (região cinza no piso), lâmpadas (pontos amarelos no teto) e paredes (demais regiões). A superfície de projeto é assim denominada pois sobre a mesma se deseja controlar alguma condição, como o luminamento incidente. As lâmpadas são modeladas como superfícies fonte de radiação luminosa, sendo delimitadas por um elemento de área da malha numérica. Na presente metodologia, as fontes de radiação luminosa são lâmpadas de filamento incandescente com comportamento conforme apresentado na Seção 2.5.

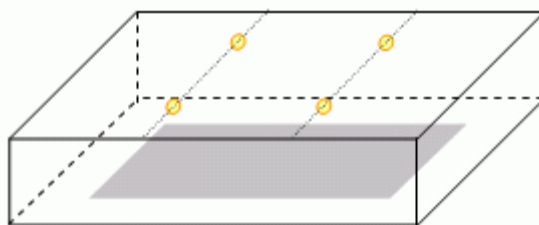


Figura 5.1 A cavidade considerada no problema.

Com exceção das fontes luminosas, as demais superfícies consideradas encontram-se à temperatura ambiente, cerca de 300 K. 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 compõem a sala 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, identificadas por jw , formam as demais superfícies frias da cavidade considerada. Os elementos de lâmpadas, jl , são os locais geométricos no teto da sala onde estão instaladas as lâmpadas. Para estes elementos não há qualquer condição prescrita, seja de temperatura ou fluxo, pois é isto exatamente o que se deseja encontrar com a solução do problema.

As superfícies da cavidade são não-cinzas, para cada uma das quais a emissividade e absortividade hemisféricas espectrais são iguais (superfícies difusas) porém dependentes do comprimento de onda. A modelagem apresentada aqui consiste em dividir o espectro em bandas onde essas propriedades são assumidas uniformes e independentes do comprimento de onda. As superfícies de uma mesma classe apresentam propriedades espectrais idênticas. A divisão do espectro em bandas e comportamento espectral das superfícies não-cinzas pode ser visto na demonstração da Figura 5.2.

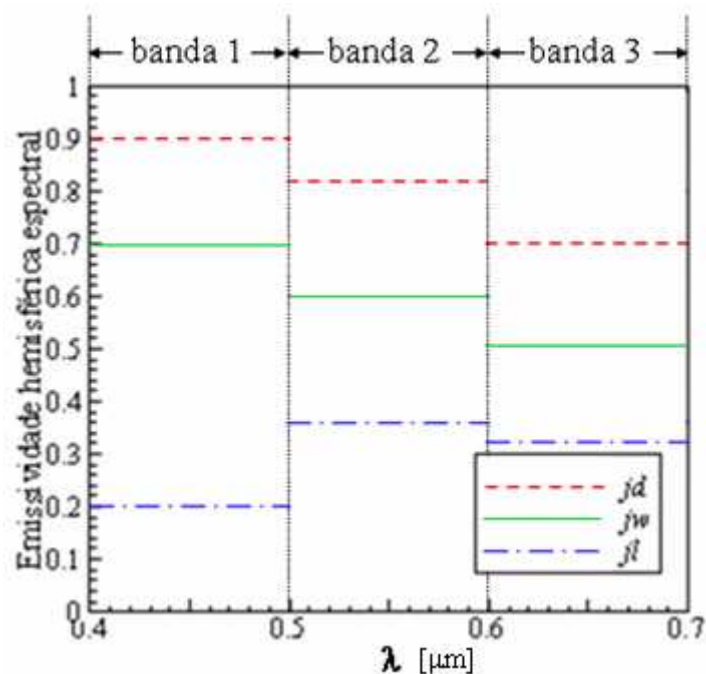


Figura 5.2 Demonstração do comportamento da emissividade para as três classes de superfícies não-cinzas.

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. A condição que se deseja prescrever é a irradiação da superfície de projeto, determinada com base nos dados apresentados na Seção 2.7. Este valor de luminamento prescrito é considerado como referência (q_{ref}), pela qual todos os fluxos serão divididos

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

Entretanto, atenção especial deve ser dispensada ao se utilizar valores adimensionais em operações não-lineares como, por exemplo, na equação de distribuição de Planck, onde há dependência não-linear em relação à temperatura. Nesta situação, como será visto na Seção 5.3, deve-se dimensionalizar as grandezas e adimensioná-las novamente somente após feitas as devidas operações.

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

- superfícies de projeto: poder emissivo nulo em cada banda espectral e luminamento total unitário

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

- superfícies de parede: poder emissivo nulo em cada banda espectral

$$e_{jw,bn}^{(l)} = 0;$$

- superfícies de lâmpada: nenhuma condição de contorno.

O problema descrito é tipicamente um caso de problema inverso, onde o método apresentado no Capítulo 4 pode ser utilizado. Pelos métodos de inversão, o próprio modelo matemático se encarrega de encontrar os fluxos das lâmpadas que atendem à condição prescrita, sem a necessidade de ponderar valores tentativos em séries de simulações. Utilizando, por exemplo, o método TSVD (decomposição em valores singulares truncada) chega-se a uma solução fisicamente consistente pelo truncamento dos valores singulares, em troca de um pequeno desvio da solução em relação ao valor prescrito. De modo a quantificar tal desvio, pode-se, em seguida, aplicar o método das radiosidades e resolver o problema de forma direta, aplicando os fluxos das lâmpadas resultantes do problema inverso, e avaliando o quanto a irradiação no plano de trabalho se aproxima da condição prescrita. Este é o método descrito na Figura 5.3, proposto por Schneider e França (2004) para cavidades cinzas.

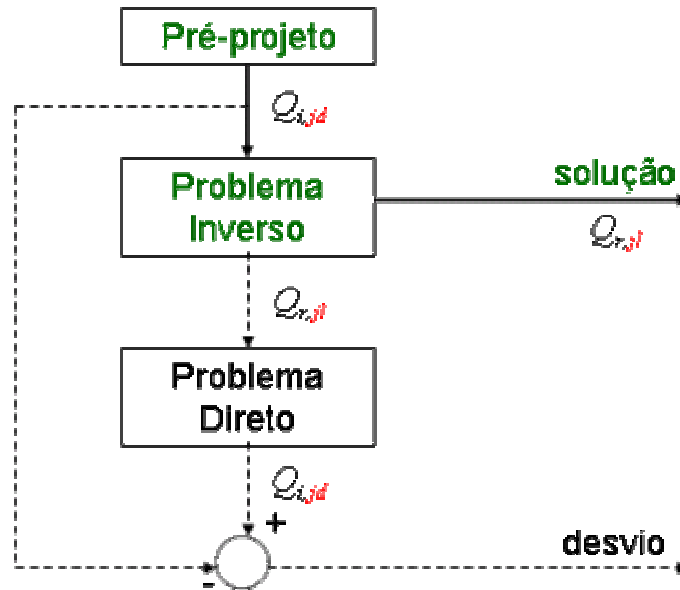


Figura 5.3 Metodologia para cavidades formadas por superfícies cinzas proposta por Schneider e França (2004).

No entanto, para cavidades com característica espectral não-cinza, o problema além de mal-condicionado se torna não-linear. Assim sendo, os métodos matemáticos apresentados falham em encontrar soluções consistentes. Ao se considerar cada banda individualmente, o problema tem comportamento mal-condicionado e linear, para o qual a metodologia acima descrita pode ser utilizada. Porém, ao comparar os resultados obtidos individualmente é verificada uma incompatibilidade entre os mesmos. Isto ocorre pois a solução assim obtida parte de um desacoplamento de cada banda com as demais. Uma superfície pode possuir propriedades com valores diferentes em cada banda, mas sua temperatura deve ser única.

É necessário, então, elaborar um mecanismo para lidar com a não-linearidade, aqui denominado de fechamento do problema, que permita encontrar o fluxo luminoso nas lâmpadas que atende à condição prescrita e que, além disso, calcule a correta distribuição deste fluxo nas bandas, de modo que representem uma única temperatura de superfície. A metodologia proposta para solucionar o problema não-linear mal-condicionado é apresentada na Figura 5.4 e, ao longo das seções seguintes, cada quadro deste fluxograma será detalhado.

Trata-se de um método baseado naquele da Figura 5.3, que, a partir da necessidade de um fechamento, possui um laço iterativo que proporciona o avanço na solução. A proposta desta metodologia é que este avanço na solução seja dado a partir da solução do problema direto.

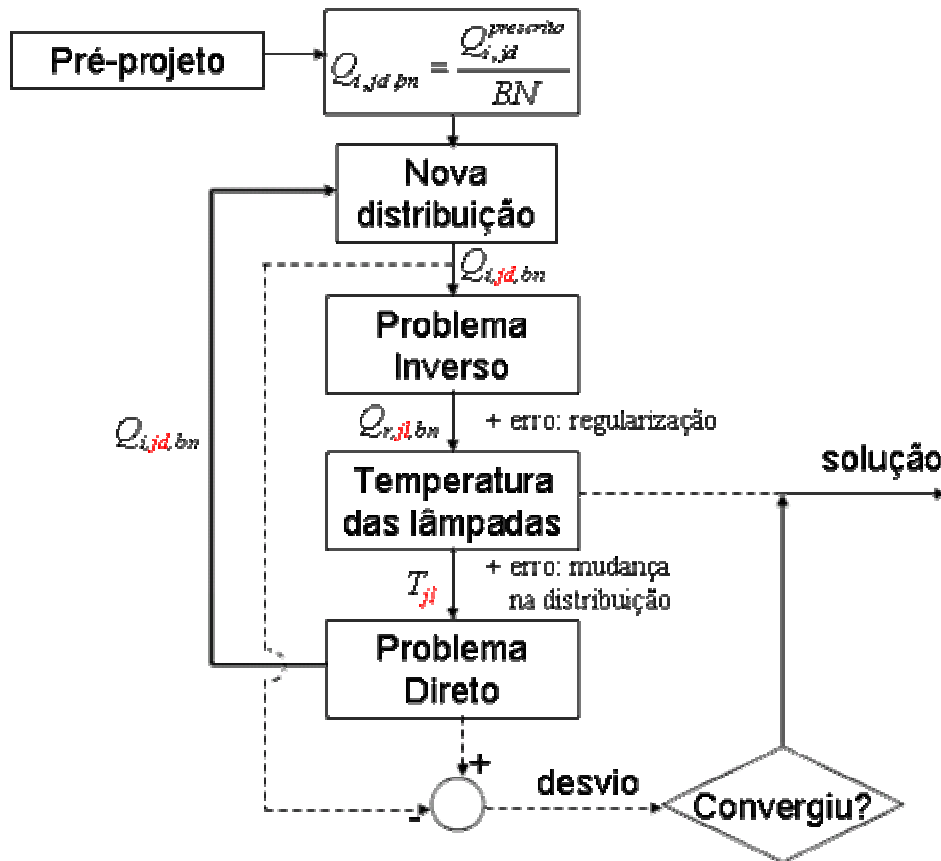


Figura 5.4 Metodologia proposta para cavidades formadas por superfícies não-cinzas.

5.1. ESTIMATIVA INICIAL

Como foi sugerido na apresentação deste capítulo, o fechamento do problema inverso em uma cavidade não-cinza deve impor que a grandeza prescrita seja distribuída de forma coerente nas bandas consideradas. Contudo, deve-se iniciar o processo de busca desta distribuição com uma estimativa inicial qualquer. Pode-se, por exemplo, assumir-se que as BN bandas são irradiadas com os mesmos valores de luminamento:

$$Q_{i,jd,bn} = \frac{Q_{i,jd}^{prescrito}}{BN} \quad (5.2)$$

5.2. RADIOSIDADES DAS LÂMPADAS – ANÁLISE INVERSA

Deseja-se montar um sistema de equações que nos permita chegar aos valores de potência das lâmpadas. As superfícies de projeto possuem duas condições de contorno e, por isso, duas equações de balanço são escritas para as mesmas, uma em termos de poder emissivo e outra em termos de fluxo líquido, enquanto que as superfícies de parede, com condição de contorno de temperatura prescrita, são equacionadas com um balanço em termos de poder emissivo. As

superfícies de lâmpadas não possuem qualquer condição de contorno, todavia, uma equação de balanço é determinada para estas superfícies pois contém exatamente aquelas grandezas de interesse. O sistema de equações fica:

$$jd: \quad Q_{o,jd,bn} = \varepsilon_{jd,bn} \frac{e_{jd,bn}^{(l)}}{q_{ref}} - Q_{i,jd,bn} \quad (5.3)$$

$$jd: \quad Q_{i,jd,bn} = Q_{o,jd,bn} - Q_{r,jd,bn} = \sum_{jw=1}^{jw1} F_{dw} Q_{o,jw,bn} + \sum_{jl=1}^{jl1} F_{dl} Q_{o,jl,bn} \quad (5.4)$$

$$jw: \quad Q_{o,jw,bn} = \varepsilon_{jw,bn} \frac{e_{jw,bn}^{(l)}}{q_{ref}} + (1 - \varepsilon_{jw,bn}) \left(\sum_{jd=1}^{jd1} F_{wd} Q_{o,jd,bn} + \sum_{jw=1}^{jw1} F_{ww} Q_{o,jw,bn} + \sum_{jl=1}^{jl1} F_{wl} Q_{o,jl,bn} \right) \quad (5.5)$$

$$jl: \quad Q_{o,jl,bn} = Q_{r,jl,bn} + \sum_{jd=1}^{jd1} F_{ld} Q_{o,jd,bn} + \sum_{jw=1}^{jw1} F_{lw} Q_{o,jw,bn} \quad (5.6)$$

em que $jd1$, $jw1$ e $jl1$ representam o número total de superfícies de projeto, paredes e lâmpadas, respectivamente, $\varepsilon_{jd,bn}$ e $\varepsilon_{jw,bn}$ são a emissividade das superfícies de projeto e parede em cada banda bn , F são os fatores de forma entre as superfícies indicadas no sub-índice, q_{ref} é o luminamento de referência em lx, $e_{jd,bn}^{(l)}$ e $e_{jw,bn}^{(l)}$ são o poder emissivo das superfícies de projeto e parede em cada banda na unidade lx. Todas as radiosidades adimensionais $Q_{o,jd,bn}$, $Q_{o,jw,bn}$ e $Q_{o,jl,bn}$ bem como os fluxos líquidos adimensionais $Q_{r,jd,bn}$, $Q_{r,jl,bn}$ são desconhecidos. Tal arranjo de equações é escrito para cada uma das bandas bn consideradas e são resolvidos separadamente.

De imediato, pode-se fazer uso da condição de contorno de poder emissivo luminoso nulo nas superfícies de projeto ($e_{jd,bn}^{(l)} = 0$) na Eq.(5.3) e, assim, obter suas radiosidades:

$$Q_{o,jd,bn} = -Q_{i,jd,bn} \quad (5.7)$$

No próximo passo, usar-se-á as Eqs. (5.4) e (5.5) em conjunto para encontrar iterativamente ambos $Q_{o,jw,bn}$ e $Q_{o,jl,bn}$. Uma primeira estimativa para os valores de uma destas grandezas deve ser feito. Escolhe-se estimar inicialmente valores para $Q_{o,jw,bn}$, embora a decisão contrária também seja viável. O processo iterativo, como comentado, inicia-se com a Eq.(5.4), que pode ser rearranjada com as incógnitas à esquerda, que se torna:

$$\sum_{jl=1}^{jl1} F_{dl} Q_{o,jl,bn} = Q_{i,jd,bn} - \sum_{jw=1}^{jw1} F_{dw} Q_{o,jw,bn} \quad (5.8)$$

A equação acima representa um balanço energético em uma superfície de projeto qualquer jd e é escrita para cada superfície em uma banda bn , constituindo em si um sub-sistema de equações, que será identificado com sub-sistema 1.

O sub-sistema 1 forma um sistema de equações mal-condicionado, nos moldes da Eq.(4.1) formado por M equações e N incógnitas, onde M é o número de superfícies de projeto e N é o número de superfícies de lâmpadas. Esse sub-sistema de equações é resolvido através do método TSVD, conforme apresentado no Capítulo 4. Os valores de $Q_{o,jl,bn}$ obtidos são inseridos na Eq.(5.5), que pode ser reescrita na forma de atualização de valores de $Q_{o,jw,bn}$:

$$Q_{o,jw,bn}^{novo} = (1 - \epsilon_{jw,bn}) \left(\sum_{jd=1}^{jd1} F_{wd} Q_{o,jd,bn} + \sum_{jw=1}^{jw1} F_{ww} Q_{o,jw,bn} + \sum_{jl=1}^{jl1} F_{wl} Q_{o,jl,bn} \right) \quad (5.9)$$

Note que é utilizada na relação acima a condição de contorno para as paredes frias ($e_{jw,bn}^{(l)} = 0$), que, quando escrita para cada superfície jw , forma um sistema de equações, denominado sub-sistema 2, do tipo $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$, onde \mathbf{A} é uma matriz quadrada e bem-condicionada. Portanto, este sub-sistema é resolvido pelo método iterativo de Gauss-Seidel a partir dos valores previamente obtidos para $Q_{o,jl,bn}$ e $Q_{o,jd,bn}$. Os valores de $Q_{o,jw,bn}$ localizados à direita da Eq.(5.9) são inicialmente estimados para gerar novos valores para estas mesmas variáveis localizadas à esquerda. Sempre que aplicada a relação para um elemento jw , o novo valor gerado à esquerda é atualizado à direita, de forma que no próximo elemento uma equação com coeficientes melhor convergidos é utilizada. O processo é repetido até sua convergência.

O sub-sistema 2 gera entradas para resolver o sub-sistema 1, que, por sua vez, realimenta o sub-sistema 2. Estes devem ser resolvidos sucessivamente até a convergência dos valores de $Q_{o,jl,bn}$ e $Q_{o,jw,bn}$.

Finalmente, a Eq.(5.6) é utilizada para calcular o fluxo líquido de energia luminosa $Q_{r,jl,bn}$ que será útil na Seção 5.3 para o cálculo do poder emissivo das superfícies de lâmpadas.

O processo descrito nesta seção deve ser repetido para cada banda bn considerada no problema. Logo, com as radiosidades das lâmpadas em cada banda, resolve-se o problema de irradiação prescrita seguindo uma distribuição nas bandas que pode ser fisicamente incorreta e ainda com um erro devido à solução inversa, que não se conhece. Nas próximas etapas da metodologia estas questões serão apropriadamente expostas e resolvidas.

5.3. TEMPERATURA DAS LÂMPADAS

Se as radiosidades das lâmpadas calculadas na seção anterior fossem utilizadas como condição de contorno na solução do problema direto, o resultado de irradiação na superfície seria

muito próximo ao valor prescrito ($Q_{i,jd}^{prescrito} = 1$). Logo, a menos de um desvio devido à solução inversa, o problema estaria matematicamente resolvido. No entanto, o problema físico se mantém inconsistente. Analisando um elemento de lâmpada qualquer, nota-se que em cada uma de suas bandas há um poder emissivo que remete a temperaturas diferentes, o que é inaceitável. Este problema ocorre devido à essência do problema inverso espectral, onde primeiramente se calcula o poder emissivo para posteriormente obter a temperatura com a qual aquele poder emissivo pode ser obtido.

Como até este ponto as bandas foram tratadas de forma independente, deve-se utilizar um meio de relacioná-las entre si para chegar a uma situação fisicamente consistente em todo espectro, não em cada banda independentemente, e então obter a temperatura equivalente única a ser atribuída para cada superfície de lâmpada. Um somatório em termos de energia nas bandas é a forma escolhida para se chegar a tal temperatura, no intuito de responder à seguinte pergunta: qual a temperatura que, quando atribuída como um todo para esta superfície, irá gerar um poder emissivo igual à soma do poder emissivo de cada banda na presente condição?

O poder emissivo de cada banda pode ser calculado com a Eq.(2.19), e o somatório das BN bandas é:

$$\frac{e_{jl}^{(l)}}{q_{ref}} = \sum_{bn=1}^{BN} \left[\frac{(1 - \epsilon_{jl,bn})}{\epsilon_{jl,bn}} Q_{r,jl,bn} + Q_{o,jl,bn} \right] \quad (5.10)$$

onde $Q_{r,jl,bn}$ é calculada a partir dos valores de radiossidade das superfícies da cavidade, obtidos na seção anterior do sistema formado pelas Eqs.(5.6). Note que o termo $e_{jl}^{(l)}/q_{ref}$ representa o poder emissivo total de cada elemento jl obtido de forma adimensional, uma vez que fora calculado a partir de fluxos também adimensionais. Contudo, para prosseguir o cálculo das temperaturas é primordial retornar ao problema dimensional, uma vez que os cálculos a serem feitos a seguir não são linearmente relacionados com a temperatura. O fluxo luminoso emitido por cada elemento de lâmpada é:

$$e_{jl}^{(l)} \cdot A_L = (\Delta x^2 q_{ref}) \frac{e_{jl}^{(l)}}{q_{ref}} \quad (5.11)$$

em lúmens, onde Δx^2 é a área do elemento de lâmpada, A_{lamp} é a área da superfície da lâmpada, ou área do filamento, sujeita à temperatura T_{jl} que emite $e_{jl}^{(l)}$.

Lembrando da definição de poder emissivo luminoso a partir do poder emissivo de Planck:

$$e_{jl}^{(l)} = 683 \int_{0,4\mu m}^{0,7\mu m} e_{CN}^{(w)} V_{\lambda} d\lambda \quad (5.12)$$

onde $e_{jl}^{(w)}$ é o poder emissivo dado pela distribuição de Planck e V_{λ} é a eficiência luminosa fotópica do olho humano [IESNA, 2000]. A equação acima pode ser apresentada na sua forma funcional como:

$$e_{jl}^{(l)} = \int f(\lambda, T_{jl}) d\lambda \quad (5.13)$$

em que se procura o valor de T_{jl} que satisfaça a Eq.(5.12). Encontra-se a temperatura desejada através do método da bi-seção, no qual é estimado um valor inicial para a temperatura e então é verificado se o valor se encontra em um intervalo acima ou abaixo do ponto escolhido. Um novo ponto central no intervalo correto é testado e assim sucessivamente até a convergência.

Uma vez encontrada a temperatura de cada elemento de lâmpada, calcula-se então o novo poder emissivo em cada banda. Esta nova distribuição obtida conserva o total de energia emitida que fora calculada e ainda obedece às características espectrais das superfícies, isto é, a energia emitida em cada banda corresponde a uma mesma temperatura, para cada superfície de lâmpada. A nova distribuição de poder emissivo é:

$$e_{jl,bn}^{(l)} = 683 \int_{\lambda_{bni}}^{\lambda_{bnf}} e_{CN}^{(w)} V_{\lambda} d\lambda \quad (5.14)$$

Estando as temperaturas já definidas, de forma que se trabalhará apenas em termos de fluxos, pode-se voltar ao problema na sua forma adimensional:

$$\frac{e_{jl,bn}^{(l)}}{q_{ref}} = \left(\frac{A_L}{\Delta x^2} \frac{1}{q_{ref}} \right) e_{jl,bn}^{(l)} \quad (5.15)$$

5.4. PROBLEMA DIRETO

Observou-se que o problema matemático de inversão é relativamente simples de ser resolvido enquanto o problema físico exige maior atenção. Na seção anterior foi calculado o poder emissivo fisicamente consistente para cada banda, no entanto esta ligeira modificação da solução inversa pode incorrer em erros caso aplicado no problema direto. Para avaliar tal erro, é dada continuidade à metodologia aplicando-se a solução direta utilizando-se como condições de

contorno aqueles valores de poder emissivo calculados pela solução inversa e alterados na seção anterior.

A solução do problema direto é um meio de avançar no aprimoramento do problema físico, possibilitando obter novas distribuições de energias nas bandas para $Q_{i,jd}^{prescrito}$, diferentes daquelas calculadas na Eq.(5.2). As condições de contorno do problema direto ficam então:

- superfícies de projeto: $e_{jd,bn}^{(l)} = 0$;
- superfícies de parede: $e_{jw,bn}^{(l)} = 0$;
- superfícies de lâmpada: $e_{jl,bn}^{(l)} = f(T_{jl})$, da Eq.(5.15).

Escrevendo-se uma equação de balanço para cada tipo de superfície, já aplicando as condições de contorno, obtêm-se:

$$jd: \quad Q_{o,jd,bn} = (1 - \varepsilon_{jd,bn}) \left(\sum_{jw=1}^{jwl} F_{dw} Q_{o,jw,bn} + \sum_{jl=1}^{jll} F_{dl} Q_{o,jl,bn} \right) \quad (5.16)$$

$$jw: \quad Q_{o,jw,bn} = (1 - \varepsilon_{jw,bn}) \left(\sum_{jd=1}^{jdl} F_{wd} Q_{o,jd,bn} + \sum_{jw=1}^{jwl} F_{ww} Q_{o,jw,bn} + \sum_{jl=1}^{jll} F_{wl} Q_{o,jl,bn} \right) \quad (5.17)$$

$$jl: \quad Q_{o,jl,bn} = \varepsilon_{jl,bn} \frac{e_{jl,bn}^{(l)}}{q_{ref}} + (1 - \varepsilon_{jl,bn}) \left(\sum_{jd=1}^{jdl} F_{ld} Q_{o,jd,bn} + \sum_{jw=1}^{jwl} F_{lw} Q_{o,jw,bn} \right) \quad (5.18)$$

O sistema acima é formado em cada banda bn por um número de equações igual ao somatório do número de superfícies consideradas (incluindo as superfícies de projeto, de paredes e de lâmpadas) e pelo mesmo número de incógnitas. Além disso, não se trata de um sistema de equações mal-condicionado, possui dominância da diagonal, podendo assim ser resolvido pelo método de Gauss-Seidel.

De posse dos valores das radiosidades pode-se calcular também os fluxos líquidos e irradiação da superfície de projeto $Q_{r,jd,bn}$ e $Q_{i,jd,bn}$.

O erro do fluxo líquido calculado relativo àquele imposto na solução inversa é:

$$erro_{jd,bn} = \left| \frac{Q_{r,jd,bn}^{inverso} - Q_{r,jd,bn}^{direto}}{Q_{r,jd,bn}^{inverso}} \right| \quad (5.19)$$

onde o erro em cada elemento é parte devido à solução inversa e parte devido à redistribuição do poder emissivo nas bandas da superfície. A primeira parcela que contribui com $erro_{jd,bn}$ é intrínseca ao problema inverso e só pode ser reduzido caso modificados alguns parâmetros do problema: reduzir o pé-direito da cavidade, aumentar o número de lâmpadas, aumentar a

emissividade das superfícies e considerar um maior número de valores singulares são formas de melhorar as condições de inversão do problema e diminuir seu erro. A segunda parcela de erro da Eq.(5.19) se dá devido ao desconhecimento da correta distribuição do valor prescrito $Q_{i,jd}^{prescrito}$ nas bandas, o que implica na atribuição de uma temperatura única para a superfície na Seção 5.3, alterando as condições anteriormente obtidas do problema inverso.

Pretende-se atingir uma condição em que a distribuição de energia nas bandas encontrada pela solução inversa seja fisicamente consistente, com temperaturas iguais em cada banda. Neste caso, os valores de $erro_{jd,bn}$ se estabilizam, permanecendo apenas a parcela intrínseca do problema inverso, e o problema é considerado convergido por completo.

A solução do problema direto nesta seção é de grande valia pois é balizada por condições de contorno próximas à solução do problema inverso, porém, fisicamente consistentes. Portanto, a distribuição dos fluxos aqui encontrados para as superfícies de projeto (jd) é útil para uma nova estimativa de distribuição de $Q_{i,jd}^{prescrito}$.

5.5. FECHAMENTO DO PROBLEMA – NOVA DISTRIBUIÇÃO

Um fechamento deve ser dado a este problema de modo a gerar novos valores tentativos para $Q_{i,jd,bn}$, tal como foi feito inicialmente na Eq.(5.2). Pretende-se com isso refazer os cálculos apresentados desde a Seção 5.2, substituindo a estimativa inicial feita na Seção 5.1 por melhores aproximações, pois, neste ponto é possível se ter uma noção mais apurada daquilo que seria uma correta distribuição de energia do valor prescrito.

Inicialmente, lembra-se que a irradiação total na superfície de projeto deve ser tal qual o prescrito ($Q_{i,jd}^{prescrito} = 1$), de maneira alternativa fica:

$$\sum_{bn=1}^{BN} Q_{i,jd,bn} = 1 \quad (5.20)$$

Anteriormente, na Seção 5.1, os valores de irradiação foram divididos igualmente nas bandas, pela ausência de um critério mais apurado. No entanto, tal fato não se repete aqui já que existe a solução do problema direto apresentando uma distribuição coerente de irradiação nas bandas. Logo, para novos valores tentativos de irradiação ($Q_{i,jd,bn}$), utiliza-se a própria distribuição resultante do problema direto. Todavia, estes novos valores resultam em uma irradiação total que não atendem, necessariamente, à condição da Eq.(5.20). Faz-se então um ajuste proporcional das irradiações da seguinte maneira:

$$Q_{i,jd,bn}^{novo} = \left(\frac{Q_{i,jd,bn}^{anterior}}{\sum_{bn=1}^{BN} Q_{i,jd,bn}^{anterior}} \right) Q_{i,jd}^{prescrito} \quad (5.21)$$

Com a relação acima, os novos valores tentativos obedecem à condição prescrita e ainda seguem uma distribuição coerente. De posse destes novos valores, pode-se reiniciar o processo de cálculo a partir da Seção 5.2 até que, ao calcular os erros na Eq.(5.19), conclua-se que estes estejam convergidos, isto é, representem apenas erros associados à inversão do problema, e não às incorretas distribuições tentativas da grandeza prescrita nas bandas.

5.6. PÓS-PROCESSAMENTO

Uma vez convergidos os erros da metodologia apresentada acima, é conveniente realizar um balanço global de energia na cavidade. Considera-se para tal fim os fluxos líquidos das superfícies em termos totais. O balanço global da cavidade é, portanto, nada mais que o somatório dos fluxos líquidos totais em todas superfícies. A qualidade da solução é tanto melhor quanto menor for o desvio do balanço global em relação ao valor nulo. Logo, é de interesse relacionar o balanço global de energia com a quantidade total de energia em questão, tornando-se adimensional. Essa grandeza é denominada balanço global relativo, que fica:

$$bal_{rel} = \frac{\sum_{jd=1}^{jd1} Q_{r,jd} + \sum_{jw=1}^{jw1} Q_{r,jw} + \sum_{jl=1}^{jl1} Q_{r,jl}}{\sum_{jd=1}^{jd1} |Q_{r,jd}| + \sum_{jw=1}^{jw1} |Q_{r,jw}| + \sum_{jl=1}^{jl1} |Q_{r,jl}|} \quad (5.22)$$

O balanço global relativo, da equação acima, possibilita dimensionar a magnitude do balanço global independentemente da quantidade de energia trocada. Valores da ordem de 10^{-3} são comumente utilizados para caracterizar uma cavidade numericamente correta.

Finalmente, é avaliada a capacidade desta metodologia de atingir os objetivos definidos na apresentação do Capítulo 5, isto é, definir a potência das lâmpadas que atendem um fluxo prescrita na superfície de projeto. O desvio médio da solução é o valor adimensional que relaciona o luminamento atingido pela metodologia e o luminamento prescrita:

$$desvio_{médio} = \frac{\sum_{jd} \left| \frac{Q_{i,jd} - Q_{i,jd}^{prescrito}}{Q_{i,jd}^{prescrito}} \right|}{M} \quad (5.23)$$

onde M é o número de superfícies de projeto. O desvio máximo encontrado na superfície de projeto é:

$$desvio_{m\acute{a}x} = \left| \frac{Q_{i,jd} - Q_{i,jd}^{prescrito}}{Q_{i,jd}^{prescrito}} \right|_{m\acute{a}x} \quad (5.24)$$

6. RESULTADOS

Para a obtenção dos resultados, considera-se um ambiente na forma de uma cavidade paralelepipedica sem janelas e com iluminação puramente artificial gerada por lâmpadas incandescentes instaladas no teto. O comprimento da sala é considerado 10m e sua largura 8m, enquanto que a distância entre o plano de trabalho e o teto é 2m. Os resultados são apresentados com os eixos adimensionalizados pelo valor de 10m, assim, tem-se $x = 1$, $y = 0,8$ e $z = 0,2$. Realizando-se esta operação, pode-se estender os resultados obtidos para outras dimensões que mantenham esta proporcionalidade. A cavidade apresenta simetria com relação a dois planos perpendiculares, conforme mostra a Figura 6.1.

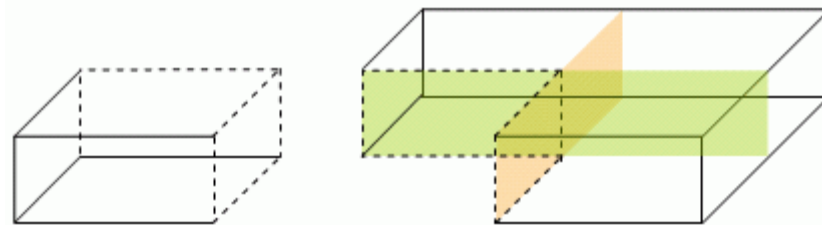


Figura 6.1 Planos de simetria considerados na cavidade.

Os valores de luminamento considerados são aqueles sugeridos na Tabela 2.5 e na Tabela 2.4 para tarefas visuais da classe B para trabalho de escritório.

O microcomputador utilizado é um PC AMD Athlon XP 2100+ (1,31GHz) com 1Gb de memória RAM, placa-mãe ASUS A7S266 com FSB 188MHz e sistema operacional Windows 2000 SP4 rodando o compilador Borland C++ v.5.02.

6.1. INDEPENDÊNCIA DE MALHA

Um estudo de independência de malha deve ser realizado de modo a garantir que o refinamento da mesma não tenha influência na solução obtida. Com esse objetivo, é suficiente utilizar a análise direta com o método das radiosidades, apresentada no Capítulo 3. Uma situação de iluminação em uma cavidade é simulada para conduzir os testes de independência de malha.

Considera-se uma sala na qual todos os elementos que formam o teto são fontes de luz em uma dada temperatura. As demais superfícies, paredes laterais e piso, obedecem a hipótese de paredes frias, que possuem poder emissivo luminoso nulo. Dessa forma, está posto um problema no qual cada elemento de área possui somente uma condição de contorno, resolvido pelo método de Gauss-Seidel, como apresentado no Capítulo 3. As superfícies são consideradas cinzas, com as refletividades apresentadas na Tabela 6.2.

Como será visto na seção seguinte, para o luminamento de 900 lx no piso, o método Lúmen prevê que o luminamento do teto deve ser igual a 1525 lx. Considerando que esta energia luminosa é emitida continuamente na superfície do teto, a temperatura deste deve atender à Eq.(2.38), qual seja 1351 K. As dimensões da cavidade são apresentadas na Tabela 6.2.

São testadas 5 malhas, todas compostas por elementos quadrados. Os detalhes de cada malha são mostrados Tabela 6.1. O tamanho do elemento é determinado pelo comprimento do lado do quadrado.

Tabela 6.1 As diferentes malhas testadas.

Identificação	Número de elementos			Tamanho do elemento (m)
	x	y	z	
10	10	8	2	1,00
20	20	16	4	0,50
30	30	24	6	0,33
40	40	32	8	0,25
50	50	40	10	0,20

O luminamento obtido para dois pontos localizados na superfície de projeto é apresentado na Figura 6.2. Um deles está localizado no centro da cavidade ($x=0,5$ $y=0,4$ $z=0,0$) que, para a configuração calculada, é o local onde se encontra o valor máximo de luminamento. O outro ponto observado localiza-se no canto do ambiente ($x=0,0$ $y=0,0$ $z=0,0$), onde o luminamento atinge seu valor mínimo.

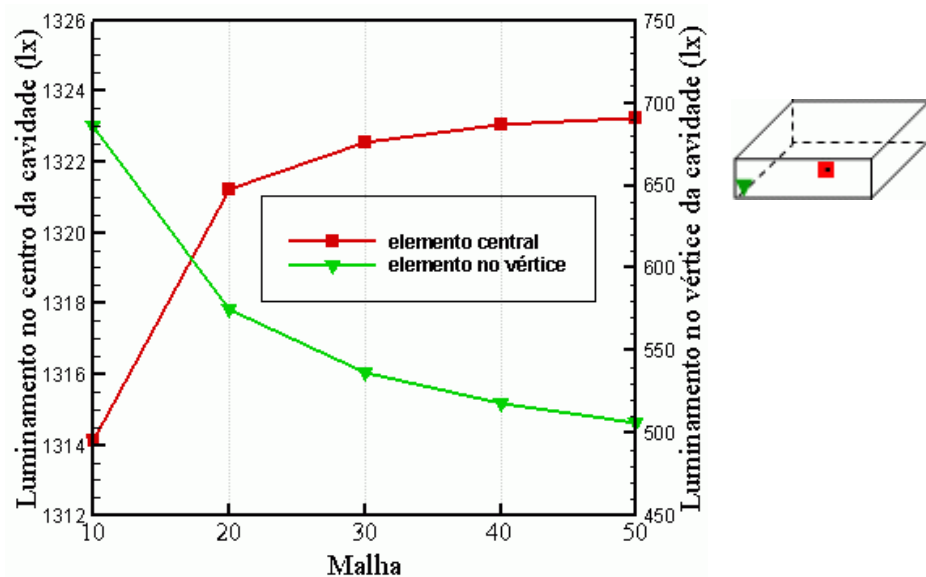


Figura 6.2 Luminamento obtido com diferentes malhas para dois pontos localizados na superfície de projeto.

Da análise da Figura 6.2 percebe-se que há uma convergência dos valores de luminamento para uma assíntota horizontal, que se pronuncia a partir da malha 30 (denominação utilizada para uma malha $30 \times 24 \times 6$). Este fato fica bem evidenciado na Figura 6.3, que mostra os valores de luminamento ao longo de um corte realizado na superfície de projeto em $x=0,5$. Nota-se que as malhas mais refinadas, 40 e 50, não provocam diferença significativa nos resultados, enquanto que as malhas 10 e 20 apresentam resultados nitidamente influenciados pelo uso da malha não adequada.

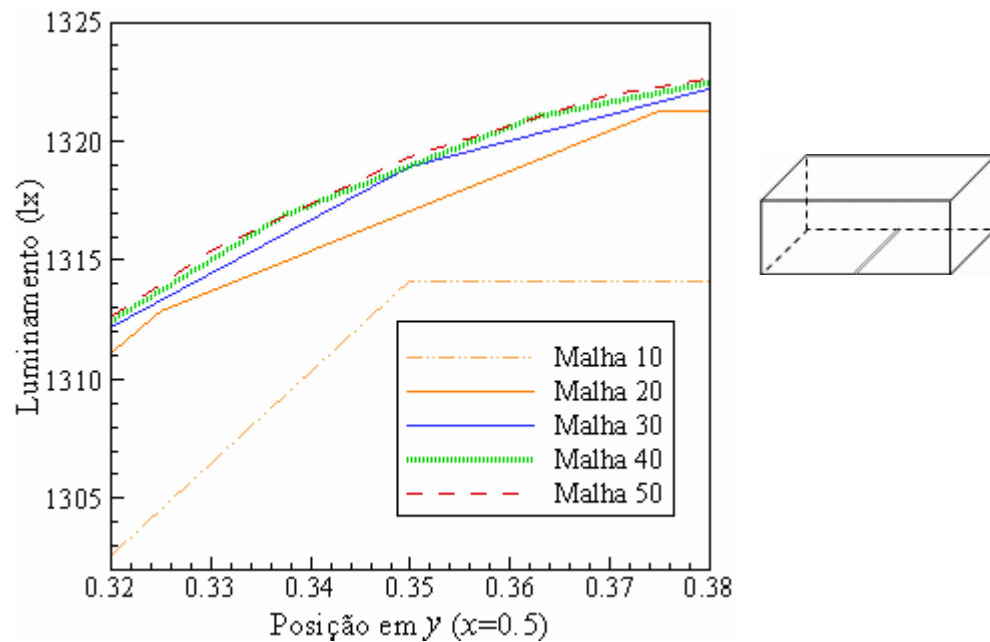


Figura 6.3 Luminamento para uma seção da superfície de projeto.

Desses fatos, conclui-se que a partir da malha 30 os resultados obtidos independem de um refinamento maior da malha. Portanto, esta malha é utilizada nas soluções que seguem neste trabalho por ser aquela que associa independência de malha com menor número de elementos, o que reduz o tempo do cálculo computacional.

Apesar disto, o refino da malha propicia o posicionamento mais preciso dos elementos de lâmpadas. Com este intuito poderiam ser utilizadas as malhas 40 e 50. Malhas mais refinadas que 50 não foram simuladas por incapacidade de memória do computador utilizado.

6.2. RESULTADOS DE MÉTODOS EMPÍRICOS

O método Lúmen, apresentado na Seção 2.8, aplicado ao ambiente proposto neste capítulo, apresenta os dados de projeto listados na Tabela 6.2.

Com a relação dada pela Eq.(2.44), obtém-se o índice do recinto $\kappa=2,22$. Combinando o valor calculado para κ com a refletividade das superfícies, é encontrado nas tabelas de Phillips, 1981, o fator de utilização deste projeto, $\eta=0,59$. O fator de depreciação é estabelecido como

$\Pi=1$, considerando os valores médios sugeridos nas referências para um ambiente com boa manutenção.

Tabela 6.2 Variáveis do projeto proposto para aplicação do Método Lúmen.

Variáveis de projeto	Valor
Comprimento	10 m
Largura	8 m
Área	80 m ²
Pé direito	2 m
Refletividade do teto	0,70
Refletividade da parede	0,50
Refletividade do piso	0,10
Luminamento planejado	900 lx

Utilizando-se a Eq.(2.45), o luminamento do teto deve ser:

$$q_{teto}^{(l)} = \frac{900 \text{ lx}}{0,59 \cdot 1,00} = 1525 \text{ lx}$$

valor esse que já fora utilizado na seção anterior como condição de contorno nos testes de independência de malha.

É possível então calcular o número de luminárias necessárias para o projeto, através da Eq.(2.46). São consideradas as lâmpadas de 150 W do catálogo da Tabela 2.2, para as quais o fluxo luminoso Φ é igual a 2505 lm. Dessa forma chega-se a:

$$n = \frac{1525 \text{ lx} \cdot 80 \text{ m}^2}{2505 \text{ lm}} = 48,70$$

valor que é 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. O arranjo no teto é apresentado na Figura 6.4, onde Δx e Δy para o caso considerado são respectivamente 10/8 e 8/6 (1,25 e 1,33) metros. Desse modo, chega-se a um fluxo de energia de 90W/m² no teto.

A análise com a metodologia direta apresentada no Capítulo 3 permite verificar o atendimento ao luminamento especificado com as condições calculadas com os métodos empíricos. Para manter a semelhança entre as metodologias, são utilizadas superfícies cinzas com as propriedades apresentadas na Tabela 6.2. A modelagem das lâmpadas segue a abordagem apresentada na Seção 2.5 para lâmpadas incandescentes ($\epsilon=0,36$).

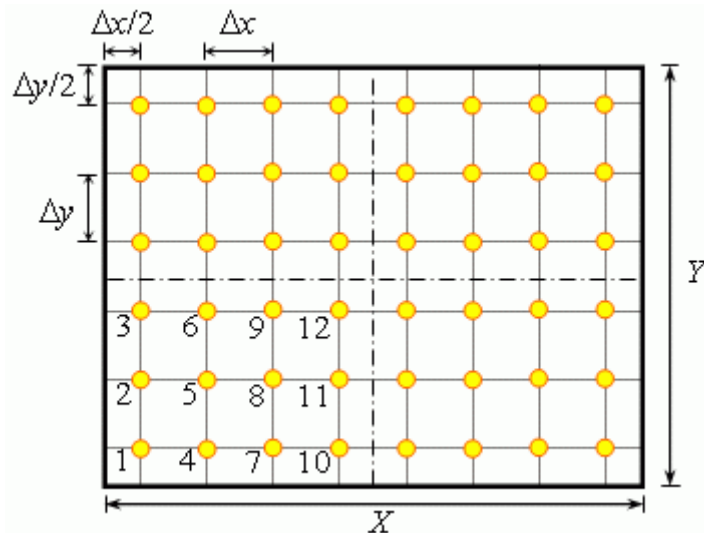


Figura 6.4 Arranjo segundo Método Lúmen para instalação de 48 lâmpadas.

Com o arranjo da Figura 6.4, o método das cavidades radiantes indica uma distribuição de luminamento conforme a Figura 6.5, que apresenta eixos com valores adimensionais. O luminamento incidente adimensional na superfície de projeto equivale a $Q_{i,jd}=1$ para o luminamento planejado, neste caso 900 lx.

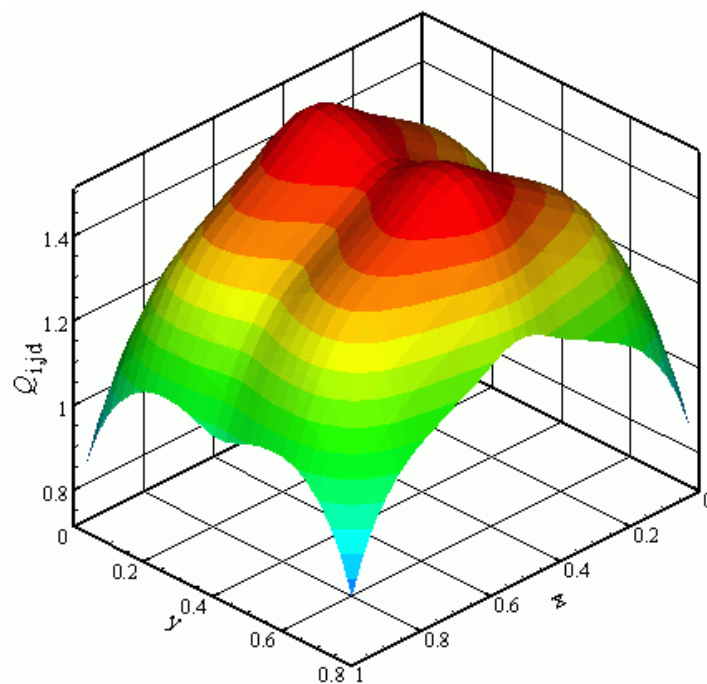


Figura 6.5 Luminamento na superfície de projeto para um arranjo de 48 lâmpadas instaladas uniformemente no teto.

O valor máximo obtido é 1,52 e o mínimo 0,75, com desvio médio do valor prescrito, calculado pela Eq.(5.23), de 35%. Percebe-se que o método Lúmen projeta uma condição de luminamento pouco uniforme e com um luminamento muito acima do desejado na grande área central da superfície de projeto.

Para o luminamento previsto de 900 lx, o programa WinElux prevê o uso de 49 luminárias com duas lâmpadas cada, que somadas possuem o mesmo fluxo luminoso considerado com o método Lúmen, 2505 lm. O programa sugere que a instalação das luminárias seja feita em 7 fileiras no comprimento da sala e 8 fileiras na sua largura. A distribuição de luminamento na superfície de projeto apresentada pelo WinElux é apresentada na Figura 6.6(a), com luminamento médio de 928 lx na superfície de projeto.

Na Figura 6.6(b) é apresentada a distribuição obtida pelo método das radiosidades do Capítulo 3 para a mesma configuração sugerida pelo WinElux. Um luminamento médio de 1275 lx é calculado, cerca de 350 lx superior ao calculado pelo método do WinElux. Segundo informações adicionais solicitadas à EEE, 2002, o luminamento final calculado pelo WinElux é afetado por um fator de manutenção, o que explica os valores mais baixos.

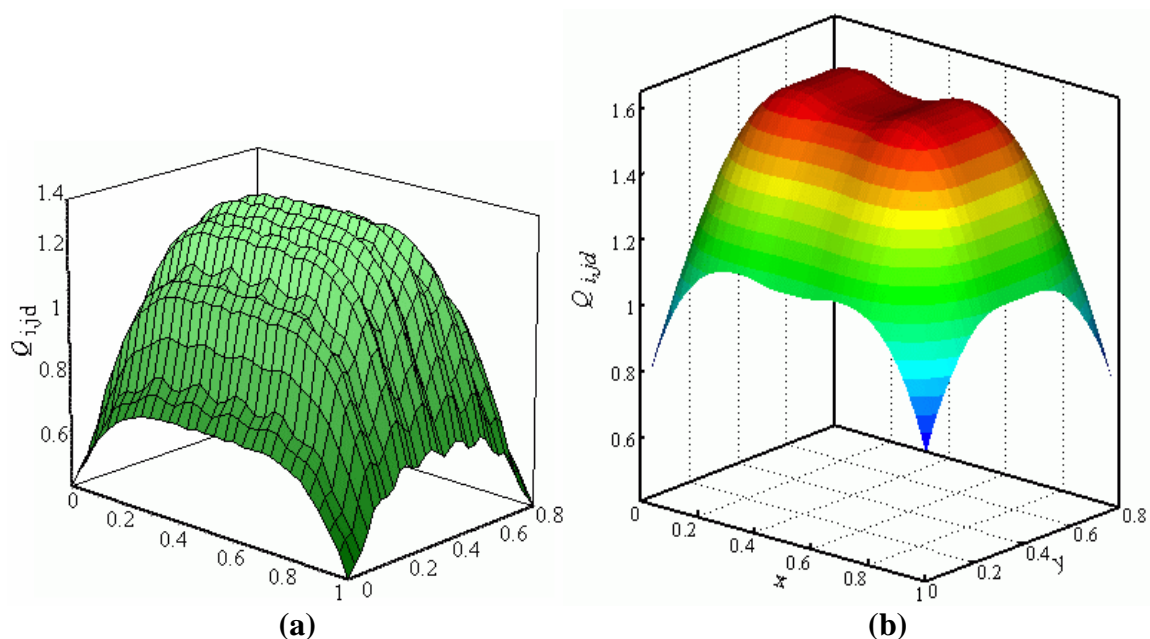


Figura 6.6 Luminamento na superfície de projeto para um arranjo de 30 luminárias, de acordo com o programa WinElux (EEE, 2002) e pelo método das radiosidade.

Os métodos utilizados são concordantes entre si uma vez que os resultados obtidos seguem a mesma tendência ao longo da superfície de projeto. Estudos mais aprofundados devem ser realizados para verificar a necessidade da aplicação de um fator de manutenção sobre o luminamento final, conforme utilizado pelo WinElux.

6.3. PROJETO INVERSO DE ILUMINAÇÃO

Nos projetos inversos de iluminação é suficiente informar o luminamento desejado no plano de trabalho e o posicionamento das lâmpadas para que a metodologia se encarregue de determinar o fluxo luminoso de cada lâmpada que melhor atenda à condição prescrita.

Como se pode perceber na Figura 6.5, as regiões mais exteriores da superfície de projeto são fortemente afetadas pela proximidade das paredes, causando um baixo luminamento nesta área. Por este motivo, é conveniente desprezar os elementos próximos até 1,0 m das paredes laterais como forma de relaxar a solução inversa. Logo, o total de elementos de projeto que formam esta cavidade se reduz de 720 para 432.

A metodologia apresentada neste trabalho permite trabalhar com a não-linearidade que se estabelece ao considerar o comportamento espectral das propriedades das superfícies. A emissividade espectral das superfícies é mostrada na Figura 6.7(a). Ao modelar estas superfícies como não-cinzas, o espectro é discretizado em bandas, Figura 6.7(b), nas quais as emissividades podem ser consideradas constantes.

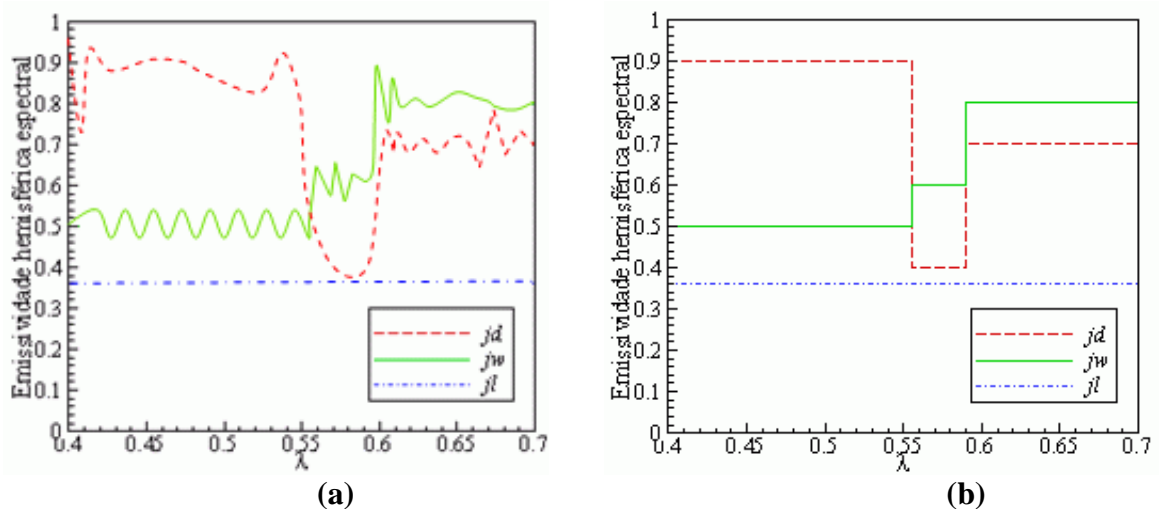


Figura 6.7 Emissividade de superfícies reais (a) e a respectiva modelagem como superfícies não-cinzas (b).

As superfícies da Figura 6.7 são escuras por absorverem grande parcela de energia radiante. Isto é evidenciado pelos altos valores de emissividades/absortividades dos elementos de parede e de projeto. Superfícies mais claras, isto é, com menores emissividades/absortividades são também ensaiadas adiante neste capítulo.

De posse dos parâmetros físicos dados pela Figura 6.7 e das características da cavidade anteriormente citadas, são feitos em seguida diferentes simulações de modo a demonstrar as características e potencialidades do método inverso em projetos de iluminação. As simulações envolvem diferentes arranjos de lâmpadas no teto, bem como diferentes parâmetros de regularização para o método TSVD.

6.3.1. Teto coberto por lâmpadas

Uma primeira análise inversa é feita com o teto coberto por lâmpadas, portanto 720 (30×24) lâmpadas e 432 superfícies de projeto. A Figura 6.8 mostra a vista superior da região

simétrica do ambiente, ou seja, um quarto da cavidade. Os pontos representam as 180 lâmpadas da região de simetria, enquanto que a região escura representa a projeção das 108 superfícies de projeto. Este caso certamente não representa uma configuração prática, no entanto, é válido para avaliar a influência do parâmetro de regularização p , isto é, do número de valores singulares considerados na solução.

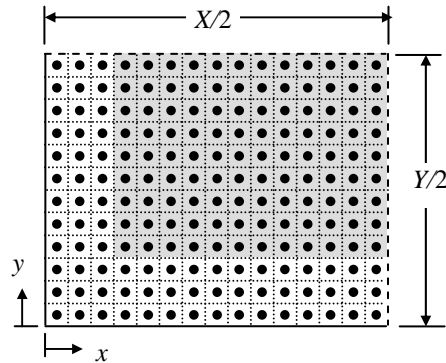


Figura 6.8 Região de simetria para uma configuração de 720 lâmpadas instaladas no teto.

Convém lembrar que cada elemento de lâmpada acrescenta uma incógnita ao problema, por não ser definida por alguma condição de contorno, enquanto que cada elemento de projeto acrescenta uma equação ao problema, por possuir dupla condição de contorno. Os elementos de parede são neutros nesta questão por acrescentar uma equação e uma incógnita. Logo, tem-se com esta configuração 720 incógnitas e 432 equações, formando um sistema com infinitas soluções exatas.

Na Figura 6.9 os valores singulares para a configuração de 720 lâmpadas são comparados com os valores singulares para a configuração com 48 lâmpadas anteriormente citada. Pelo decaimento mais pronunciado que apresenta esta última, conclui-se que o arranjo do teto coberto com lâmpadas possui melhores condições de inversão, isto é, atende à condição de luminamento com desvios mais estreitos. Este comportamento é esperado pois, a existência de diversas lâmpadas no teto proporciona maior flexibilidade para que a solução inversa encontre uma melhor distribuição de fluxo luminoso das lâmpadas para atender à condição prescrita. De um total de 180 valores singulares para a cavidade com simetria (um para cada lâmpada), são mostrados na Figura 6.9 apenas os primeiros 108, sendo que os demais valores são nulos. Este é um comportamento típico de sistemas com maior número de equações de que incógnitas pelo exposto no Capítulo 4, uma vez que 108 é exatamente a quantidade de elementos de projeto na cavidade com simetria.

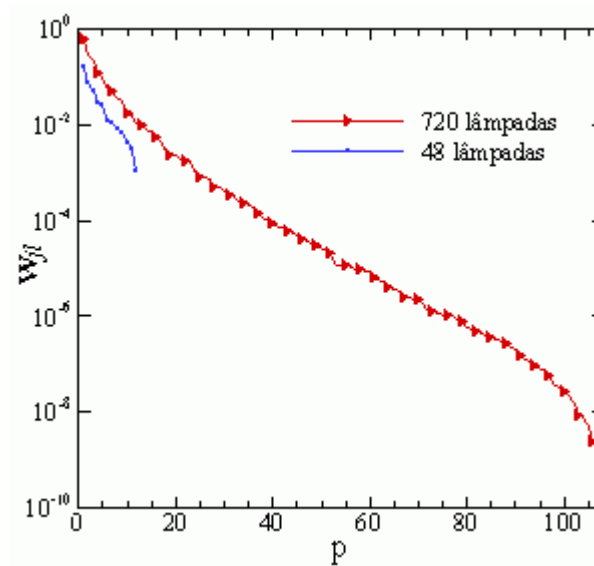


Figura 6.9 Valores singulares para o teto coberto por lâmpadas (Figura 6.8) e arranjo com 48 lâmpadas (Figura 6.4).

Entretanto, além de apresentar maior número de incógnitas do que restrições, tal sistema se mostra mal-condicionado pela natureza do problema inverso, fazendo com que as soluções exatas apresentem oscilações significativas e abruptas sem significado físico. Neste caso, é necessário aplicar a regularização no problema, considerando apenas os maiores valores singulares da matriz W . De fato, ao se considerar mais de doze valores singulares, a solução desta configuração já se mostra inviável pois seria necessário que as lâmpadas operassem com poder emissivo negativo, o que é impossível.

A Tabela 6.3 apresenta os resultados obtidos quando considerados diferentes parâmetros de regularização. Os cálculos para cada solução foram realizados em seis minutos e apenas três iterações foram necessárias para ajustar a divisão do luminamento prescrito nas bandas espectrais consideradas, conforme discussão da Seção 5.5. Dos valores obtidos para o balanço global, considera-se que todos os seis casos podem ser considerados convergidos.

Tabela 6.3 Resultados com o teto coberto por lâmpadas com diferentes números de valores singulares considerados.

Valores singulares considerados (p)	Desvio Médio (%)	Desvio Máximo (%)	Balanço Global ($\times 10^{-5}$)
12	0,43	2,15	8,06
10	0,69	3,12	0,37
8	1,27	5,36	5,45
6	1,48	9,02	6,59
4	4,49	17,05	31,65
2	12,24	35,93	179,22

Os resultados apresentados na Tabela 6.3 são obtidos basicamente com a utilização das lâmpadas INC25 e INC40, com algumas ocorrências das lâmpadas do tipo INC60, sempre em série com uma resistência elétrica para o ajuste do seu fluxo luminoso. Pode-se notar uma que os valores para o balanço global possuem um ponto de mínimo em $p=10$. Uma investigação mais criteriosa poderia analisar se este comportamento é encontrado regularmente neste tipo de problemas e suas causas, para assim avançar no entendimento da solução.

Ao se utilizar doze valores singulares, a solução do problema conduz a uma distribuição de temperatura nas lâmpadas que causa um luminamento com notável uniformidade na superfície de trabalho, com desvio médio de apenas 0,43% em torno do valor prescrito. No entanto, há uma contrapartida para resultados em uma faixa tão estreita, qual seja, uma complexa distribuição de temperatura das lâmpadas no teto, como evidenciado na Figura 6.10. De fato, esta é a solução fisicamente consistente mais próxima da solução exata que se pode conseguir para esta configuração. Fica evidente o mal-condicionamento do sistema pelo comportamento oscilante das temperaturas.

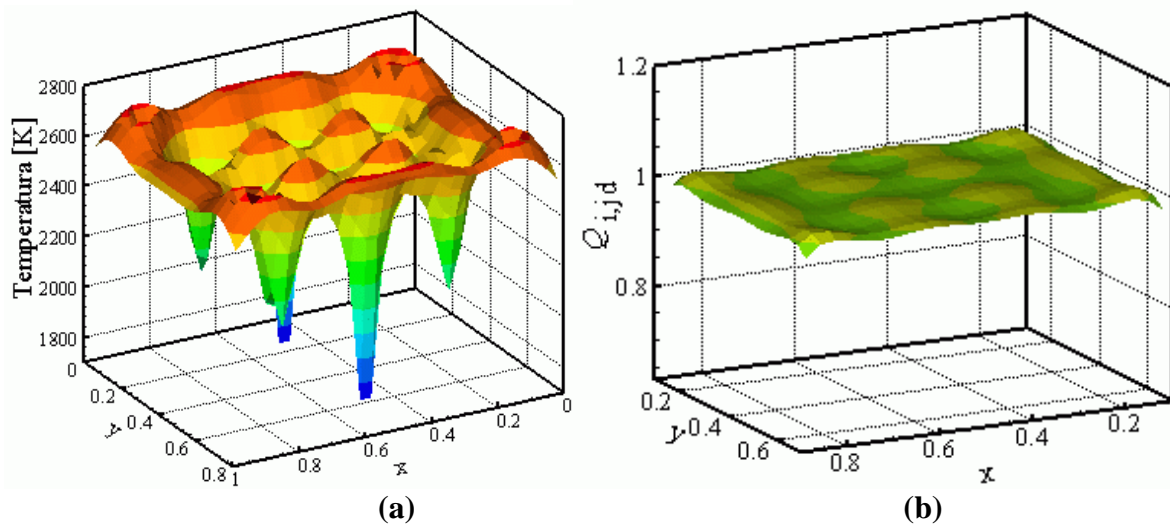


Figura 6.10 Temperatura das lâmpadas no teto (a) e conseqüente luminamento na superfície de projeto (b) para $p=12$.

Um comportamento mais estável das temperaturas pode ser conseguido ao se utilizar um menor parâmetro de regularização p . Para que isso ocorra, é natural que os desvios médio e máximo aumentem na medida em que são considerados menos valores singulares. Para $p=2$ é alcançado o desvio médio de 12,24%, e obtém-se a suave distribuição de temperaturas demonstrada na Figura 6.11. O comportamento mais estável pode ser preferido em lugar do comportamento oscilante por diversas razões. Lâmpadas comerciais dificilmente atendem a condições de temperaturas muito altas ou muito baixas. Também para outras aplicações, dificuldades podem ser encontradas, por exemplo, em situações em que a temperatura deve ser

atendida por um elemento resistivo contínuo, como é o caso de fornos elétricos. Em casos de iluminação este problema não é tão pronunciado, já que lâmpadas de filamento são elementos independentes e compactos. No entanto, em lâmpadas compridas, como é o caso de lâmpadas fluorescentes, a uniformidade de fluxo luminoso no teto passa a ser um requisito.

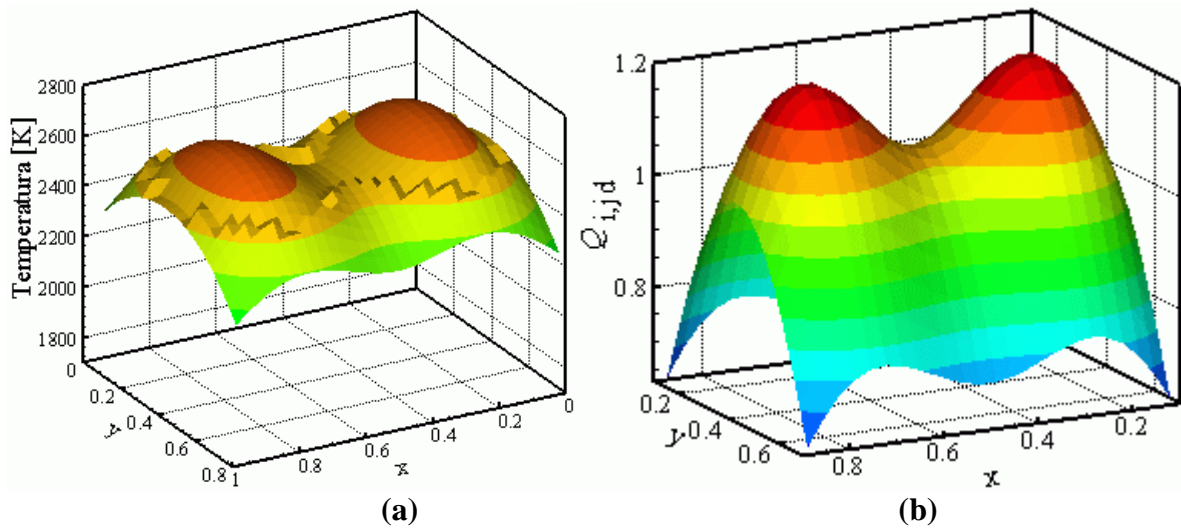


Figura 6.11 Temperatura das lâmpadas no teto (a) e conseqüente luminamento na superfície de projeto (b) para $p=2$.

Percebe-se, da análise da Tabela 6.3, que o desvio médio se mantém estável reduzindo-se o parâmetro de regularização até $p=6$, a partir do qual ocorre um aumento considerável. A Figura 6.12 mostra que $p=6$ é um valor muito adequado para o parâmetro de regularização quando se busca um compromisso entre a complexidade de distribuição de temperatura no teto e uniformidade do luminamento na superfície.

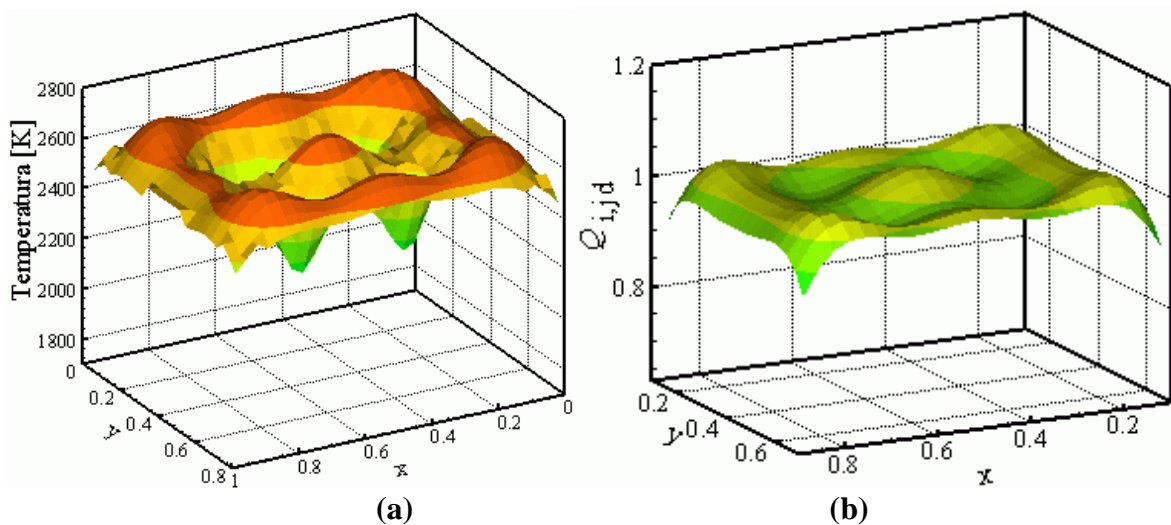


Figura 6.12 Temperatura das lâmpadas no teto (a) e conseqüente luminamento na superfície de projeto (b) para $p=6$.

Nota-se que as temperaturas para $p=6$ apresentam menor oscilação quando comparadas ao caso com $p=12$, logo, para o luminamento será obtido um comportamento oposto. A maior oscilação do luminamento resultante é obtida com $p=12$. Apesar disso, para $p=6$ tem-se um desvio médio perfeitamente aceitável de 1,48% e pode ser considerado como uma solução ótima a ser utilizada neste projeto de iluminação.

É provável que haja uma resolução para a percepção do olho humano, de maneira que a busca de um desvio médio inferior a esta resolução seria inútil. Com isso, poderia ser estabelecido um número máximo de valores singulares considerados para uma determinada configuração, poupando esforço em reproduzir uma distribuição de temperaturas no teto mais complexa do que o necessário.

6.3.2. Número limitado de lâmpadas

Em aplicações práticas de iluminação, alguns fatores como custos de instalação, de manutenção e de potência consumida devem ser levados em conta. Para ambientes com escritórios e residências, um valor de energia dispendida em iluminação por área iluminada que se busca atualmente é de 20 W/m^2 . Para outras aplicações, os custos de instalação e manutenção podem ser mais significantes. De qualquer forma, deve ser encontrado um arranjo com menor número de lâmpadas, contanto que o luminamento prescrito seja suprido dentro de limites previamente estipulados.

A primeira opção a ser analisada é o arranjo projetado segundo o método Lúmen, com 48 lâmpadas uniformemente distribuídas no teto conforme Figura 6.4. Com a mesma configuração de lâmpadas, a diferença reside em encontrar, com a análise inversa, a temperatura adequada na qual o filamento de cada lâmpada deve operar. Dessa forma, espera-se atender ao luminamento desejado com desvios menores do que na Seção 6.2.

Diferentemente dos casos apresentados na seção anterior, considera-se um número de elementos de lâmpadas menor do que o número de elementos de projetos. Nesta condição, o sistema a ser resolvido possui menor número de incógnitas do que equações, gerando assim um sistema sem qualquer solução exata. Além disso, não são obtidos valores singulares nulos, como já mostrado na Figura 6.9.

O problema semelhante ao proposto na Figura 6.4 é calculado considerando cinco valores singulares. O desvio obtido com a configuração sugerida pelo método Lúmen pôde ser drasticamente reduzido de 35% para apenas 2,81%. Para obter esta condição de uniformidade, basta utilizar na instalação os parâmetros relacionados na Tabela 6.4. Os resultados foram calculados durante quatro minutos em três iterações.

Tabela 6.4 Condições para luminamento de 900 lx e desvio de 2,81% com 48 lâmpadas uniformemente distribuídas.

Lâmpada	Fluxo líquido adimensional	Tipo de lâmpada utilizada	Temperatura (K)	Resistência em série (Ω)
1	11,50	INC100	2755,31	11,88
2	19,69	INC150	2801,32	5,60
3	18,54	INC150	2783,16	7,08
4	17,45	INC150	2764,62	8,62
5	29,42	INC200	2849,84	3,18
6	21,72	INC150	2831,91	3,17
7	13,81	INC100	2811,01	5,09
8	19,03	INC150	2791,17	6,42
9	9,47	INC100	2700,92	18,93
10	11,75	INC100	2762,48	10,98
11	18,28	INC150	2778,89	7,43
12	15,48	INC100	2847,17	0,89

Considerando a potência consumida pelas lâmpadas para gerar energia luminosa e a potência dissipada nos resistores instalados em série com cada lâmpada, a potência total da instalação é 6760 W. Caso não fosse realizada a análise inversa e fossem utilizadas as condições calculadas pelo método Lúmen, seria consumida uma potência de 7200 W. Pode-se inferir que os métodos empíricos primam pelo atendimento de uma condição mínima de iluminação no ambiente, sem comprometimento com uniformidade ou restrição de luminamento máximo, conforme pode ser visto na Figura 6.13, para comparação com a Figura 6.5.

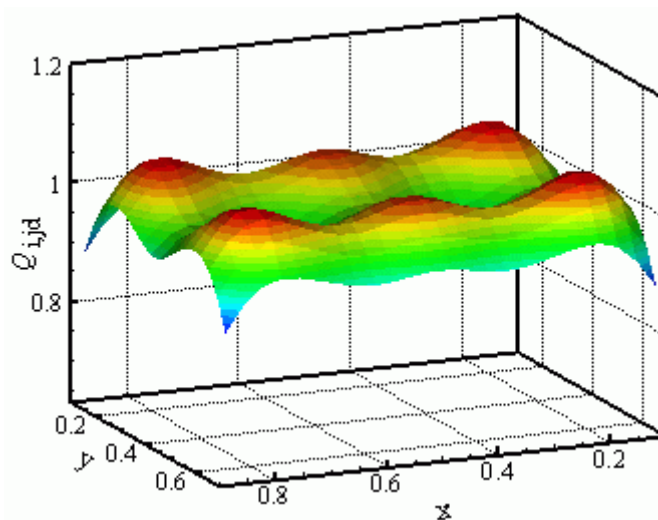


Figura 6.13 Luminamento obtido com $p=5$ para a configuração de 48 lâmpadas uniformemente distribuídas.

Quando poucas lâmpadas são consideradas, muitas vezes é possível encontrar uma solução física para o problema sem utilizar regularização TSVD. Por outro lado, a própria utilização de menos lâmpadas pode ser considerada como uma regularização. Para o caso de 48 lâmpadas acima descrito, por exemplo, a solução sem regularização atinge um desvio médio de 0,26%. O que é notável com relação a isto é atingir, com um número muito reduzido de lâmpadas (48), um desvio médio menor que aquele obtido com o teto coberto por lâmpadas (720). Em contrapartida, o consumo desta instalação é de 7126 W.

A configuração de 40 lâmpadas apresentada na Figura 6.14 foi introduzida por Schneider e França, 2004. Como será visto, trata-se de uma configuração muito interessante, na medida em que resultados muito bons são atingidos com consumos de energia relativamente baixos.

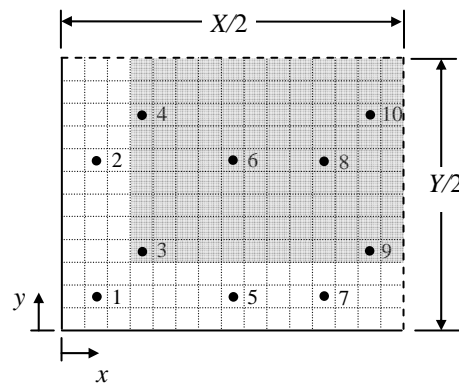


Figura 6.14 Região de simetria para uma configuração de 40 lâmpadas no teto sugerida por Schneider e França, 2004.

Considerando todos os valores singulares do problema, é possível obter um luminamento na superfície de trabalho com desvio médio de 0,84%. Esta situação pode ser utilizada para exemplificar o problema de fechamento descrito no capítulo 5, através de resultados obtidos em cada quadro do fluxograma da Figura 5.4. Após feita uma primeira estimativa para o luminamento das superfícies de projeto, a solução do problema inverso indica que a lâmpada de número 4 deve gerar um fluxo líquido adimensional conforme Figura 6.15 (a). No entanto, nesta figura pode-se notar que a temperatura a que equivale esse fluxo é diferente em cada banda, o que é fisicamente inconsistente e ocorre devido ao desacoplamento da condição prescrita. O passo seguinte, cálculo de temperatura das lâmpadas, é capaz de determinar uma única temperatura para esta lâmpada, como é mostrado na Figura 6.15 (b). O critério utilizado é que o somatório de energia em ambos os gráficos da Figura 6.15 sejam iguais.

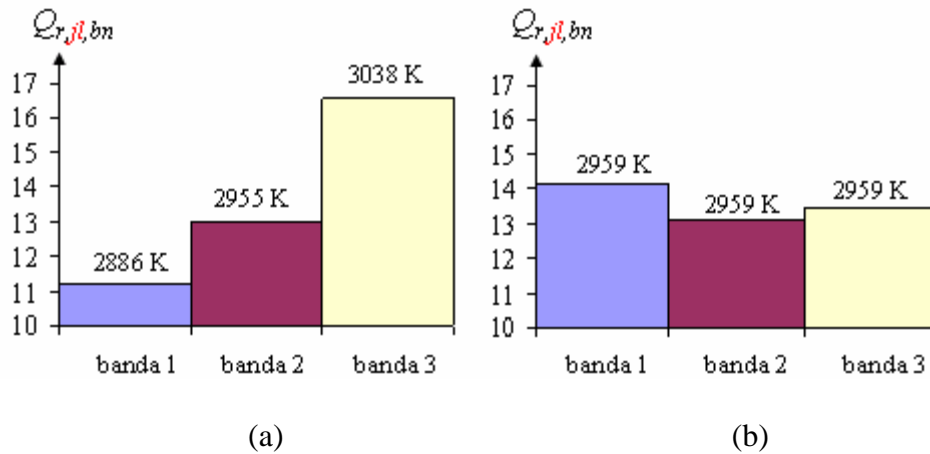


Figura 6.15 Fluxo líquido adimensional para lâmpada n°4 da Figura 6.14 (a) calculado pela análise inversa e (b) com a correção de temperatura.

Ao utilizar os dados da Figura 6.15 (b) como condição de contorno para aplicação do problema direto, obtém-se uma distribuição do luminamento adimensional na superfície de projeto. A Figura 6.16 (a) mostra o resultado pontual para o elemento de projeto localizado no centro da cavidade. Trata-se de um resultado com uma informação mais adequada quanto à correta distribuição da condição prescrita nas bandas. No entanto, devido aos erros introduzidos na solução, tanto pela regularização como pelo ajuste de temperatura das lâmpadas, o somatório dos luminamentos de cada banda resulta em um valor diferente da unidade, como era definido na condição prescrita. Por isso, é calculada uma nova distribuição que somada seja igual à unidade e que mantenha a proporcionalidade de luminamento em cada banda, como é apresentado na Figura 6.16 (b). Esta é a distribuição que será utilizada como dado de entrada na iteração seguinte.

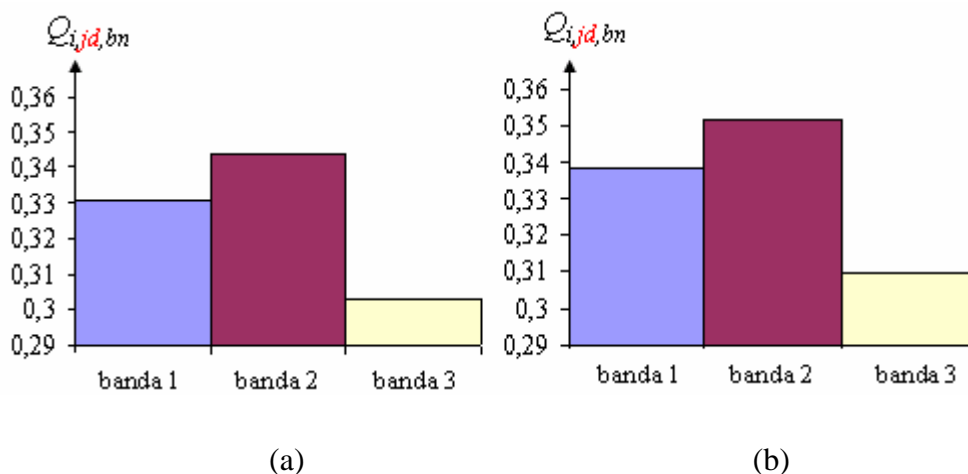


Figura 6.16 Luminamento adimensional para o elemento localizado no centro da superfície de projeto (a) calculado pela análise direta e (b) a nova distribuição.

A primeira iteração é a mais crítica, onde estes ajustes mostrados na Figura 6.15 e na Figura 6.16 são mais expressivos. Nas iterações seguintes, estes valores serão acomodados de forma mais sutil.

Para esta configuração, a lâmpada de número 4, Figura 6.15 (b), deve fornecer um fluxo luminoso superior ao que pode gerar, numa temperatura 50°C acima da sua temperatura de operação para a lâmpada de maior potência (200 W). Isto impossibilita o uso desta lâmpada pois pode queimar após pequeno período de uso ou até de imediato. É necessário, portanto, buscar uma solução com menores variações na temperatura das lâmpadas, o que é conseguido com uma redução no parâmetro de regularização utilizado. O uso de 8 valores singulares leva a uma situação na qual as lâmpadas do catálogo utilizado neste trabalho atendem as condições necessárias, como mostram os dados da Tabela 6.5. Com um desvio médio 0,98%, a potência consumida pela instalação elétrica é 6255 W. Comparando-se com o caso de 48 lâmpadas uniformemente distribuídas, tem-se um desvio médio muito semelhante entre eles, com uma economia de 870 W na configuração da Figura 6.14. Além disto, há uma redução no custo de manutenção por, esta última configuração, apresentar 8 lâmpadas a menos. A energia dispendida por área iluminada neste caso se reduz para 78 W/m^2 .

A Tabela 6.5 mostra que a lâmpada de número 10, com potência nominal 60 W, possui um fluxo líquido adimensional bem menor em relação às demais lâmpadas. Logo, pode-se supor que a mesma não exerce grande influência no sistema de iluminação e, assim, retirá-la da configuração. Somente com as luminárias numeradas de 1 a 9, em um total de 36 lâmpadas no ambiente, percebe-se um decaimento mais acentuado dos valores singulares (Figura 6.17), evidenciando um mal-condicionamento mais acentuado, elevando o desvio médio de 0,98% para 1,34%. Quanto ao consumo, tem-se uma redução para 6207 W, representando uma economia de 50 W em relação à configuração completa. Note que foram retiradas quatro lâmpadas de 60 W e uma redução de apenas 50 W foi conseguida. Isto se dá pois, ao retirar uma lâmpada da configuração, ocorre um rearranjo de fluxo luminoso nas lâmpadas restantes, bem como nas resistências em série que dissipam potência não aproveitada. Mesmo sem uma economia significativa, esta configuração possui um custo ainda menor de manutenção por possuir 4 lâmpadas a menos para reposição. Deve-se, portanto, ponderar estes fatores em cada projeto realizado para chegar à melhor configuração.

Tabela 6.5 Condições para luminamento de 900 lx e desvio de 0,98% com 40 lâmpadas distribuídas conforme Figura 6.14.

Lâmpada	Fluxo líquido adimensional	Tipo de lâmpada utilizada	Temperatura (K)	Resistência em série (Ω)
1	17,09	INC150	2758,67	9,12
2	12,00	INC100	2768,89	10,18
3	30,45	INC200	2860,98	2,52
4	33,85	INC200	2895,39	0,55
5	34,03	INC200	2897,45	0,44
6	17,91	INC150	2773,01	7,92
7	15,12	INC100	2839,77	1,73
8	27,49	INC200	2828,63	4,43
9	23,09	INC150	2851,52	1,65
10	7,71	INC60	2765,76	4,27

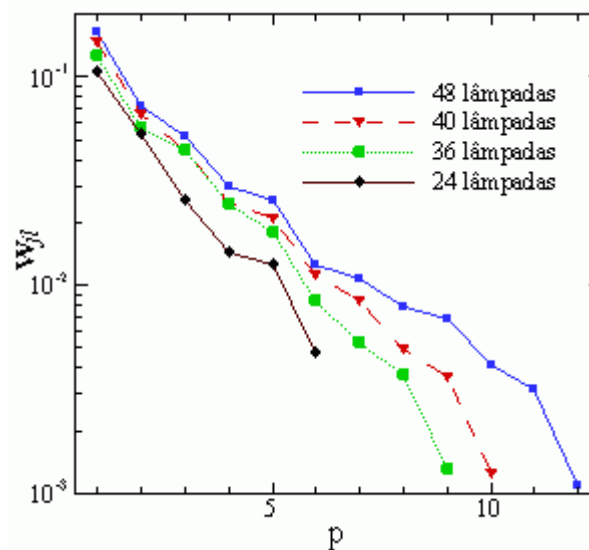


Figura 6.17 Valores singulares para quatro arranjos abordados na seção 6.3.2.

Com a finalidade de reduzir os custos pelo consumo de energia elétrica das lâmpadas, é natural que se utilizem cores claras nas paredes. Desta forma, é aumentada a refletividade das mesmas para que a energia luminosa atinja mais facilmente a superfície de trabalho. Suponha-se que as paredes da cavidade considerada até o momento sejam pintadas com cores claras, de tal forma que o comportamento espectral deste revestimento seja tal qual o mostrado na Figura 6.18. Para o arranjo de 40 lâmpadas o consumo de energia elétrica atingido com superfícies mais claras é notável. Há uma redução de praticamente 50%, de 6255 W para 3700 W.

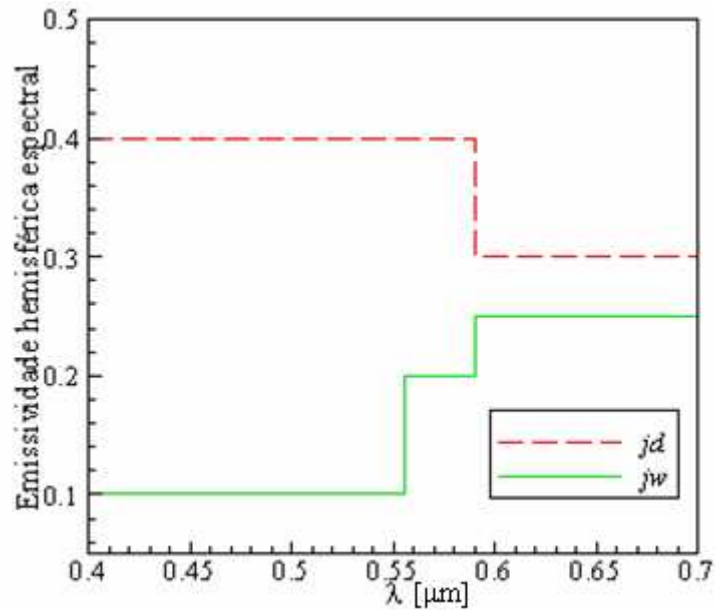


Figura 6.18 Emissividade espectral hemisférica para superfícies claras.

Em projetos que não exigem uma iluminação elevada, em torno de 400 lx, como em auditórios ou em ambientes de cultivo de alguns tipos de plantas, um arranjo alternativo deve ser buscado para atender esta condição. Do contrário, um número excessivo de lâmpadas é instalado, enquanto que poucos pontos de iluminação seriam suficientes. Dentre diversas instalações calculadas, aquela mostrada na Figura 6.19 apresenta resultados muito interessantes quanto à potência consumida, número de lâmpadas e desvio médio. Utilizando apenas 24 lâmpadas, esta configuração atende ao luminamento 400 lx sem necessidade de regularização e com desvio de 2,63%. Os dados completos do sistema são apresentados na Tabela 6.6.

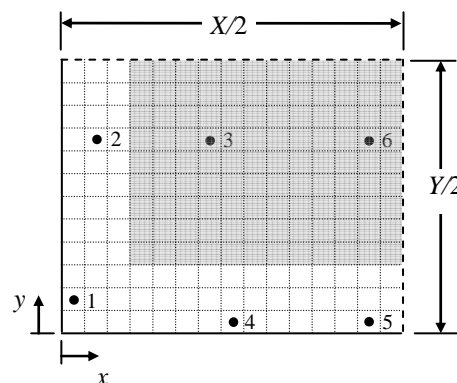


Figura 6.19 Região de simetria para uma configuração de 24 lâmpadas no teto para baixos valores de luminamento.

Desta forma, este sistema apresenta um consumo de 3828 W nas 24 lâmpadas instaladas. Comparando com o sistema que utiliza 40 lâmpadas, como mostra a Figura 6.14, o consumo é apenas 10% menor, o que não é tão impressionante pela grande diferença do número de

lâmpadas. Entretanto, por contar com 16 lâmpadas a menos, o custo de manutenção passa a ser imperativo e faz com que este sistema seja preferível em muitas situações.

Tabela 6.6 Resultados para o arranjo de 24 lâmpadas e luminamento de 400 lx.

Lâmpada	Fluxo líquido adimensional	Tipo de lâmpada utilizada	Temperatura (K)	Resistência em série (Ω)
1	58,45	INC200	2814,06	5,31
2	30,28	INC100	2799,72	6,43
3	44,42	INC150	2799,64	5,73
4	59,31	INC200	2818,33	5,05
5	35,84	INC150	2739,44	10,76
6	29,55	INC100	2792,24	7,33

6.3.3. Análise de luminamento por bandas

Ao se considerar o comportamento espectral das propriedades de superfícies, é possível se obter resultados mais corretos em comparação com a modelagem de superfícies cinzas. Além disso, pode-se observar a intensidade de radiação em cada banda separadamente e realizar uma análise de cores.

Para a configuração com 40 lâmpadas foi utilizada uma discretização do espectro eletromagnético em cinco bandas. A Figura 6.20 mostra as características espectrais das superfícies então consideradas. Percebe-se que as superfícies se apresentam muito refletivas, ou claras, na extremidade do intervalo visível, enquanto que na região central o comportamento é mais absorvedor. Para esta análise é conveniente utilizar somente um modelo de lâmpada. Foi escolhida aquela de maior fluxo luminoso, INC200.

São testadas duas condições prescritas de luminamento na superfície de trabalho. Inicialmente, um luminamento de 1200 lx que, conforme visto na Seção 2.7, é o ideal para tarefas de inspeção ou indústria de roupas, indicado também para cultivo de algumas plantas como a Araucária. Em seguida considera-se um luminamento baixo, de 300 lx, indicada para trabalhos visuais limitados como maquinaria e auditórios.

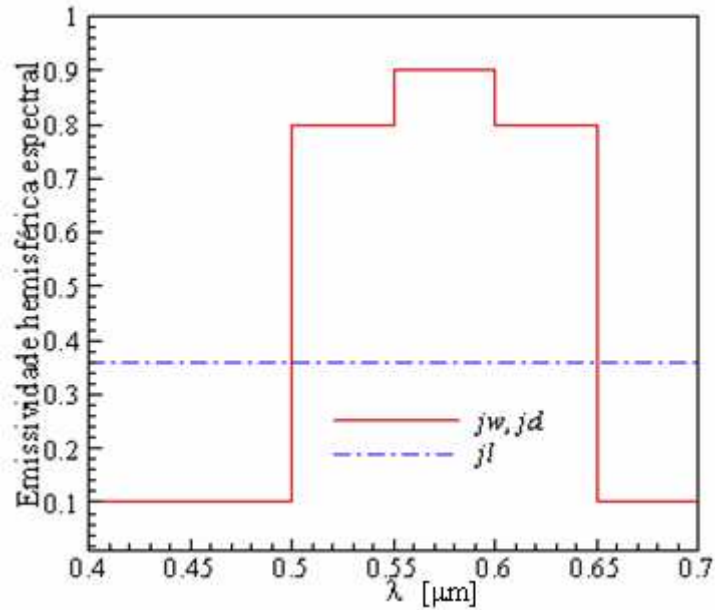


Figura 6.20 Emissividade espectral hemisférica dividida em cinco bandas.

Como pode ser observado na Figura 6.21, uma distribuição com boa uniformidade (desvio médio de 0,88%) é encontrada. O luminamento total adimensional é idêntico para ambos os casos devido à adimensionalização utilizada. No entanto, há diferença quanto à distribuição deste luminamento nas bandas consideradas. Tomando-se um ponto qualquer na superfície de projeto, é possível analisar a energia luminosa incidente. Para o ponto ($x=0,5$; $y=0,5$), a Figura 6.22 mostra o luminamento para as duas condições prescritas, 1200 lx e 300 lx.

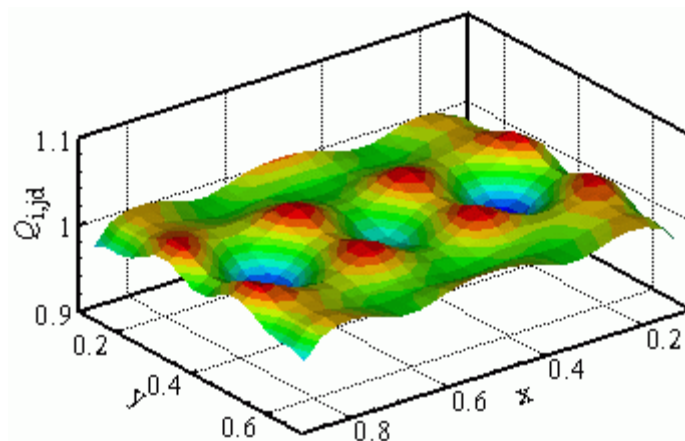


Figura 6.21 Luminamento obtido para arranjo com 40 lâmpadas.

Da Figura 6.22 infere-se que, para um luminamento mais intenso encontram-se temperaturas mais elevadas nas lâmpadas instaladas no teto, de modo que a emissão radiante das mesmas é deslocada para comprimento de ondas menores. Esta é exatamente a fonte de não-linearidade do sistema com superfícies não-cinzas.

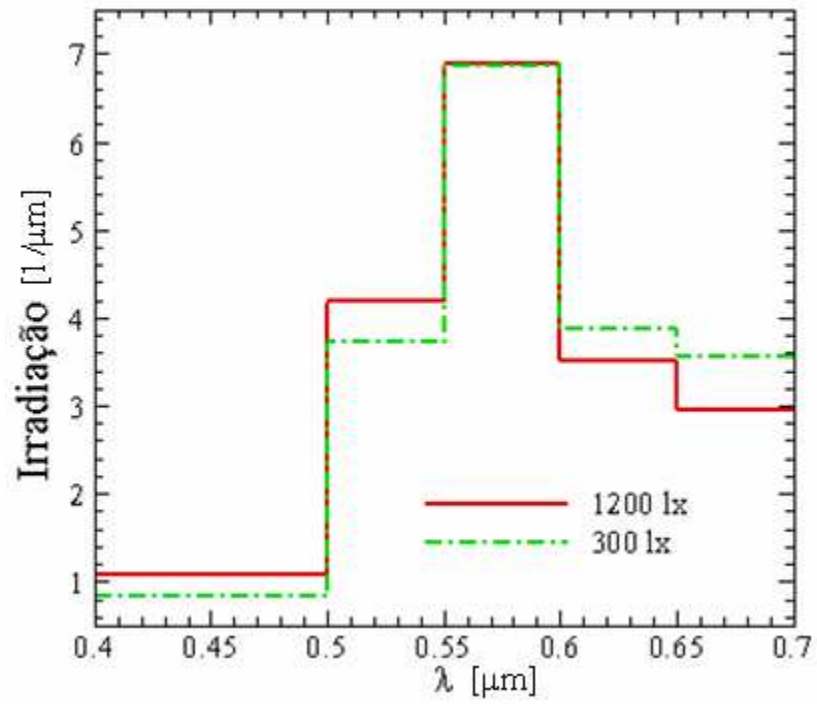


Figura 6.22 Distribuição de luminamento no espectro visível para ponto ($x=0,5$; $y=0,5$).

7. CONCLUSÕES

A metodologia proposta nesta dissertação de mestrado para lidar com o sistema mal-condicionado de equações não-lineares, resultante da análise inversa do problema de iluminação em sistemas com superfícies não-cinzas, foi capaz de gerar resultados satisfatórios. A metodologia se mostrou consideravelmente estável, não sendo necessário nenhum tipo de sub-relaxação numérica entre os passos iterativos para a correção da distribuição de energia luminosa entre as bandas. Para os casos apresentados no Capítulo 6, não mais que três iterações foram necessárias para que a energia radiante fosse distribuída de forma coerente nas bandas. A metodologia se mostrou robusta o suficiente para se considerar até cinco bandas espectrais. Entretanto, diante do comportamento estável da solução, pode-se inferir que um número ainda maior de bandas possa ser considerado pela metodologia, dependendo apenas da capacidade computacional disponível.

Os problemas inversos em cavidades radiantes com superfícies não-cinzas podem ser resolvidos de forma eficaz com a metodologia proposta no presente trabalho. As aplicações podem envolver tanto as áreas de iluminação, como aplicações industriais em fornos, vasos, torres, etc. Para isso, deve-se acoplar ao sistema de equações as relações que incluem a convecção e o meio participante.

No que tange especificamente aos projetos de iluminação, foi apresentada uma revisão detalhada das informações relevantes dessa área, motivada pela carência de uma compilação consistente e completa do assunto na bibliografia. Por se tratar de uma área do conhecimento na qual historicamente os conceitos e cálculos são tomados de forma empírica, este trabalho contribuiu para formalizar algumas relações de iluminação, definindo coerentemente as unidades fundamentais de iluminação e apresentado uma modelagem matemática da visão humana e das lâmpadas incandescentes.

Além de demonstrar a capacidade da metodologia de lidar com superfícies não-cinzas, as situações de projeto apresentadas no Capítulo 6 mostram como os métodos empíricos utilizados para o cálculo de iluminação de ambientes podem gerar resultados com grande desvio da condição prescrita, além de uma condição de pouca uniformidade. Em situações que exigem limites estreitos de desvio de uma dada condição, a metodologia de solução empregada neste trabalho deve ser utilizada. Além disso, os resultados apresentados mostram que é possível alcançar uma redução significativa de custos de instalação ou de custos de consumo energético quando o sistema é tratado como um problema inverso.

7.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho abre algumas frentes de pesquisa. Quanto à metodologia proposta para solução de cavidades radiantes com superfícies não-cinzas, propõe-se:

- Testar os limites de aplicabilidade da metodologia quanto ao número de bandas espectrais consideradas;

- Estender esta metodologia a aplicações industriais onde a radiação seja um fenômeno de troca de calor significativo. Para isto seria necessário remover as transformações de quantidades radiantes em quantidades luminosas, como apresentado no Capítulo 5 e, para casos em que o meio deva ser considerado participante, acoplar ao problema inverso de radiação térmica o fenômeno de convecção;

- Implementar uma técnica de otimização de posicionamento de lâmpadas, evitando assim a técnica de tentativa-e-erro utilizada.

Quanto aos projetos de iluminação, propõe-se:

- Considerar no projeto de iluminação um sistema de cores, podendo assim estabelecer a cor a ser percebida em cada ponto de interesse a partir da distribuição de energia nas bandas.

- Desenvolver a modelagem espectral de outros tipos de lâmpadas para ampliar a aplicabilidade do método. Entre elas, destacam-se as lâmpadas fluorescentes, por serem utilizadas extensivamente em ambientes profissionais e residenciais, atento às dificuldades de ajuste da potência das mesmas.

- Sugere-se ainda a montagem de um experimento para testar os resultados produzidos pelas simulações. Seria interessante comparar o efeito sobre plantas, que são sensíveis aos níveis de iluminação, quando expostas a um arranjo de lâmpadas projetado com um método convencional e quando expostas a um arranjo projetado conforme sugerido neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, 1992. **“Iluminância de Interiores”**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Barroso, L.C., Barroso, M.M.A., Campos, F.F.fº, Carvalho, M.L.B., Maia, M.L., 1983. **“Cálculo numérico”**. Harper & Row do Brasil, São Paulo.
- CDEF, 2006. **“Clínica dermatológica Prof. Emmanuel França”**. Brasil. Disponível em <http://www.emmanuelfranca.com.br>. Acessado em outubro de 2006.
- 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.
- 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, 2002. **“Empresa de Equipamento Eléctrico SA”**. Águeda, Portugal. Disponível em <http://www.eee.pt>.
- 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.
- França, F.H.R., Howell, J.R., 2005. **“Transient inverse design of radiative enclosures for thermal processing of materials”**. Inverse Problems in Science and Engineering, vol. 14, num. 4, pp. 423-436, Taylor & Francis.
- 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.

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

Gubareff, G.G., Janssen, J.E., Torborg, R.H., 1960. **“Thermal Radiation Properties Survey”**. Honeywell Research Center, Minneapolis, Minnesota. Citado por: Kreith, F., 1977. **“Princípios de Transmissão de Calor”**. Editora Edgard Blücher, 3^a ed., São Paulo.

Hansen, P.C., 1998. **“Rank-deficient and discrete ill-posed problems: numerical aspects of linear inversion”**. Siam – Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.

Hewitt, E.J., 1966. **“Sand and Water Culture Methods Used in the Study of Plant Nutrition”**. Commonwealth Agricultural Bureaux, 2^a ed., Inglaterra.

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*, série B, vol. 46, n^o 4, pp. 470-478.

IESNA - *Illuminating engineering society of North America*, 2000. **“The IESNA lighting handbook: reference & application”**, 9^a ed., Nova Iorque.

Iida, I., 1990. **“Ergonomia. Projeto e execução”**. Editora Edgard Blücher, São Paulo.

INMETRO, 2003. **“Sistema Internacional de Unidades - SI”**, 8^a ed., Rio de Janeiro.

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.

Lorenzi, H., Souza, H.M., 1999. **“Plantas ornamentais do brasil”**. Insituto Plantarum, 2^a ed., Nova Odessa, São Paulo.

Matsumura, M., 1997. **“Optimal Design of Industrial Furnaces by Using Numerical Solution of the Inverse Radiation Problem”**. Dissertação de Mestrado, Department of Mechanical Engineering, The University of Texas at Austin, Texas.

Matsumura, M., Morales, J.C., Howell, J.R., 1998. **“Optimal Design of Industrial Furnaces by Using Numerical Solution of the Inverse Radiation Problem”**. Proceedings of the International Gas Research Conference, San Diego.

Mental Help, 2006. **“Mental Help”**. Brasil. Disponível em <http://www.mentalhelp.com>. Acessado em outubro de 2006.

Moraes, A., Pequini, S.M., 2000. **“Ergodesign para trabalho em terminais informatizados”**. Editora 2AB, Rio de Janeiro.

Morales, J.C., 1998. **“Radiative Transfer within Enclosures of Diffuse Gray Surfaces: The Inverse Problem”**. Tese de doutorado, Department of Mechanical Engineering, The University of Texas at Austin, Texas.

Morales, J.C., Harutunian, V., Oguma, M., Howell, J.R., 1996. **“Inverse Design of Radiating Enclosures with an Isothermal Participating Medium”**. Radiative Transfer I:- Proceedings of the First International Symposium on Radiative Heat Transfer, pp. 579-593, Begell House.

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”**. <http://www.osram.com.br>.

Phillips Lighting Division, 1981. **“Manual de iluminação”**. Centro de Projetos de Iluminação da Phillips Division, 3^a ed., Holanda.

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

Schneider, P.S., França, F.H.R., 2004. **“Inverse Analysis Applied to an Illumination Design”**. Proceedings of ENCIT 2004, CIT04-0306. ABCM, Rio de Janeiro.

Siegel, R., Howell, J.R., 2002. **“Thermal radiation heat transfer”**, Taylor & Francis, 4^a ed., Nova Iorque.

Silva Neto, A.J., 2005. **“Problemas Inversos: Aplicações em Engenharia e Medicina”**. Instituto Politécnico – UERJ.

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

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.