

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

ANÁLISE INVERSA APLICADA NO DIMENSIONAMENTO DE ILUMINAÇÃO
ARTIFICIAL EM AMBIENTES

por

Alexandro da Silva Santos

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 4 de agosto de 2010

ANÁLISE INVERSA APLICADA NO DIMENSIONAMENTO DE ILUMINAÇÃO
ARTIFICIAL EM AMBIENTES

por

Alexandro da Silva Santos
Matemático

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 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: Paulo Smith Schneider

Coorientador: Francis Henrique Ramos França

Aprovada por:

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer, PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Bardo Ernst Bodmann, DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Heitor da Costa Silva, PROPAR / UFRGS

Prof. Dr. Horácio A. Vielmo
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 4 de agosto de 2010

Dedico este trabalho a Deus, que nos momentos mais difíceis fez com que tornasse possível a conclusão do trabalho, e a Valdir Luis Santos, que em algum lugar do céu, esteve sempre mandando energias positivas.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Paulo Smith Schneider, por buscar sempre estabelecer uma linguagem simples e precisa no desenvolvimento do trabalho.

Ao coorientador Francis Henrique Ramos França, pela dedicação e orientação precisa, buscando mostrar que desenvolver uma dissertação de mestrado, todos os momentos são importantes no aperfeiçoamento do mestrando.

Ao colega Fabiano Cassol, pelo auxílio e paciência, contribuindo de forma importante para a realização do trabalho.

A Tórgan Siqueira, pela ajuda na formatação do trabalho.

A Jair Gilberto Kray, por disponibilizar um local para o desenvolvimento do trabalho.

Ao casal Silvia e Almiro, pela força e sempre acreditarem que era possível.

À CAPES, pela concessão da bolsa.

RESUMO

No desenvolvimento de projetos de iluminação de ambientes, um dos objetivos que se destaca é a busca pelo conforto visual, que emprega metodologias de resolução conhecidas, como o Método dos Lumens e o Método Ponto a Ponto. A luz visível está contida no espectro da radiação térmica e, portanto, o fluxo luminoso pode ser relacionado ao fluxo de radiação térmica. Determinar as posições e as competências das fontes de luz necessárias na superfície de projeto ganha importância quando o comportamento, em termos de uniformidade ou de fluxo radiante, é especificado. O presente trabalho visa a estabelecer diferentes valores de fluxo em duas regiões distintas da superfície do projeto. Por meio do posicionamento das fontes de luz, é estabelecido um fluxo maior na região denominada principal e um fluxo menor na região denominada secundária. A modelagem matemática da radiação térmica (Método das Radiosidades) é aplicada ao projeto de iluminação, considerando-se as características da visão humana e o comportamento das fontes de luz. Na modelagem, é considerada uma cavidade retangular tridimensional com superfícies cinza e com condição de parede fria, na qual o poder emissivo das paredes é nulo. As fontes de luz são representadas por unidades de malha no teto. A relação de equações é resolvida por metodologia inversa, usando o algoritmo de Otimização Extrema Generalizada (GEO). Este algoritmo é classificado como um método de otimização estocástica de busca global para a resolução de sistemas considerados inicialmente mal condicionados. A posição e a potência das fontes luminosas são determinadas pela resolução do sistema de equações, de forma a proporcionar um fluxo de radiação duas vezes maior na região principal em relação à região secundária. A função objetivo do processo consiste em minimizar a diferença entre o fluxo desejado e os valores de fluxo de radiação incidente nas duas regiões da superfície de projeto. Em virtude das características de simetria do problema, a relação é estabelecida para apenas um quarto da cavidade. Assim, por exemplo, aplicar a metodologia com 9 fontes de luz a um quarto da região resulta em 36 fontes de luz em toda a cavidade. Os resultados mostram que é possível encontrar um arranjo de fontes de luz preestabelecendo-se duas condições de potência.

Palavras-chave: Análise Inversa, Otimização Extrema Generalizada, Fluxo Radiante.

ABSTRACT

In the development of environmental illumination projects, one of the main goals to be achieved is the visual comfort, which is usually done by known methodologies, like the Lumens Method and the Point by Point Method. Since the visible light is contained in the spectrum of thermal radiation, the luminous flux can be related to the thermal radiation flux. The determination of the position and power of the light sources required by the design surface gains an higher importance whenever a behavior is specified, should it be in terms of uniformity or in terms of radiant flux. In this work, we describe a method that allows the establishment of different flux values in two distinct regions of the design surface, which are referred by the names main region and secondary region. Through the spatial arrangement of the light sources, the method sets a more intense flux in the main region and a less intense one in the secondary region. The mathematical model of thermal radiation, known as Radiosity Method, is applied to the illumination design, along with the characteristics of the human vision and the behavior of light sources. In this model, a rectangular three-dimensional cavity is considered. It has gray surfaces and exhibits the conditions of a cold wall, in which the emissivity power of the walls is null. The light sources are represented by a mesh unit in the ceiling. The system of equations is solved by inverse methodology, using the Generalized Extremal Optimization (GEO) algorithm. This algorithm is classified as being a stochastic optimization method of global search to solve systems that are initially considered ill-conditioned. By solving this system, the position and power of light sources can be determined, and this is done in such a way that the flux radiation in the main region is twice more intense than the one in the secondary region. The target function of the whole process is to minimize the difference between the desired flux and the incident flux radiation values for each one of the two design surface regions. We further explore the problem symmetry, solving the equation system for only a quarter of the cavity. This way, if the methodology is applied with nine light sources into a quarter of the region, the entire cavity will behave as if it has 36 light sources. Our results show that, given two prescribed conditions of power, it is possible to find an arrangement of light sources.

Keywords: Inverse Analysis, General Extremal Optimization Method, Flux Radiation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Revisão Bibliográfica	4
1.4	Organização do Trabalho	7
2	INTRODUÇÃO À RADIAÇÃO TÉRMICA	9
2.1	Definições	10
2.1.1	O Corpo Negro - Um Perfeito Emissor e Absorvedor de Radiação	10
2.1.2	Trocas Radiantes Entre Superfícies	17
2.1.3	Trocas Radiantes em Cavidades: Método das Radiosidades	19
2.2	Estratégia de Solução	23
3	FUNDAMENTOS DA ILUMINAÇÃO	27
3.1	Unidades Fundamentais da Iluminação	28
3.2	O Sentido da Visão	29
3.3	Especificações de Iluminação	32
3.4	Métodos Para Projeto de Iluminação	33
4	SOLUÇÃO DE PROBLEMAS INVERSOS	36
4.1	Métodos de Regularização	38
4.2	Algoritmos de Otimização	38
4.3	Método da Otimização Extrema Generalizada	41
4.3.1	Aplicação do Algoritmo da Otimização Extrema Generalizada	43

4.3.2	Variáveis e Restrições no Método da Otimização Extrema Generalizada . . .	45
5	METODOLOGIA DE SOLUÇÃO	47
5.1	Formulação do Problema	49
5.2	Balanco de Energia	51
5.3	Avaliação da Metodologia	52
6	RESULTADOS	53
6.1	Independência de Malha	53
6.2	Resultados de Métodos Tradicionais de Iluminação	54
6.3	Projeto Inverso de Iluminação	58
6.4	Função Objetivo	58
6.5	Determinação do Parâmetro τ	61
6.6	Resultados dos Três Casos Simulados	61
6.6.1	Resultados para o Caso A	64
6.6.2	Resultados para o Caso B	71
6.6.3	Resultados para o Caso C	78
7	CONCLUSÕES	85
7.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	O espectro eletromagnético	9
Figura 2.2	Comparação entre a emissão superficial de um corpo negro e a de uma superfície real	11
Figura 2.3	Lei do cosseno de Lambert para emissão direcional	12
Figura 2.4	Intensidade de radiação do elemento de área dA através do ângulo sólido $d\omega$	12
Figura 2.5	Radiosidade de uma superfície	14
Figura 2.6	Energia incidente em um elemento de área	15
Figura 2.7	Cavidade composta por N superfícies	18
Figura 2.8	Abordagens de balanço energético em uma superfície.	21
Figura 2.9	Planos de um sistema bem condicionado 3x3 com determinante normalizado igual a 0,8	24
Figura 3.1	Definição de candela	28
Figura 3.2	Seção transversal do olho humano	30
Figura 3.3	Eficiência luminosa fotópica (V_λ) para os diferentes comprimentos de onda	31
Figura 4.1	Fluxograma do processo de cálculo direto	36
Figura 4.2	Ideia básica dos métodos de regularização	38
Figura 4.3	Comparação entre o método direto e o inverso regularizado	39
Figura 4.4	Técnicas numéricas para uso em problemas de otimização	41
Figura 4.5	N variáveis de projeto codificadas em uma sequência binária	42
Figura 5.1	Cavidade considerada no problema	47
Figura 6.1	Cavidade com plano de simetria considerado	53

Figura 6.2	Arranjo para a instalação de 36 lâmpadas segundo o Método dos Lumens	55
Figura 6.3	Representação da malha numérica utilizada	56
Figura 6.4	Distribuição do fluxo incidente sobre o plano de projeto, pelo Método dos Lumens	57
Figura 6.5	Distribuição do fluxo luminoso pelo programa WinElux	57
Figura 6.6	Casos considerados para o problema: (a) Caso A; (b) Caso B; (c) Caso C.	59
Figura 6.7	Busca do valor de τ para o Caso A	62
Figura 6.8	Busca do valor de τ para o Caso B	62
Figura 6.9	Busca do valor de τ para o Caso C	62
Figura 6.10	Caso A. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 1$	65
Figura 6.11	Caso A. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,9$	66
Figura 6.12	Caso A. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,8$	67
Figura 6.13	Caso A. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,7$	68
Figura 6.14	Caso A. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,6$	69
Figura 6.15	Caso A. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,5$	70
Figura 6.16	Caso B. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 1$	72
Figura 6.17	Caso B. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,9$	73
Figura 6.18	Caso B. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,8$	74
Figura 6.19	Caso B. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,7$	75
Figura 6.20	Caso B. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,6$	76
Figura 6.21	Caso B. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,5$	77
Figura 6.22	Caso C. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 1$	79
Figura 6.23	Caso C. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,9$	80

Figura 6.24	Caso C. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,8$	81
Figura 6.25	Caso C. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,7$	82
Figura 6.26	Caso C. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,6$	83
Figura 6.27	Caso C. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,5$	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Grandezas de iluminação com suas unidades e símbolos	29
Tabela 3.2	Cores do espectro visível	31
Tabela 3.3	Iluminância por classe de tarefas visuais, conforme a norma NBR 5413 .	32
Tabela 3.4	Variáveis de projeto para o Método dos Lumens	34
Tabela 3.5	Catálogo de lâmpadas incandescentes	35
Tabela 6.1	Dados de projeto para aplicação do Método dos Lumens	54
Tabela 6.2	Fluxos de iluminação no plano de trabalho calculados pelo Método das Radiosidades	56
Tabela 6.3	Fluxos de iluminação no plano de trabalho calculados pelo programa WinElux	57
Tabela 6.4	Dados empregados para a otimização com o método GEO	60
Tabela 6.5	Resultados para os casos propostos	63
Tabela 6.6	Resultados para o Caso A com diversos valores de α	64
Tabela 6.7	Resultados para o Caso B com diversos valores de α	71
Tabela 6.8	Resultados para o Caso C com diversos valores de α	78

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

CG	<i>Conjugated Gradient</i> - Gradiente Conjugado
DTC	<i>Dynamic Texture Coefficient</i> - Coeficiente de Textura Dinmico
EO	<i>Extremal Optimization</i> - Otimizao Extrema
GEO	<i>Generalized Extremal Optimization</i> - Otimizao Extrema Generalizada
IRFET	<i>Illumination Robust Feature Extraction Transform</i>
SI	Sistema Internacional de Unidades
SOC	<i>Self-Organized Criticality</i> - Criticalidade Auto-Organizada
TSVD	<i>Truncated Singular Value Decomposition</i> - Decomposio por Valores Singulares Truncada

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>A</i>	Área, m ²
<i>A</i>	Função
A	Matriz de coeficientes
<i>a</i>	Elementos da matriz A
<i>a</i>	Coefficiente numérico, adimensional
b	Vetor independente
<i>b</i>	Elementos do vetor b
<i>b</i>	Coefficiente numérico, adimensional
<i>bal</i>	Balanço relativo global, adimensional
<i>C</i>	Configuração de bits, adimensional
<i>C</i> ₁	Constante de radiação, W · μm ⁴ /m ² · sr
<i>C</i> ₂	Constante de radiação, μm · K
<i>c</i>	Velocidade da luz, m/s
<i>c</i>	Coefficiente adimensional, adimensional
<i>c</i> ₀	Velocidade da luz, m/s
<i>bal</i>	Valor do balanço global de energia da solução, adimensional
<i>bn</i>	Banda, intervalo discreto do espectro
<i>d</i>	Coefficiente adimensional, adimensional
<i>desvio</i>	Valor do desvio da solução, adimensional
<i>e</i>	Poder emissivo, W/m ²
<i>erro</i>	Valor de erro considerado na solução, adimensional

F	Fator de forma, adimensional
F	Função objetivo
f	Função
g	Função
h	Constante de Planck, $J \cdot s$
h	Função
I	Corrente elétrica, A
i	Intensidade de radiação, $W/m^2 \cdot \mu m$
j	Superfície qualquer de uma cavidade
jd	Superfície de projeto
jl	Superfície de lâmpadas
jw	Superfície de parede
k	Constante de Boltzmann, J/K
k	Superfície qualquer de uma cavidade
L	Variável qualquer
l_i	Indica o próximo número inteiro a dada variável
M	Número de equações
m	Número de bits, adimensional
N	Número de incógnitas
n	Número de lâmpadas
P	Potência elétrica, W
P	Função
p	Precisão, adimensional

Q	Iluminância ou fluxo adimensional, adimensional
q	Taxa de energia, W
q''	Iluminância ou fluxo radiante, lx, W/m ²
q''_i	Irradiação, W/m ²
q''_o	Radiosidade, W/m ²
q''_r	Fluxo radiante, W/m ²
R	Resistência elétrica, Ω
r	Raio ou distância, m
S	Distância entre duas superfícies, m
T	Temperatura, K
t	Tempo, s
U	Tensão elétrica, V
U	Conjunto numérico
V	Tensão elétrica, adimensional
V_λ	Eficiência luminosa fotópica, s ⁻¹
X	Comprimento, m
\mathbf{x}	Vetor solução
x	Posição relativa no comprimento, adimensional
x	Variável real
x^T	Conjunto numérico
Y	Largura, m
y	Posição relativa na largura, adimensional
Z	Altura, m

z Posição relativa na altura, adimensional

SÍMBOLOS GREGOS

α Absortividade, adimensional

α Parâmetro de regularização, adimensional

α Peso dado na função objetivo, adimensional

β Norma das linhas da matriz **A**

γ Número da iteração, adimensional

δ Variável real

Δ Diferença entre variável inicial e final

ε Emissividade, adimensional

ζ Critério de convergência, adimensional

η Fator de utilização, adimensional

θ Ângulo zenital, rad

ι Número total de superfícies que formam uma cavidade, adimensional

κ Índice do recinto, adimensional

λ Comprimento de onda, m

ν Frequência de radiação, V

ξ Erro admitido, adimensional

π Constante pi, adimensional

ρ Refletividade, adimensional

τ Transmissividade, adimensional

τ Parâmetro de regularização, adimensional

φ	Ângulo azimutal, rad
Φ	Fluxo radiante da lâmpada, lm
ω	Ângulo sólido, sr
Π	Fator de depreciação
Ω	Função

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
d	Superfície de projeto
e	Quantidade emitida por uma superfície
fil	Filamento da lâmpada incandescente
i	Quantidade incidente em uma superfície
i	Referente à configuração atual
i_{inf}	Referente ao limite inferior
i_{sup}	Referente ao limite superior
i_{10}	Indica variável decimal
j	Elemento de superfície
jd	Elemento da superfície de projeto
jl	Elemento da superfície de lâmpada

jw	Elemento da superfície de parede
L	Lâmpada
l	Lâmpada
<i>melhor</i>	Referente à melhor configuração
<i>médio</i>	Referente ao valor médio
<i>máximo</i>	Referente ao valor máximo
N	Direção normal à direção considerada
o	Quantidade que deixa uma superfície
op	Grandeza no ponto de operação
<i>parede</i>	Superfície de parede
<i>piso</i>	Superfície de piso
r	Quantidade líquida em uma superfície
<i>ref</i>	Valor de referência ou prescrito
S	Ligação em série no circuito elétrico
<i>teto</i>	Superfície de teto
<i>total</i>	Valor total
w	Parede
θ	Dependência da orientação do ângulo sólido $d\omega$, definida por θ e φ (por simplicidade, é ocultado φ no subíndice)
λ	Dependência do comprimento de onda
λ_i	Início do comprimento de onda
λ_f	Final do comprimento de onda

SUPERÍNDICES

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

1 INTRODUÇÃO

Ao se desenvolver um projeto de iluminação, busca-se ideais de dimensionamento que resultem em conforto visual na região. Nestes projetos, alguns métodos se destacam, tais como o Método dos Lumens e o Método Ponto a Ponto. O Método dos Lumens é muito utilizado por ter uma metodologia de aplicação bastante simples. A determinação do número de fontes, uniformemente distribuídas no teto, acaba atendendo às condições de iluminação na região, mesmo que sem grande exatidão. Usando o Método das Radiosidades, os resultados do Método dos Lumens podem ser verificados quanto ao comportamento da distribuição do fluxo luminoso no plano de projeto. Desta forma, é possível verificar se os valores de fluxo incidente em uma determinada região correspondem aos especificados.

Softwares, como o *ECOTEC* e o *Lumen Designer*, que desenvolvem e simulam projetos de iluminação em ambientes, também podem ser usados no desenvolvimento. Entretanto, para que os equipamentos já existentes continuem sendo aperfeiçoados, é necessário dar continuidade e aprofundar o estudo do fenômeno da iluminação, baseado em transferência radiante.

Os sistemas computacionais, por meio de métodos numéricos, auxiliam na solução de problemas de iluminação de forma rápida e bastante precisa. Neste trabalho, a metodologia de solução inversa, as equações da radiação térmica o método da Otimização Extrema Generalizada (*Generalized Extremal Optimization - GEO*) são usados para solucionar o problema de iluminação em duas regiões distintas na superfície de projeto.

1.1 Motivação

Analisar o comportamento do fluxo luminoso num plano de trabalho, após terem sido determinados o número de fontes e a potência das lâmpadas, é um interessante objeto de estudo. Uma vez feito o dimensionamento, os valores de fluxo luminoso que efetivamente chegam à superfície devem ser sempre analisados, a fim de compará-los aos que foram prescritos. A partir destes resultados, verifica-se a influência que as paredes exercem sobre o fluxo incidente. Adicionalmente, os resultados também permitem analisar se o projeto luminoso foi superdimensionado ou não.

Entretanto, cabe lembrar que nos projetos de iluminação deve prevalecer o conforto visual, para que as atividades sejam exercidas com um bom desempenho nos ambientes. As

implicações físicas, fisiológicas e cognitivas são dependentes de boas condições de iluminação. Modificando-se as condições de iluminação, é possível criar ambientes que estimulem diferentes comportamentos, tais como concentração, criatividade e relaxamento. Por outro lado, as condições adversas de iluminação ensejam o aparecimento de diversos sintomas fisiológicos, tais como olhos irritadiços e lacrimejantes, podendo, inclusive, evoluir para casos mais avançados de desconforto, como dores de cabeça e problemas gastrointestinais.

Um dos problemas mais comuns em ambientes com condições insuficientes de iluminação é o observador curvar-se para se aproximar do objeto em foco. A fadiga visual, mesmo não sendo considerada uma patologia, é um dos problemas causados pelo estilo de vida moderno e que é agravado pela evolução da tecnologia. Em ambientes com mau dimensionamento luminoso, o observador precisa se esforçar para manter uma imagem em foco. Quando isto acontece, ocorre a fadiga dos músculos oculares, pois, para manter a imagem focada na retina, eles são obrigados a se ajustarem. Este processo pode ocasionar falhas no desenvolvimento de um trabalho no ambiente. Outro fator que também exerce influência significativa nos aspectos relativos à iluminação em um ambiente é a cor. Seu uso adequado em ambientes de trabalho é um fator preponderante, e pode concorrer para a saúde, segurança e bem-estar das pessoas que nele trabalham. O desconforto visual pode ser identificado pela claridade excessiva ou deficiente de um ambiente.

Em IESNA, 2000, são mostrados os efeitos que a distribuição espacial de luz exerce sobre os clientes de uma cafeteria quando estes escolhem um local para sentar. O comportamento observado é de que as pessoas escolhem sempre locais de frente para áreas claras. Quando as áreas escuras foram tornadas claras, e vice-versa, as escolhas recaíram novamente sobre as áreas mais claras.

Os experimentos descritos em Jordan e Tavares, 2005, mostram que a iluminação devidamente dimensionada favorece a produção em aviários.

As plantas também sofrem influência da iluminação a que estão sujeitas. De acordo com Cavichioli et al., 2006, o crescimento das plantas pode ser definido pela direção e pela intensidade das fontes luminosas. Assim, além da inclinação do caule, também é determinado o ciclo de respiração vegetal, responsável pela geração dos frutos.

Paterniani e Silva, 2005, desenvolvendo estudos no tratamento de afluentes, utilizaram energia solar na desinfecção de águas em regiões carentes de infraestrutura e com poucos recursos financeiros. No trabalho, foram utilizadas garrafas de politereftalato de etileno (PET)

transparentes, pintadas de preto até a metade, para aquecer a água no processo de desinfecção por ação da luz solar. Para desinfetar a água, as garrafas ficam expostas à luz solar de uma a seis horas.

Na medicina, tratamentos com exposição à luz em cabines sob condições de radiação controladas apresentam bons resultados no tratamento de doenças como psoríase, vitiligo, linfomas cutâneos, icterícia neonatal, entre outras [CDEF, 2008]. Neste tipo de tratamento, conhecido como fototerapia, os pacientes são expostos à radiação controlada, em sessões semanais, por um período de tempo que depende do grau de melhora das lesões.

A fototerapia é utilizada também no tratamento de distúrbios de sono, apetite, humor e depressão sazonal. Diferentemente dos tratamentos dermatológicos, nestes casos a iluminação incide nos olhos dos pacientes, por curtos períodos durante o dia. A melhora dos sintomas é obtida em cerca de 80% dos casos [Mental Help, 2008].

Em trabalhos de radiação térmica, pode-se citar a utilização de fornos no tratamento térmico, secagem, preparação de alimentos, etc. Em particular, Teixeira et al., 2007, realizaram um estudo de uniformidade no processo de reaquecimento de placas de aço.

Leonardi, 2002, realizou estudos sobre mapas de anisotropia da radiação cósmica com fundo de micro-ondas usando algoritmos genéticos.

As ondas de rádio e telefonia, que também são formas de radiação, são igualmente importantes, pois são utilizadas em processos de transmissão de sinais. Hoffmann et al., 2003, utilizaram algoritmos genéticos para otimizar a resolução do problema de estabelecer a localização de antenas visando a uma máxima cobertura.

1.2 Objetivos

Prescrever de forma aproximada os valores de fluxo sobre uma superfície de trabalho pode ser feito utilizando algum método conhecido da área de iluminação. Entretanto, a proposta deste trabalho é prescrever diferentes valores de fluxo para duas regiões distintas de uma mesma superfície de trabalho. Considera-se que há uma região principal de interesse, que deve ser iluminada com maior intensidade, e uma região secundária, para a qual se pode prescrever um valor de fluxo até duas vezes menor.

Neste trabalho, propõe-se solucionar um problema de iluminação por meio das equa-

ções de radiação térmica, usando métodos inversos, envolvendo superfícies cinza e difusas. Pretende-se, com isto, determinar o arranjo e o fluxo luminoso de um número de lâmpadas de forma a propiciar uma condição de iluminação prescrita em duas regiões distintas da superfície. O método GEO será empregado como forma de regularizar os sistemas de equações mal condicionados.

1.3 Revisão Bibliográfica

Os estudos na área de iluminação adotam diferentes abordagens no desenvolvimento de soluções neste campo. Chunfeng et al., 2006, propuseram uma abordagem baseada na monitoração de objetos com uma câmera fixa. Este método combina as informações de cor e de variação de textura, insensível a variações de iluminação, realizando o acompanhamento no quadro estabelecido e detectando objetos não rígidos em ambientes cuja iluminação é complexa. O método introduz uma característica inovadora, o coeficiente de textura dinâmico (*Dynamic Texture Coefficient* - DTC), que é proposto como forma de caracterizar as variações de textura, as quais permitem extrair seguramente os contornos de alvos móveis.

Ferentinos e Albright, 2005, desenvolveram uma técnica de algoritmo genético para o projeto ótimo de um sistema de iluminação suplementar na produção de culturas de plantas em estufas. A abordagem faz uso das capacidades de pesquisa evolutiva paralela de algoritmos genéticos para criar a disposição padrão das lâmpadas, sua altura de montagem e suas potências. O número total e as posições exatas dos aparelhos de iluminação não são predefinidos, embora seja possível definir uma disposição de grade fixa. Assim, o algoritmo genético tem um amplo grau de liberdade no processo de concepção. As possibilidades de altura de montagem e potência das luminárias são limitadas a quatro valores diferentes para cada luminária. A função objetivo do algoritmo genético desenvolvido considera a uniformidade de luz, a capacidade de intensidade de luz, os efeitos de sombreamento do projeto, bem como os custos operacionais e de investimento.

Buscando melhorar a qualidade de iluminação de imagens, Gevrekci e Gunturk, 2009, apresentaram um método, denominado *Illumination Robust Feature Extraction Transform* (IR-FET), de iluminação característica invariável, que melhora a qualidade na detecção contra mudanças de iluminação.

Na área de iluminação de interiores, Kazanasmaz et al., 2009, empregam redes neu-

rais com o objetivo de prescrever uma boa iluminância em diferentes pontos no interior de um edifício. As redes são usadas pela sua capacidade adaptativa de aprendizagem, o que é uma vantagem significativa na resolução de problemas complexos cujas soluções analíticas ou numéricas são de difícil obtenção.

Para desenvolver um projeto de iluminação no qual o plano de trabalho dispusesse de uma iluminância satisfatoriamente dimensionada, Tavares, 2007, utilizou o software Ecotec v5.20, que se mostrou eficaz ao analisar a iluminação natural e a artificial, a insolação, o conforto térmico e o acústico.

De modo geral, os algoritmos dos softwares de auxílio a projetos de iluminação implementam algum dos métodos consagrados na área.

Um destes métodos, e que é bastante utilizado, é o Ponto a Ponto. Segundo Marinowski et al., 2001, o Método Ponto a Ponto baseia-se na quantidade de luz que incidirá sobre cada ponto de uma malha definida em um plano. Este método pode ser aplicado em situações nas quais se deseja definir melhor a distribuição de iluminância no plano de trabalho, projetar sistemas de iluminação localizada e dimensionar sistemas de iluminação externa.

Outro método bastante conhecido é o dos Lumens, que se presta bem para dimensionar a iluminância em ambientes fechados. Ele é muito utilizado no dimensionamento de instalações para as quais se adota o paradigma de que o plano de trabalho é horizontal e ocupa toda a área do ambiente. O método é apresentado no catálogo da Phillips, 1981, como um manual de procedimentos, e é encontrado, também na forma de manual, em IESNA, 2000, e em OSRAM, 2005.

Marinowski et al., 2001, avaliaram a influência das características reflexivas dos refletores de luminárias e da refletância das paredes, de acordo com a potência dos sistemas de iluminação, para demonstrar a relação existente entre estas variáveis e a eficiência do método.

Muito embora seja de aplicação simples, o Método dos Lumens apresenta problemas de precisão de dimensionamento, o que fez surgir várias propostas de métodos numéricos visando à sua correção.

Costa et al., 2000, abordaram o projeto de iluminação baseado no Método de Análise Inversa, que apresenta vantagens significativas em relação aos métodos que empregam soluções do tipo tentativa e erro. O algoritmo proposto deriva das soluções de algoritmos de otimização e das equações do transporte de luz (Método Ponto a Ponto). Ele foi implementado usando o pacote de simulação do transporte de luz comercialmente denominado “Radiance” e o pacote de

otimização global “ASA”. Este último tem por base o Método de Otimização Global *Simulate Annealing* (Recozimento Simulado). Para Costa et al., 2000, o programa utiliza modelos ópticos que simulam ambientes reais, permitindo especificar objetos de iluminação que representam mesas, cadeiras, computadores e divisórias. A especificação destes objetos é incorporada aos dados de entrada, fazendo com que os resultados obtidos se aproximem mais da realidade.

Em Schneider e França, 2004, encontra-se uma proposta de resolução de problemas de iluminação usando equações de radiação em cavidades. O sistema de equações que integra esta proposta é regularizado pelo Método *Truncated Singular Value Decomposition* (TSVD). O objetivo do método proposto é determinar o fluxo luminoso de um arranjo de lâmpadas de forma a atender uma condição de iluminação prescrita para a superfície de trabalho.

O método de Otimização Extrema Generalizada (GEO) é utilizado por Mossi et al., 2007, para regularizar sistemas de equações em análise inversa de equações de radiação.

Daun et al., 2006, aplicaram métodos de otimização à metodologia inversa, dentre eles, os métodos de minimização Quase-Newton e o Recozimento Simulado, com o objetivo de compará-los e relacionar suas vantagens e desvantagens.

Bayat et al., 2010, empregaram a metodologia inversa para modelar um forno no qual o fluxo e a temperatura são uniformes na superfície de projeto. A solução direta da equação de transferência radiativa em meio transparente é obtida pelo Método de Radiação Líquida, dividindo a medida do comprimento de onda em faixas espectrais. Para tratar as superfícies com fluxo de calor especificado, é usado um processo iterativo cuja abordagem é a do gradiente conjugado. O problema inverso do projeto consiste em calcular as forças do aquecedor sobre a superfície. Isto produz o perfil desejado do fluxo de calor sobre a superfície com a distribuição de temperatura uniforme. O problema inverso é tratado como um problema de otimização que minimiza a função objetivo, que, neste caso, é definida como a soma dos desvios dos quadrados.

A luz visível é um fenômeno térmico, cujos comprimentos de onda estão no intervalo de 320 a 760 nanômetros. Portanto, é possível considerá-la um fenômeno de radiação térmica. Ao trabalhar com cavidades radiantes de superfícies cinza, nas quais as propriedades não dependem do comprimento de onda, é possível usar a equação de Planck na sua forma integrada, de modo que o sistema de equações do poder emissivo total assuma a forma linear.

Kudo et al., 1996, utilizaram o projeto inverso para determinar a distribuição das fontes de radiação de forma a satisfazer a uma condição prescrita para as superfícies de uma cavidade

bidimensional. Mesmo apresentando soluções indesejáveis, verificou-se que grande parte das fontes luminosas deveriam se concentrar nos cantos da cavidade.

Howell et al., 2003, aplicaram métodos de regularização em cavidades formadas por superfícies cinza e propuseram um esquema para otimizar a geometria. Neste esquema, por meio de diferentes exemplos, são determinadas, de forma inversa, as propriedades das superfícies, as condições de contorno e a geometria da cavidade.

Quando se formula um problema de forma inversa, com apenas um dado conhecido, é comum a necessidade de aplicar métodos de regularização para resolvê-lo. Isto acontece porque o sistema de equações a ser resolvido apresenta-se, geralmente, como mal condicionado. Uma vez que os métodos convencionais de resolução de sistemas lineares são incapazes de tratar satisfatoriamente o mau condicionamento, métodos especiais se fazem necessários.

De acordo com Daun et al., 2006, os métodos de regularização mais comumente utilizados são o Tikhonov, o TSVD e o Gradiente Conjugado (*Conjugated Gradient* - CG). Para compará-los, os três métodos foram aplicados a uma mesma cavidade radiante.

O Método CG demandou o menor tempo computacional, com restrição a sistemas que apresentam um número de equações igual ao número de incógnitas.

O Método Tikhonov gerou soluções mais suaves, permitindo um controle mais apurado do parâmetro de regularização. Porém, alguns autores declararam ser complexa a determinação deste parâmetro.

Embora tenha demandado o maior tempo computacional, o Método TSVD permitiu uma percepção apurada do grau de mau condicionamento do problema em questão, característica que lhe confere maior vantagem em relação aos outros.

A validação dos resultados produzidos por estes métodos de regularização foi feita experimentalmente por Gamba et al., 2002 e Gamba et al., 2003.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho se divide em sete capítulos. No Capítulo 2, são apresentados os fundamentos básicos que norteiam o desenvolvimento deste trabalho. Neste capítulo, estão detalhados os conceitos básicos e as equações que coordenam os fenômenos da radiação térmica, que é o prin-

cípio para a iluminação. Apresenta, ainda, o método para a solução de transferência de calor em cavidades radiantes, que será usado na solução do problema proposto. A solução direta para o problema das cavidades é apresentada juntamente com as hipóteses feitas.

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

No Capítulo 4 são descritas algumas características dos problemas inversos. É apresentado o algoritmo estocástico de otimização GEO, que será usado para regularizar o sistema de equações, possibilitando, desta forma, a obtenção de resultados para a análise inversa.

A metodologia proposta para resolver o problema inverso em cavidades radiantes com superfícies cinza é descrita no Capítulo 5.

Os resultados para um caso típico de cavidade radiante são apresentados no Capítulo 6. Adota-se, como objeto de análise, um ambiente com dimensões e propriedades bem conhecidas. Determina-se, então, para este ambiente, um arranjo que otimiza o nível de iluminação. Ainda neste capítulo é feita a comparação dos resultados obtidos.

As conclusões e as perspectivas para trabalhos futuros são trazidas à lume no Capítulo 7.

2 INTRODUÇÃO À RADIAÇÃO TÉRMICA

Diferentes áreas se complementam quando são desenvolvidos estudos para resolver problemas de dimensionamento de iluminação em ambientes. Por ser a luz um fenômeno térmico, cabe apresentar, inicialmente, alguns conceitos que envolvem a radiação térmica, fenômeno físico envolvido na geração de luz nas lâmpadas, assim como as particularidades da visão humana e o seu comportamento frente aos fenômenos considerados.

A radiação térmica, importante em muitas aplicações, é caracterizada por ser a energia radiante emitida por todos os corpos com temperatura acima de zero absoluto, sem necessitar de meio de propagação. Apesar de estar bem conceituada, o mecanismo de propagação da radiação ainda não é plenamente conhecido, e diversas teorias já foram propostas tentando explicar o processo, por exemplo, a teoria eletromagnética de Maxwell e a teoria quântica de Max Planck.

Para os propósitos deste trabalho, a propagação da radiação é considerada tal como preconiza a teoria de Maxwell, ou seja, a radiação recebe o tratamento de fenômeno eletromagnético. A relação da temperatura com seu respectivo comprimento de onda e frequência é mostrada na Figura 2.1.

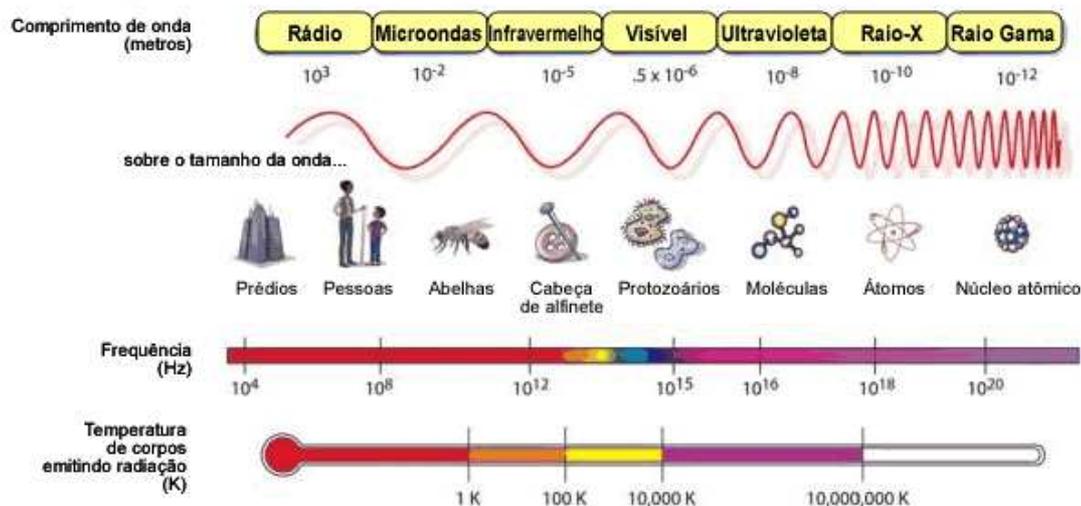


Figura 2.1 – O espectro eletromagnético [NASA, 2008]

As radiações de curto comprimento de onda (raios gama, raios-X e radiação ultravioleta) interessam à área de física de alta energia ou à de engenharia nuclear, enquanto que as radiações de longo comprimento de onda (micro-ondas e ondas de rádio) interessam à engenharia elétrica.

A faixa do espectro compreendida entre 10^{-8} e 10^{-5} m (ultravioleta, luz visível e infravermelho) recebe o nome de radiação térmica por ser o intervalo do espectro que efetivamente emite energia térmica.

A iluminação objeto de interesse deste trabalho, a luz visível, tem comprimento de onda entre 0,4 e 0,7 μm .

2.1 Definições

Para o desenvolvimento ulterior deste trabalho, é necessário compreender, primeiramente, como ocorre a propagação da radiação emitida por uma fonte em direção a uma superfície ou plano de projeto, assim como é importante apresentar os conceitos e as características da intensidade da radiação posteriormente referenciados. O propósito desta seção é apresentar as deduções matemáticas do comportamento da radiação e as definições de corpo negro, superfície cinza e não cinza.

2.1.1 O Corpo Negro - Um Perfeito Emissor e Absorvedor de Radiação

Por definição, corpo negro é um absorvedor perfeito de radiação. Não importa quais comprimentos de onda ou quais direções a incidência da radiação descreva, em um corpo negro ela será totalmente absorvida. Obviamente, este é um conceito idealizado, haja vista que todas superfícies reais refletem alguma parcela de radiação. Embora tais corpos não existam na natureza, alguns materiais podem apresentar características muito semelhantes; por exemplo, uma camada de carbono preto pode absorver aproximadamente 99% de toda a radiação térmica incidente.

A visão humana não percebe um corpo negro, justamente pela ausência da radiação refletida. Entretanto, o olho humano é sensível apenas a uma pequena faixa do espectro de radiação e, por este motivo, não serve para julgar as capacidades de reflexão e de absorção de radiação de qualquer material. A título de exemplo, considere-se uma pintura branca: ela é um bom refletor de radiação visível e absorve bem a radiação infravermelha. A visão, neste caso, é capaz de perceber apenas o fenômeno da reflexão.

Um corpo negro também é um perfeito emissor de radiação térmica. De fato, ele poderia ser definido como um corpo que emite o máximo possível de radiação.

Em linhas gerais, o corpo negro é definido da seguinte forma:

1. um corpo negro absorve toda a energia radiante, independentemente do comprimento de onda;
2. para uma dada temperatura e certo comprimento de onda, nenhuma superfície emite mais energia que um corpo negro e,
3. o corpo negro é um emissor difuso, ou seja, a radiação emitida independe da direção (Figura 2.2).

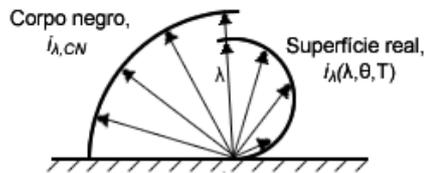


Figura 2.2 – Comparação entre a emissão superficial de um corpo negro e a de uma superfície real [Incropera e DeWitt, 2003]

Nos estudos conduzidos por Max Planck, publicados em 1901, é feita a dedução da equação que descreve o poder emissivo do corpo negro a uma dada temperatura e em um dado comprimento de onda. Conhecida como distribuição de Planck do poder emissivo hemisférico espectral do corpo negro, a equação apresenta a seguinte forma:

$$i_{\lambda,CN}(\lambda, T) = \frac{2 \cdot h \cdot c_o^2}{\lambda^5 \cdot \left[e^{\left(\frac{h \cdot c_o}{\lambda \cdot k T} \right)} - 1 \right]} \quad (2.1)$$

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

As superfícies negras obedecem à lei de emissão direcional de Lambert e, por isto, são denominadas superfícies difusas. Segundo a lei do cosseno de Lambert, a emissão de energia em superfícies difusas segue uma distribuição cossenoidal relativa ao ângulo θ , com valor máximo na direção normal à superfície e nulo na direção paralela à mesma, conforme a Figura 2.3.

Para modelar matematicamente a intensidade de radiação emitida ou incidida, considera-se uma área infinitesimal dA centrada na origem do plano cartesiano xyz , a qual emite radiação

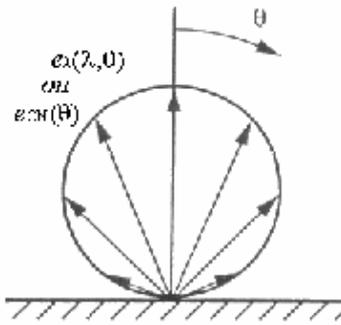


Figura 2.3 – Lei do cosseno de Lambert para emissão direcional [Siegel e Howell, 2002]

em um intervalo de comprimento de onda $d\lambda$, centrado em λ através de um ângulo sólido $d\omega$, tal como ilustra a Figura 2.4.

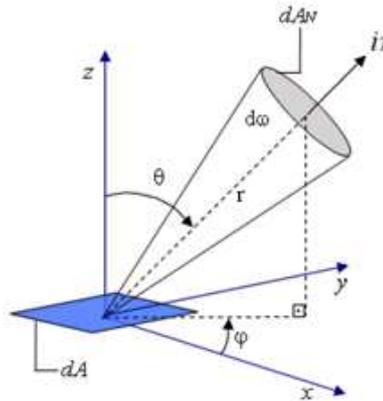


Figura 2.4 – Intensidade de radiação do elemento de área dA através do ângulo sólido $d\omega$

A taxa de energia, em função da área, do comprimento de onda e do ângulo, é dada por:

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

O ângulo sólido $d\omega$ é definido como:

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

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

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

A taxa de energia radiante emitida por um corpo, em um determinado comprimento de onda e que não dependa do ângulo, é dada por:

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

onde e_λ é o poder emissivo espectral, definido como a radiação emitida por uma superfície em um determinado comprimento de onda. O poder emissivo espectral, tal como a intensidade, é descrito da seguinte forma:

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

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

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

Para superfícies difusas, como o corpo negro, é possível encontrar uma relação simples entre o poder emissivo e a intensidade de radiação, isto é, existe a possibilidade de comparar uma quantidade emitida em todo hemisfério com uma quantidade emitida em uma única direção através de $d\omega$.

Combinando as Equações 2.4 e 2.6, tem-se:

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

Logo,

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

Quando a superfície é difusa, i_λ não depende da direção, logo:

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

A intensidade da radiação incidente pode ser relacionada a um importante fluxo radiativo: a irradiação, que representa a totalidade da radiação incidente, vinda de todas as direções. Para a irradiação espectral incidente, tem-se:

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

Outro fenômeno importante é a radiosidade. Ela se refere à parcela do total de energia radiante que deixa uma superfície, incluindo a parcela refletida da radiação incidente e também a emissão da superfície, como poder ser visto na Figura 2.5.

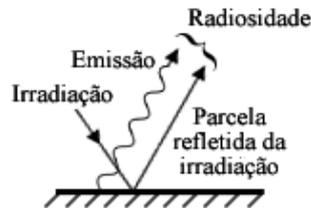


Figura 2.5 – Radiosidade de uma superfície [Incropera e DeWitt, 2003]

A radiosidade espectral é calculada pela expressão:

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

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

Para encontrar a irradiação e a radiosidade em termos totais, basta integrar as Equações 2.11 e 2.12 ao longo do espectro.

A lei de Stefan-Boltzmann permite obter a energia radiante emitida por um corpo negro apenas em função da temperatura, o que é feito integrando-se a Equação 2.1 em função do comprimento de onda. O resultado é expresso por:

$$e_{CN}(T) = \sigma \cdot T^4 \quad (2.13)$$

onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$.

O poder emissivo total do corpo negro é expresso segundo a Equação 2.13, que representa o fluxo de radiação emitido por uma superfície unitária a uma temperatura absoluta T . Ainda através desta relação, é possível obter a intensidade de radiação total associada à emissão do corpo negro, dada por:

$$i_{CN}(T) = \frac{1}{\pi} \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.14)$$

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

definida como:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta} = \frac{i_{\lambda}(\lambda, \theta, \varphi, T)}{i_{\lambda,CN}(\lambda, T)} \quad (2.15)$$

Em superfícies perfeitamente difusas, a emissividade espectral hemisférica é definida como:

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{e_{\lambda}(\lambda, T)}{e_{\lambda,CN}(\lambda, T)} \quad (2.16)$$

Consequentemente, o poder emissivo total da superfície será:

$$e = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} \cdot e_{\lambda,CN} \cdot d\lambda \quad (2.17)$$

A emissividade total hemisférica, que representa uma média de todas as direções e de todos os comprimentos de onda, é definida por:

$$\varepsilon(T) = \frac{e(T)}{e_{CN}(T)} \quad (2.18)$$

A energia radiante incidente sobre uma superfície é denominada irradiação. A irradiação pode ser parcialmente absorvida, refletida, ou, ainda, transmitida por refração, como ilustra a Figura 2.6. A ocorrência destes fenômenos dependerá das propriedades físicas da superfície.

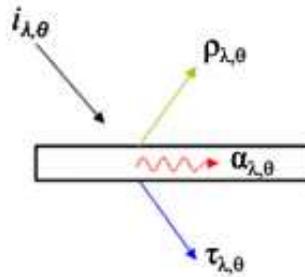


Figura 2.6 – Energia incidente em um elemento de área

Estas propriedades são definidas, respectivamente, por absortividade ($\alpha_{\lambda,\theta}$), refletividade ($\rho_{\lambda,\theta}$) e transmissividade ($\tau_{\lambda,\theta}$). Ao ser realizado o balanço de energia representado na Figura 2.6, obtém-se:

$$\alpha_{\lambda,\theta} + \rho_{\lambda,\theta} + \tau_{\lambda,\theta} = 1 \quad (2.19)$$

Neste trabalho, adota-se a hipótese de que a superfície é opaca, de modo que a energia não é transmitida através da mesma, o que significa que $\tau_{\lambda,\theta} = 0$. Desta forma, a Equação 2.19

passa a ser:

$$\alpha_{\lambda,\theta} + \rho_{\lambda,\theta} = 1 \quad (2.20)$$

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

$$\alpha_{\lambda,\theta} = \frac{i_{\lambda,i,\alpha}(\lambda, \theta, \varphi, T)}{i_{\lambda,i}(\lambda, \theta)} \quad (2.21)$$

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

$$\alpha_{\lambda} = \alpha_{\lambda,\theta} = \frac{i_{\lambda,i,\alpha}(\lambda, T)}{i_{\lambda,i}(\lambda, \theta)} \quad (2.22)$$

A superfície é dita cinza quando a emissividade e a absorptividade hemisféricas espectrais não dependem do comprimento de onda, ou seja, superfícies cinza emitem e absorvem parcelas fixas relativas ao corpo negro, ao longo de todo espectro eletromagnético. Geralmente, a hipótese de superfície cinza é assumida juntamente com a de superfície difusa, resultando na seguinte forma funcional das propriedades:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T) = \varepsilon(T) \quad (2.23)$$

e

$$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T) = \alpha(T) \quad (2.24)$$

Não obstante, estas propriedades podem ainda apresentar dependências relacionadas à temperatura da superfície. Gustav Robert Kirchhoff mostrou que, para qualquer superfície, a seguinte relação entre emissividade e absorptividade é válida:

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

Esta dependência é denominada lei de Kirchhoff, e resulta da 2ª lei da termodinâmica. Para as superfícies cinza e difusas, a lei de Kirchhoff pode ser simplificada como:

$$\varepsilon = \alpha \quad (2.26)$$

Muitas superfícies reais apresentam comportamento fortemente dependente do comprimento de onda. A modelagem deste tipo de superfícies torna-se complexa quando é feita a

integração da Equação 2.17, e a hipótese de superfície cinza não concorre para uma boa aproximação. Para contornar esta dificuldade, o espectro eletromagnético é discretizado em bandas dentro das quais as propriedades podem ser consideradas constantes. Isto permite retirar a emissividade da integração do poder emissivo, desde que seja calculada para cada banda. Então, a partir da Equação 2.26, para cada banda bn previamente definida do espectro, tem-se:

$$\varepsilon_{bn} = \alpha_{bn} \quad (2.27)$$

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

$$e_{bn} = \varepsilon_{bn} \int_{\lambda_{bni}}^{\lambda_{bnf}} e_{\lambda,CN} \cdot d\lambda \quad (2.28)$$

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

2.1.2 Trocas Radiantes Entre Superfícies

Para que se possa compreender o processo de trocas radiantes em duas ou mais superfícies, é necessário primeiramente caracterizar o fenômeno em uma única superfície. Quando o cálculo envolve mais de uma superfície, faz-se necessário o conceito de fator de forma, definido como a fração de energia radiante emitida por uma superfície que incide diretamente em outra. Esta definição considera que a intensidade de radiação (emitida e absorvida) está uniformemente distribuída sobre cada uma das superfícies. Para que isto possa acontecer, assume-se que as superfícies sejam difusas. O fator de forma pode ser caracterizado como a intensidade de radiação uniforme saindo do elemento infinitesimal de superfície dA_1 e chegando ao dA_2 , como mostra a Figura 2.7.

Seja dA_1 a energia total que deixa o elemento dA_2 , então, a taxa de energia radiante que deixa dA_1 e chega ao dA_2 é:

$$d^2q_{o,1-2} = i_{\lambda,o,1} dA_1 \cos \theta_1 d\omega_{1-2} \quad (2.29)$$

onde $d\omega_{1-2}$ é o ângulo sólido formado por dA_2 visto a partir de dA_1 e S é a distância entre as superfícies:

$$d\omega_{1-2} = \frac{dA_2 \cos \theta_2}{S^2} \quad (2.30)$$

Como $i_{\lambda,o,1}$ provém de uma superfície difusa, ela independe do ângulo que deixa dA_1 .

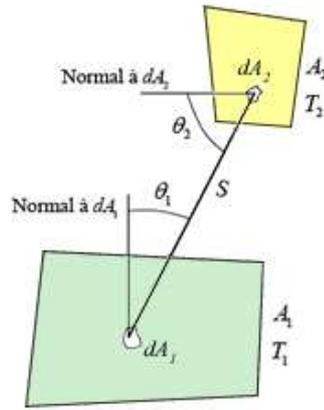


Figura 2.7 – Cavidade composta por N superfícies

A equação que descreve a energia radiante em um intervalo de comprimento de onda $d\lambda$ é:

$$d^2q_{o,1-2} = i_{\lambda,o,1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{S^2} dA_1 dA_2 d\lambda \quad (2.31)$$

A energia radiante total pode ser encontrada integrando-se a Equação 2.31 em todos os comprimentos de onda:

$$d^2q_{o,1-2} = i_{\lambda,o,1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{S^2} dA_1 dA_2 \int_0^\infty i_{\lambda,o,1} d\lambda \quad (2.32)$$

resultando em:

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

De forma análoga, considerando a reciprocidade, a radiação que deixa dA_2 e chega a dA_1 é:

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

A fração de energia que sai do elemento infinitesimal difuso dA_1 e chega ao elemento dA_2 é chamada de fator de forma $dF_{dA_1-dA_2}$. A partir da Equação 2.33 e da definição de fator de forma, chega-se a:

$$dF_{dA_1-dA_2} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi S^2} dA_2 \quad (2.35)$$

Considerando o fator de forma com intensidade uniforme que deixa a superfície difusa

A_1 e chega à superfície A_2 , tem-se que:

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} dF_{dA_1-dA_2} dA_1 \quad (2.36)$$

A combinação das Equações 2.35 e 2.36 resulta em:

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi S^2} dA_2 dA_1 \quad (2.37)$$

Analogamente à Equação 2.37, o fator de forma de A_2 para A_1 é dado por:

$$F_{2-1} = \frac{1}{A_2} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi S^2} dA_2 dA_1 \quad (2.38)$$

Pela regra da reciprocidade, a partir das Equações 2.37 e 2.38 chega-se a:

$$A_1 F_{1-2} = A_2 F_{2-1} \quad (2.39)$$

Denomina-se cavidade o sistema no qual as superfícies formam um sistema de troca radiante fechado. Nas cavidades, a energia se conserva, isto é, a energia emitida por cada superfície é absorvida pelas demais. Como resultado da conservação de energia, o fator de forma das k superfícies que formam a cavidade deve obedecer à seguinte relação de balanço:

$$F_{j-1} + F_{j-2} + F_{j-3} + \cdots + F_{j-N} = \sum_{k=1}^N F_{j-K} = 1 \quad (2.40)$$

Em muitos casos, o cálculo do fator de forma entre as superfícies não é uma tarefa simples, razão pela qual seu valor pode ser extraído diretamente da literatura, por meio de equações ou tabelas, como por exemplo em Siegel e Howell, 2002.

2.1.3 Trocas Radiantes em Cavidades: Método das Radiosidades

No interior de uma cavidade, ocorre uma complexa troca radiante: a radiação emitida por uma superfície é parcialmente refletida e parcialmente absorvida pelas demais, até sua extinção. Diferentes metodologias foram desenvolvidas para modelar este comportamento e, para cavidades radiantes, o Método das Radiosidades é provavelmente o mais utilizado. A ampla aceitação do método se deve às relações simples de balanço que ele emprega, que permitem solucionar o sistema de equações pelos métodos clássicos. Quando a geometria das cavidades

não é complexa, este método se presta muito bem para modelar o comportamento da radiação.

A resolução do problema abordado neste trabalho requer a consideração das seguintes hipóteses:

1. as superfícies são finitas;
2. a temperatura é uniforme em cada superfície;
3. as superfícies são opacas ($\tau = 0$ | $\alpha = 1 - \rho$);
4. as superfícies são cinzas ($\varepsilon_{\lambda, \theta} = \varepsilon_{\lambda}$ e $\alpha_{\lambda, \theta} = \alpha_{\lambda}$);
5. as superfícies são difusas ($\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$);
6. as energias incidentes, emitida e refletida são uniformes em cada superfície;
7. o regime é estacionário e,
8. o meio é considerado não-participante.

Uma vez que a cavidade é previamente conhecida, os fatores de forma entre os elementos de área podem ser determinados. As hipóteses 3 e 4 podem ser deduzidas a partir da lei de Kirchoff, bastando para isto indicar que a emissividade é igual à absorvidade, independente da direção considerada. A hipótese 3 pode também ser escrita da seguinte forma:

$$\rho = (1 - \varepsilon) \quad (2.41)$$

Relacionar a refletividade à emissividade não apenas parece inadequado, como é fisicamente incorreto. O correto é relacionar a emissividade à absorvidade, tal como é apresentado na hipótese 3. Entretanto, o termo $(1 - \varepsilon)$ traz implicitamente a lei de Kirchoff, e ele nada mais é do que a própria refletividade ρ . Isto posto, a transformação visa a simplificar o equacionamento, fazendo com que uma única propriedade de superfície represente as demais.

A restrição imposta pela hipótese 8 deve ser ressaltada, pois quando o meio for considerado participante, o equacionamento apresentado não é aplicável.

O Método das Radiosidades utiliza unicamente relações de balanço energético em função das radiosidades (q''_o) dos elementos de área. Cada elemento emite e absorve radiação proveniente dos demais em quantidades que dependem das propriedades, da geometria e da

posição relativa das superfícies. Normalmente, cada superfície possui duas condições térmicas independentes, fluxo radiante e temperatura. Isto exige duas equações de balanço para equacionar cada superfície. A Figura 2.8 ilustra as duas abordagens de balanço energético possíveis em um elemento de área.

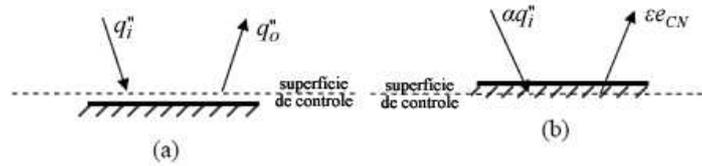


Figura 2.8 – Abordagens de balanço energético em uma superfície. (a) Fluxo prescrito; (b) Temperatura prescrita.

A escolha da abordagem a ser empregada é determinada pela condição de contorno do elemento de área, e deve ser feita de modo tal que a relação estabelecida adicione somente uma incógnita ao sistema.

Em superfícies para as quais se tenha prescrito um fluxo de calor, é conveniente utilizar um balanço energético a partir da superfície de controle mostrada na Figura 2.8(a). Adotando-se a convenção de que a energia que sai de uma superfície é positiva, tem-se:

$$q_r'' = q_o'' - q_i'' \quad (2.42)$$

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 as grandezas em W/m^2).

A irradiação de uma superfície j , por ser o somatório das frações de radiosidade das demais superfícies k , de acordo com o fator de forma entre as mesmas, é definida como:

$$q_{i,j}'' = \sum_{k=1}^N (F_{j-k} q_{o,k}'') \quad (2.43)$$

onde F_{j-k} é o fator de forma de j para k .

Na Equação 2.43, k assume valores que representam todas as superfícies da cavidade e N indica o número total de superfícies. Substituindo a Equação 2.43 na Equação 2.42 e rearranjando-se os termos, obtém-se a seguinte relação para a radiosidade:

$$q_{o,j}'' = q_{r,j}'' + \sum_{k=1}^N F_{j-k} q_{o,k}'' \quad (2.44)$$

Em superfícies para as quais se tenha prescrito a temperatura, é utilizada a abordagem de balanço energético na superfície de controle ilustrada na Figura 2.8(b). O fluxo líquido de calor radiante, em W/m^2 , é dado por:

$$q_r'' = \varepsilon e_{CN} - \alpha q_i'' \quad (2.45)$$

onde e_{CN} é o poder emissivo do corpo negro à temperatura prescrita e ε e α são, respectivamente, a emissividade e absortividade total hemisférica da superfície.

A relação existente entre emissividade e absortividade, descrita anteriormente, permite que a Equação 2.45 seja reescrita da seguinte forma:

$$q_{r,j}'' = \varepsilon_j (e_{CN} - q_{i,j}'') \quad (2.46)$$

Para estabelecer uma relação em função da radiosidade, combina-se a Equação 2.46 com as Equações 2.42 e 2.43, resultando em:

$$q_{o,j}'' = \varepsilon_j (1 - e_j) \sum_{k=1}^N F_{j-k} q_{o,k}'' \quad (2.47)$$

Os valores de radiosidade de cada superfície podem ser obtidos aplicando-se as Equações 2.44 e 2.47 a cada uma delas, pois o número de incógnitas será igual ao número de equações.

Após terem sido obtidas as radiosidades, é possível determinar a condição térmica desconhecida em cada superfície. Para superfícies cuja temperatura é conhecida, tem-se:

$$q_{r,j}'' = q_{o,j}'' - \sum_{k=1}^N F_{j-k} q_{o,k}'' \quad (2.48)$$

Caso o fluxo de calor radiante seja conhecido, a temperatura da superfície (ou o poder emissivo do corpo negro) pode ser obtida pela equação:

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

Dado que cada cavidade radiante é composta por N superfícies, e que cada superfície requer uma equação de radiosidade, serão necessárias $j-N$ equações para solucionar o sistema.

2.2 Estratégia de Solução

A solução do problema é obtida desenvolvendo-se uma equação de radiosidade para cada superfície, de acordo com as condições de contorno existentes, fluxo prescrito ou temperatura prescrita. O sistema de equações resultante é linear, com M equações e M incógnitas, onde M é o número de superfícies discretas no domínio. Este sistema é do tipo $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$, onde \mathbf{x} é o vetor das radiosidades a ser calculado, \mathbf{A} é a matriz de dimensão $M \times M$ e o vetor \mathbf{b} corresponde à condição prescrita. Genericamente, esta matriz pode ser representada por:

$$\begin{bmatrix} 1 & (\varepsilon_1 - 1)F_{12} & \text{L} & (\varepsilon_1 - 1)F_{1(M-1)} & (\varepsilon_1 - 1)F_{1M} \\ (\varepsilon_2 - 1)F_{21} & 1 & \text{L} & (\varepsilon_2 - 1)F_{2(M-1)} & (\varepsilon_2 - 1)F_{2M} \\ \text{M} & \text{M} & 1 & \text{M} & \text{M} \\ -F_{(M-1)1} & -F_{(M-1)2} & \text{L} & 1 & -F_{(M-1)M} \\ -F_{M1} & -F_{M2} & \text{L} & -F_{M(M-1)} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q''_{o1} \\ q''_{o2} \\ \text{M} \\ q''_{o(M-1)} \\ q''_{oM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 e_1 \\ \varepsilon_2 e_2 \\ \text{M} \\ q''_{r(M-1)} \\ q''_{r1M} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

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

Entretanto, antes de tentar solucionar o sistema linear, primeiramente deve-se procurar saber sob quais condições existe solução. De acordo com Barroso et al., 1983, um modo de classificar o sistema de equações é pelo cálculo do seu determinante normalizado. Se este determinante for sensivelmente menor que a unidade, o sistema está mal condicionado. Se \mathbf{A} é uma matriz de ordem M , seu determinante normalizado é dado por:

$$\det(\text{NormaA}) = \frac{\det(A)}{\beta_1 \beta_2 \dots \beta_M} \quad (2.51)$$

onde β é a norma das linhas da matriz \mathbf{A} ; $\beta_j = \sqrt{a_{j1}^2 + a_{j2}^2 + \dots + a_{jM}^2}$, para $j = 1, 2, \dots, M$; e a um elemento da matriz \mathbf{A} .

Adicionalmente, o módulo do determinante normalizado obedece à seguinte relação:

$$|\det(\text{NormaA})| \cong 1 \quad (2.52)$$

Ainda segundo Barroso et al., 1983, se o determinante normalizado da matriz \mathbf{A} for maior que 10^{-2} , o sistema proposto é possível e determinado. Valores inferiores a 10^{-2} são indicativos de mau condicionamento do sistema, e estes casos devem ser atentamente avaliados.

Para exemplificar esta relação, considere-se uma cavidade formada por três superfícies. Se forem prescritas condições de temperatura para todas as superfícies, a matriz \mathbf{A} resultante terá o seguinte formato:

$$\begin{bmatrix} 1 & (\varepsilon_1 - 1)F_{12} & (\varepsilon_1 - 1)F_{13} \\ (\varepsilon_2 - 1)F_{21} & 1 & (\varepsilon_2 - 1)F_{23} \\ (\varepsilon_3 - 1)F_{31} & (\varepsilon_3 - 1)F_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

e seu vetor \mathbf{b} correspondente será:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 e_1 & \varepsilon_2 e_2 & \varepsilon_3 e_3 \end{bmatrix}^T \quad (2.54)$$

Pode-se obter valores numéricos para \mathbf{A} e \mathbf{b} , arbitrando alguns valores típicos para emissividade de superfícies e temperaturas, e, com isto, calcular seu determinante normalizado. Os valores típicos de determinantes normalizados para estes casos ficam acima de 0,5, geralmente em torno de 0,8.

Os planos que satisfazem a cada equação estão dispostos como mostra a Figura 2.9. O ponto escuro na intersecção dos planos demarca a localização do ponto de solução do sistema.

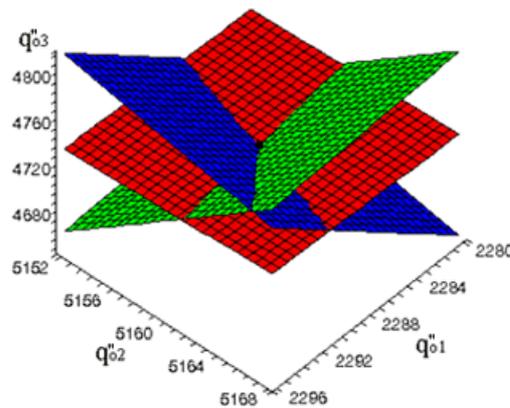


Figura 2.9 – Planos de um sistema bem condicionado 3x3 com determinante normalizado igual a 0,8 [Seewald, 2006]

No exemplo anterior, se fosse prescrita uma condição de fluxo para cada superfície da

cavidade, a matriz \mathbf{A} resultante seria:

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

e o vetor \mathbf{b} correspondente seria:

$$\begin{bmatrix} q''_{r1} & q''_{r2} & q''_{r3} \end{bmatrix}^T \quad (2.56)$$

Nos sistemas de equações das matrizes \mathbf{A} apresentadas, é perceptível a dominância da diagonal principal, característica típica de um sistema bem condicionado. Quando as equações formam sistemas deste tipo, a solução pode ser obtida pelos métodos clássicos. Barroso et al., 1983, descrevem métodos com número finito de operações, como o de Gauss e o de Jordan, além de métodos iterativos, como o de Jacobi e o de Gauss-Seidel.

Sempre que for possível, é preferível utilizar métodos iterativos a métodos finitos, pois estes conduzem a uma solução que pode conter sérios erros de arredondamento. Nos métodos iterativos para refino da solução, os erros de arredondamento são significativamente reduzidos [Dorn e McCracken, 1978].

Entre o Método de Gauss-Seidel e o de Jacobi, dá-se preferência ao primeiro, visto que converge mais rapidamente para a solução [Barroso et al., 1983]. No Método de Gauss-Seidel, é condição suficiente para a convergência a matriz \mathbf{A} possuir diagonal dominante [Dorn e McCracken, 1978]:

$$|a_j| \geq \sum_{k=1, k \neq j}^M |a_{jk}| \quad (2.57)$$

para $j = 1, 2, \dots, M$

Esta condição é atendida nos dois exemplos anteriores, permitindo concluir que o Método das Cavidades Radianes não somente é bem condicionado, como também converge em metodologias de solução iterativa. No Método de Gauss-Seidel, parte-se de uma aproximação inicial $\mathbf{x}^{(0)}$, tal que:

$$\mathbf{x}^{(0)} = \begin{bmatrix} x_1^{(0)} & x_2^{(0)} & \dots & x_M^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

A sequência de aproximações $\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(\gamma)}$ é calculada pela equação:

$$x_j^{(\gamma+1)} = \frac{1}{a_{jj}} \left[b_{jj} - \sum_{k=1}^{j-1} a_{jk} x_k^{(\gamma+1)} + \sum_{k=j+1}^M a_{jk} x_k^{(\gamma)} \right] \quad (2.59)$$

onde γ representa o número da iteração.

O critério de parada que deve ser satisfeito por γ é definido como:

$$\max \left| \frac{x_j^{(\gamma+1)} - x_j^{(\gamma)}}{x_j^{(\gamma+1)}} \right| < \xi \quad (2.60)$$

onde ξ é o valor do erro admitido.

Para os propósitos deste trabalho, ξ foi definido como 10^{-6} .

Uma vez resolvido o sistema de equações em termos de radiosidades, a condição de contorno desconhecida é calculada pela equação de balanço estabelecida – fluxo prescrito ou temperatura prescrita.

3 FUNDAMENTOS DA ILUMINAÇÃO

Iluminação é o fenômeno físico resultante da exposição de uma fonte de luz num ambiente que pode absorver ou refletir a luz, tornando-se visível. A fonte de luz visível mais antiga de que se tem conhecimento é o sol. Sua superfície emite radiações cujos comprimentos de onda vão de um extremo a outro do espectro eletromagnético, e as mais intensas concentram-se na região denominada *luz visível*. Nesta região, a intensidade radiante atinge valores de pico nos comprimentos de onda de cerca de 550 nm. Isto sugere que o olho humano, ao longo da evolução, se adaptou ao espectro irradiado pelo sol, mais especificamente, aos comprimentos de onda entre 0,4 e 0,7 μm . O espectro eletromagnético visível está limitado em um extremo pelas radiações infravermelhas (de maior comprimento de onda) e no outro, pelas radiações ultravioletas (de menor comprimento de onda).

Todos os objetos com temperatura superior a zero absoluto emitem radiação térmica, e a intensidade com que emitem depende justamente da temperatura. A emissão luminosa pode ocorrer de diversas formas, tais como incandescência, luminescência, quimiluminescência, bioluminescência e triboluminescência.

Objetos como o sol, cuja radiação térmica é visível, são denominados incandescentes. A incandescência geralmente está associada a objetos quentes, para os quais, tipicamente, são necessárias temperaturas que excedam 1.000° C.

Luminescência designa o fenômeno de emissão de luz por objetos frios. Exemplos de luminescência incluem as lâmpadas fluorescentes, relâmpagos, mostradores luminosos e os receptores de televisão.

Quimiluminescência é a emissão luminosa originada quando o responsável pela excitação dos átomos são reações químicas. Quando ocorre em seres vivos, tais como vaga-lumes e organismos marinhos, é chamada de bioluminescência.

A triboluminescência é o fenômeno que ocorre quando certos cristais, o açúcar, por exemplo, são comprimidos e emitem luz.

3.1 Unidades Fundamentais da Iluminação

Relativamente à área de iluminação, a grandeza básica definida no Sistema Internacional (SI) é a intensidade luminosa, cuja unidade é a candela (cd) e cujo símbolo é I_v . Além da candela, é de uso corrente definir esta grandeza em unidades derivadas, como o watt (W), por exemplo.

Segundo o INMETRO, 2007, candela é definida como:

“A candela é a intensidade luminosa, na direção perpendicular, de uma superfície de 1/600 000 metros quadrados de um corpo negro à temperatura de solidificação da platina sob pressão de 101 325 newtons por metro quadrado.”

Esta definição permite distinguir intensidade luminosa de intensidade energética. A distinção é necessária em razão da maneira particular pela qual é percebida a parcela de energia do espectro correspondente à luz visível, o que justifica a manutenção da candela como unidade básica no SI. A percepção da luz visível é tratada na Seção 3.2.

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

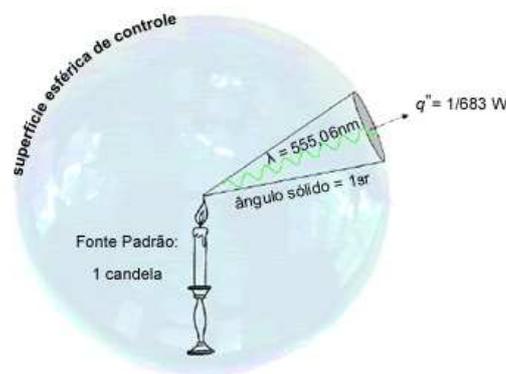


Figura 3.1 – Definição de candela [Seewald, 2006]

Fluxo luminoso é o total de energia luminosa que atinge a superfície de controle, e sua unidade é o lúmen (lm), que corresponde à multiplicação da unidade candela pelo ângulo

sólido esterradiano ($\text{cd}\cdot\text{sr}$). O valor do fluxo pode ser obtido por meio da integral da intensidade luminosa que cruza a superfície de controle em todas as direções de emissão.

Iluminância, iluminamento ou nível de iluminação são sinônimos da grandeza definida pelo conceito de fluxo luminoso por unidade de área. A unidade relacionada é o lúmen por metro quadrado (lm/m^2), também denominada lux (lx). A iluminância é a grandeza mais utilizada em tabelas que fornecem valores de níveis de iluminação apropriados a cada situação ou ambiente.

As principais grandezas empregadas na área de iluminação, suas unidades e seus símbolos estão relacionados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Grandezas de iluminação com suas unidades e símbolos

Grandeza	Unidade	Símbolo
Intensidade luminosa	candela	cd
Luminância	candela por metro quadrado	cd/m^2
Fluxo luminoso	lúmen ($\text{cd}\cdot\text{sr}$)	lm
Iluminância	lux (lm/m^2)	lx

3.2 O Sentido da Visão

O olho humano é um mecanismo complexo, responsável pela percepção de luz e cor. Em comparação a uma máquina fotográfica, é composto basicamente por uma lente e uma superfície fotossensível dentro de uma câmera. De acordo com IESNA, 2000, o olho humano é constituído de vários elementos ópticos que têm a função de transformar os estímulos luminosos em sinais elétricos. O nervo óptico transmite estes sinais ao cérebro, que então os interpreta como uma imagem. A parte responsável pela geração dos sinais elétricos é a retina, que é muito sensível na região da fóvea central. Antes de atingir a retina, os raios luminosos, ou fótons, passam através da córnea, do cristalino e do humor vítreo, como ilustra a Figura 3.2. Estes meios atuam como filtros, e devem transmitir a radiação incidente sem excessiva absorção ou espalhamento.

A transmitância do olho varia com o comprimento de onda. Para a média da população, os comprimentos de onda visíveis estão na faixa compreendida entre 380 nm e 780 nm, já que os meios pelos quais a radiação é transmitida no olho possuem transmissividade nula fora deste intervalo. Ao atingir a retina, a radiação estimula duas classes distintas de células fotossensíveis, os cones e os bastonetes.

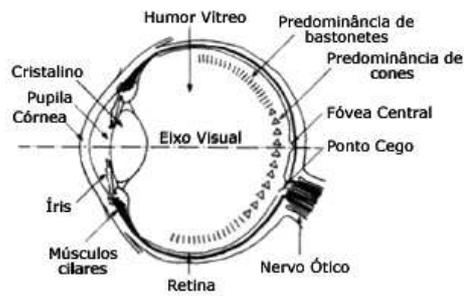


Figura 3.2 – Seção transversal do olho humano [Iida, 1990]

Os cones, ou receptores fotópicos, se localizam na fóvea, região central da retina, e são sensíveis aos níveis de luminância com os quais as pessoas estão acostumadas a desenvolver suas atividades diárias, isto é, maiores que 3 cd/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 iluminância muito baixos, menores que $0,001 \text{ cd/m}^2$ [IESNA, 2000]. Estes níveis ínfimos estão fora do escopo deste trabalho, portanto, os bastonetes e a visão escotópica não constituirão objeto de estudo.

Para que se possa descrever a visão fotópica – ou de maiores comprimentos de onda –, é utilizada uma razão entre a percepção luminosa e a irradiação no olho (lúmen/watt), denominada eficácia luminosa. A eficácia luminosa assume diferentes valores ao longo do espectro, explicando o fato de algumas cores serem vistas mais intensamente do que outras. O olho humano possui uma sensibilidade mais apurada para as cores verde e amarelo, que estão no centro do espectro visível. Esta sensibilidade diminui gradativamente conforme se aproxima dos extremos do intervalo, para as cores laranja, anil, vermelho, azul e violeta. As cores, seus comprimentos de onda e frequências estão relacionados na Tabela 3.2.

No comprimento de onda de 555 nm é encontrada a maior quantidade de energia, $683 \text{ lúmens por watt}$. Para os demais comprimentos de onda, é estabelecida uma função adimensional cujos valores são relativos a esta quantidade máxima. A estes valores adimensionais é dado o nome de eficiência luminosa fotópica (V_λ), representada na Figura 3.3.

Seewald, 2006, apresentou um ajuste de dados que permite equacionar o comportamento da Figura 3.3 com a expressão:

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

Tabela 3.2 – Cores do espectro visível

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

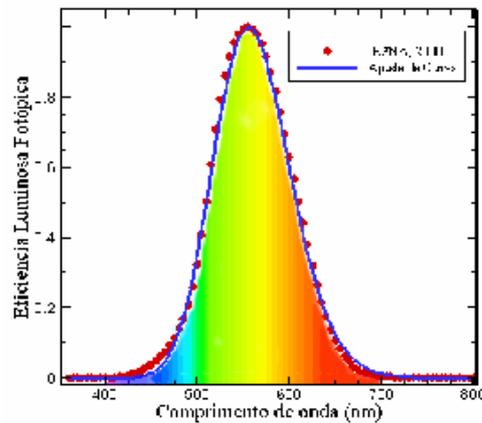


Figura 3.3 – Eficiência luminosa fotópica (V_λ) para os diferentes comprimentos de onda [IESNA, 2000]

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 $360 \text{ nm} \leq \lambda \leq 800 \text{ nm}$.

O fluxo luminoso é obtido a partir do fluxo radiante pela equação:

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

onde $q^{(w)}$ é a potência do fluxo radiante, em watt, e $q^{(l)}$ representa a intensidade visível deste fluxo, em lúmen.

A percepção da cor dependerá da forma como o fluxo luminoso se encontra distribuído ao longo do espectro visível. Vários modelos matemáticos foram criados para descrevê-la, partindo de uma distribuição de energia luminosa espectral, na tentativa de simular o processamento realizado pelo cérebro humano. Um destes modelos é o sistema Munsell, que padroniza

as cores por meio das variáveis matiz, claridade e saturação [IESNA, 2000].

3.3 Especificações de Iluminação

A norma NBR 5413 da ABNT [ABNT, 1992], pode ser citada como a principal fonte de informação para projetos de iluminação, tendo sido, inclusive, utilizada como referência para a criação da Norma de Regulamentação de Segurança do Ministério do Trabalho. Esta norma fornece informações confiáveis para o êxito de projetos de iluminação, tais como a iluminância adequada para o exercício de diferentes atividades, como pode ser visto na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Iluminância por classe de tarefas visuais, conforme a norma NBR 5413

Classe	Iluminância (lx)	Tipo de Atividade
A Iluminação geral para áreas usadas interruptamente ou com tarefas visuais simples	20 - 30 - 50	Área pública com arredores escuros
	50 - 75 - 100	Orientação simples para permanência curta
	100 - 150 - 200	Recintos não usados para trabalho contínuo, depósitos
	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

Fonte: ABNT, 1992

A iluminância sugerida pela norma é apresentada com um valor mínimo, um médio e um máximo para cada atividade. A norma dispõe ainda de algumas considerações específicas sobre as atividades e demonstra uma metodologia na qual pondera fatores como idade do observador, velocidade, precisão requerida para a tarefa e, ainda, a refletância da superfície no fundo do

campo de visão.

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

Conforme OIT, 2001, a iluminação em valores médios para as grandes salas, orientada para o local de realização da tarefa, direciona a concentração do operador, aumenta a produtividade e reduz a ocorrência de acidentes. A título de exemplo, o iluminamento 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. Os resultados mostraram que os trabalhadores tinham preferência pelos níveis mais baixos, compreendidos entre 322 lx e 241 lx. Em estudos correlatos, Grandjean, *op. cit.*, apresenta resultados estatísticos que demonstram a insatisfação de trabalhadores de um escritório submetidos a intensidades de iluminância superiores a 1000 lx.

O rendimento das tarefas visuais tende a crescer com o logaritmo da iluminância, a partir de 10 lx até cerca de 1000 lx, concomitante à redução da fadiga. A partir deste ponto, o aumento da iluminância não provoca melhora considerável no rendimento, ao passo que a fadiga visual começa a aumentar. O limite máximo de iluminância recomendada é de 2000 lx; excepcionalmente, 3000 lx para tarefas de montagem ou inspeção [Iida, 1990].

3.4 Métodos Para Projeto de Iluminação

O Método dos Lumens, apresentado por Phillips, 1981, IESNA, 2000, e OSRAM, 2005, é uma forma prática para calcular rapidamente uma configuração de luminárias que atenda aos requisitos de um projeto de iluminação. No entanto, não há como assegurar que a configuração encontrada gere o fluxo luminoso correto no plano de trabalho, ou mesmo que o fluxo seja uniforme ao longo do plano.

O método tem por base uma formulação algébrica na qual o fluxo luminoso gerado pelas lâmpadas instaladas no teto deve ser igual ao especificado para o plano de trabalho. As variáveis de projeto relacionadas ao método constam da Tabela 3.4

Tabela 3.4 – Variáveis de projeto para o Método dos Lumens

Variável de projeto	Símbolo
Comprimento	X
Largura	Y
Área	A
Altura	Z
Refletividade do teto	ρ_{teto}
Refletividade da parede	ρ_{parede}
Refletividade do piso	ρ_{piso}
Iluminância planejada	$q''^{(l)}$

O fluxo luminoso planejado para um determinado plano de trabalho, em face das variáveis da Tabela 3.4, é dado pela equação:

$$q^{(l)} = q''^{(l)} \cdot A \quad (3.3)$$

Se forem considerados os fenômenos que ocorrem no ambiente, tais como a perda de radiação luminosa provocada pela absorção que ocorre nas paredes, conclui-se que um conjunto de lâmpadas que emita $q^{(l)}$ certamente não provê a iluminância planejada. Por esta razão, no Método dos Lumens, perdas desta natureza são corrigidas pelo fator de utilização (η), que é determinado pelo índice do recinto (κ), assim definido:

$$\kappa = \frac{X \cdot Y}{Z(X + Y)} \quad (3.4)$$

O índice do recinto, juntamente com as refletividades ρ_{teto} , ρ_{piso} e ρ_{parede} , permite encontrar em tabelas o valor de η para o tipo de luminária sob consideração.

A redução da iluminância também é ocasionada pelas condições de manutenção a que as lâmpadas, luminárias e paredes estão sujeitas. A poeira pode prejudicar significativamente a reflexão nas superfícies, bem como tornar o bulbo das lâmpadas opaco.

Diversos são os itens que contribuem para o fator de depreciação (Π), que, por não ser tabelado, deve ser estimado com base na experiência do projetista. Em Phillips, 1981 são encontradas algumas sugestões de valores para o fator de depreciação. Para recintos limpos, médios e sujos, os fatores recebem, respectivamente, os valores de 0,8, 0,7 e 0,6. De acordo com OSRAM, 2005, o fator de depreciação 0,8 pode ser aplicado a ambientes com boas condições de manutenção; já o fator 0,6 é aplicável a ambientes com pouca ou nenhuma manutenção.

Em face do exposto, a iluminância do teto, e que por conseguinte deve ser atendida pelo conjunto de lâmpadas instaladas, passa a ser calculada por:

$$q_{teto}^{(l)} = \frac{q''^{(l)}}{\eta\Pi} \quad (3.5)$$

Para calcular o número de lâmpadas, é necessário escolher, primeiramente, o modelo que será utilizado. Em função do escopo deste trabalho, que trata o projeto de iluminação como um problema de transferência de calor, optou-se por modelos de lâmpadas incandescentes. O fluxo luminoso (Φ), para os modelos fabricados por OSRAM, 2005, são indicados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Catálogo de lâmpadas incandescentes

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	3250	750
INC250	220	250	4200	750

Fonte: OSRAM, 2005

Assim, o número de lâmpadas necessárias para o projeto é dado por:

$$n = \frac{q_{teto}^{(l)} A}{\Phi} \quad (3.6)$$

O valor encontrado a partir da Equação 3.6 deve ser ajustado, de acordo com a geometria do ambiente, para o valor mais próximo, com o objetivo de permitir uma distribuição uniforme das lâmpadas no teto. É recomendado que a distância entre as luminárias seja o dobro da distância entre a luminária e a parede lateral. O Método dos Lumens será retomado, com detalhes adicionais, no Capítulo 6.

Outro método aplicado em projetos de iluminação é o Ponto a Ponto, também denominado Método das Intensidades Luminosas. Ele permite calcular o iluminamento em qualquer ponto da superfície, individualmente para cada fonte luminosa cujo fluxo atinja o ponto considerado. O iluminamento total corresponde à soma dos iluminamentos individuais de cada fonte luminosa. No método, são considerados os ângulos de incidência da radiação e são atribuídas às superfícies fatores de reflexão, de acordo com suas cores e texturas. Um exemplo de software que implementa este método é o WinElux.

4 SOLUÇÃO DE PROBLEMAS INVERSOS

Quando se projeta a iluminação de um ambiente, busca-se dimensionar as lâmpadas de acordo com certas condições para obter a iluminação desejada. O dimensionamento se inicia pela determinação das dimensões do ambiente, juntamente com suas propriedades, seguido da discretização das paredes em pequenas superfícies. A discretização é necessária para que se possa aplicar, em seguida, os métodos numéricos de solução.

Algumas superfícies representarão as fontes luminosas e outras simplesmente atuarão passivamente. Para as superfícies consideradas fontes luminosas, é preciso determinar uma das condições de contorno, fluxo ou temperatura, necessárias para adequar as superfícies do ambiente de projeto. A partir desta experimentação inicial, determinam-se as condições de contorno das demais superfícies.

Em seguida, o problema é resolvido pelo Método das Cavidades Radiantes, e a solução é comparada às condições especificadas, para verificar se estas foram atendidas. Caso não tenham sido atendidas, será necessário determinar novas posições ou novos valores para a potência das lâmpadas e reiniciar o processo. Este ciclo deverá ser repetido tantas vezes quantas forem necessárias até que sejam obtidos os valores especificados para as condições de iluminação da superfície de trabalho.

A Figura 4.1 ilustra, na forma de fluxograma, o algoritmo descrito, que nada mais é do que o método direto para solucionar problemas de iluminação.

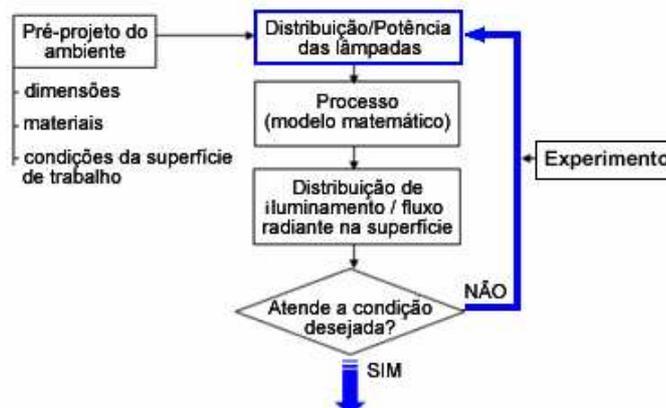


Figura 4.1 – Fluxograma do processo de cálculo direto

Pelo método direto, é possível calcular a potência ou a posição das lâmpadas a partir do fluxo desejado na superfície de trabalho, ou seja, determina-se a causa a partir do efeito. Problemas desta natureza são denominados problemas de característica inversa, ocorrem comumente em ciência e engenharia e requerem métodos especiais de solução.

A resolução de problemas inversos envolve conhecimentos numéricos e experimentais. Segundo Braga Filho, 2002, problemas inversos constituem uma área de otimização, isto é, uma maneira melhor de obter resultados satisfatórios em um experimento, maximizando a informação descrita e minimizando o erro. Isto requer que se defina a diferença entre o problema na sua forma direta e o problema inverso.

Neste trabalho, a aplicação da metodologia inversa considerará uma cavidade radiante de formato cúbico. Três faces são elementos de projeto e três são elementos fontes. Estas serão identificadas pelos números de 4 a 6 e aquelas, pelos números de 1 a 3.

Uma vez que não existem elementos de parede a serem considerados, a aplicação das equações de cavidades radiantes resultará em um sistema linear do tipo $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$, onde a matriz \mathbf{A} é formada pelos fatores de forma entre os elementos de superfície de projeto e os elementos das lâmpadas, o vetor \mathbf{x} é formado pelas radiosidades dos elementos das lâmpadas e o vetor \mathbf{b} é formado pela irradiação da superfície de projeto e pela energia radiante incidente nas superfícies adiabáticas do ambiente. A representação deste sistema é:

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

Em alguns casos, a matriz \mathbf{A} não é quadrada, ou seja, é mal condicionada. É normal que o número de equações (elementos de projeto) difira do número de incógnitas (elementos de lâmpadas), o que inviabiliza a aplicação de métodos como o de eliminação gaussiana (Gauss-Seidel) para solucionar esta classe de problemas. Para encontrar uma solução aceitável, faz-se necessário condicionar a matriz por meio de métodos que estabilizem o problema, permitindo a obtenção de soluções aproximadas. A estabilidade é atingida aplicando-se métodos de regularização.

4.1 Métodos de Regularização

O objetivo precípua dos métodos de regularização é obter uma aproximação da solução de um problema mal posto partindo de soluções de problemas bem postos. A aproximação assim obtida é estável e converge para a solução do problema inverso considerado, ao passo que a solução aproximada deve ser determinada de forma que seja mais suave e compatível com os dados esperados, considerando um erro aceitável predeterminado. A ideia básica dos métodos é esquematizada na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Ideia básica dos métodos de regularização [Campos Velho, 2002]

Os métodos são formulados como problemas de otimização com restrições, e são caracterizado, segundo Campos Velho, 2002, por receberem o acréscimo de informações fisicamente válidas, o que resulta na transformação do problema mal posto num problema bem posto. A comparação entre o método direto e inverso acrescido da regularização é mostrada na Figura 4.3.

A introdução de constantes adicionais fisicamente válidas estabiliza o problema, porém, não obsta à ocorrência de erros na solução. Geralmente, quanto maior for o grau de estabilização imposto ao problema, maior será o erro residual. Há, portanto, um balanço a ser feito entre estes dois aspectos da solução: estabilidade e erro residual (resíduo).

Para resolver o operador de regularização, são conhecidos o Método de Regularização de Tikhonov (inversão direta) e a Solução do Problema de Otimização.

4.2 Algoritmos de Otimização

Problemas de otimização são aqueles que têm por objetivo maximizar ou minimizar funções de uma ou mais variáveis num determinado domínio, usualmente com restrições aplicadas às variáveis. Para resolvê-los, são empregados algoritmos de otimização evolutivos determinísticos ou probabilísticos.

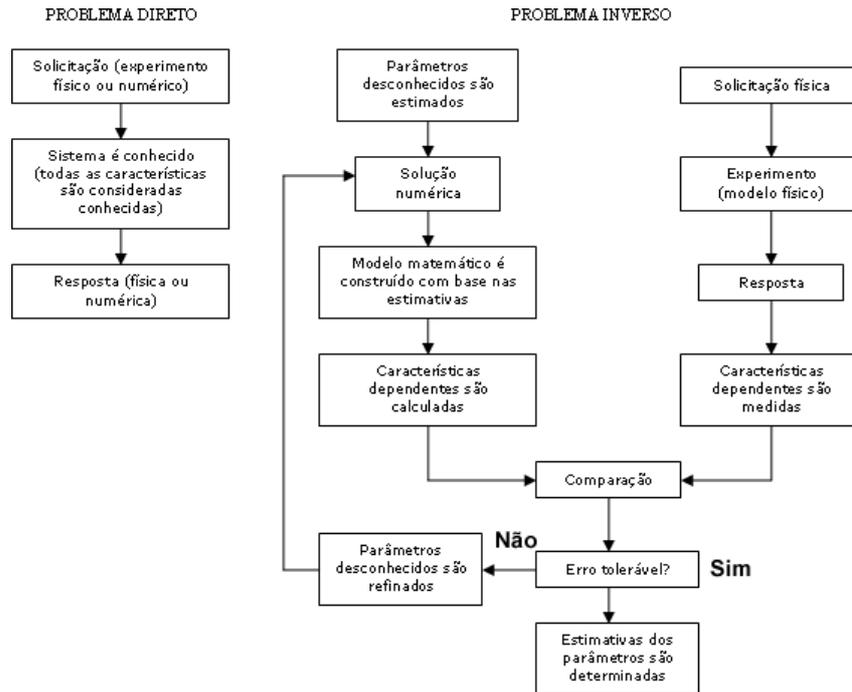


Figura 4.3 – Comparação entre o método direto e o inverso regularizado [Braga Filho, 2002]

Quando são utilizados algoritmos de otimização evolutivos, é necessário provê-los de uma configuração inicial que disponha de critérios que auxiliem na qualidade das análises dos resultados, fazendo alterações de modo que, ao final do número de iterações, a solução seja ótima. Não há garantia de que ao final das iterações um ótimo global seja encontrado, mas a solução geralmente é de boa qualidade, mesmo para problemas mais complexos.

Para esta classe de problemas, é necessário definir quais são as possíveis soluções e como elas serão descritas (variáveis de projeto), como medir a qualidade das soluções (função de otimização ou função objetivo) e qual a vizinhança de uma possível solução (restrições). Estas definições, segundo Vanderplaats, 1998, podem ser tratadas como segue.

A função objetivo a ser maximizada ou minimizada é definida por:

$$F(x) \quad (4.2)$$

e está sujeita a:

$$g_j(x) \leq 0 \quad (4.3)$$

$$h_k(x) \leq 0 \quad (4.4)$$

$$x_{i_inf} \leq x_i \leq x_{i_sup} \quad (4.5)$$

onde $j = 1, \dots, m$ são as restrições de desigualdade; $k = 1, \dots, l$ são as restrições de igualdade e $i = 1, \dots, n$ são as restrições laterais.

As variáveis de projeto são representadas por:

$$x^T = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \quad (4.6)$$

onde x_{i_inf} e x_{i_sup} são, respectivamente, o limite inferior e o superior da variável x_i .

As inequações 4.3, 4.4, e 4.5 podem ser lineares ou não, e explícitas ou implícitas em x .

Uma variável de projeto equivale a um dos arranjos possíveis, dentro do espaço de configurações de $F(x)$, que satisfaça às restrições eventualmente impostas. O procedimento que transforma uma configuração em outra será designado neste trabalho como “flipar”. É oportuno registrar que, usualmente, na área de algoritmos evolutivos, o procedimento é denominado “perturbação”. O conjunto de novas configurações originado de uma configuração específica x^T depende das restrições impostas e do procedimento de flipagem utilizado.

Os problemas de otimização podem ser classificados segundo diversos critérios relacionados às propriedades da função objetivo $F(x)$ e ao conjunto de soluções viáveis x^T .

Dentre os métodos de otimização desenvolvidos com ênfase em sistemas inspirados pela natureza, pode-se citar os algoritmos genéticos, Recozimento Simulado, redes neurais e algoritmos formiga. Além destes, a Figura 4.4 mostra os vários métodos numéricos de otimização e sua classificação.

Dentre as técnicas elencadas na Figura 4.4, destaca-se a Otimização Extrema (EO), que é um método estocástico inspirado na natureza. Criado por Stefan Boettcher e Allon G. Percus (Bak et al., 1987), o EO fundamenta-se no conceito de criticalidade auto-organizada (*Self-Organized Criticality* - SOC). Este conceito descreve a complexidade emergente em sistemas físicos, nos quais uma estrutura com adaptação otimizada emerge naturalmente, pela simples comparação com o extremamente ruim. A teoria de SOC tem por base a concepção de que em sistemas complexos que possuem muitos elementos interagindo entre si, evoluindo naturalmente para um estado crítico, uma pequena mudança em um deles gera “avalanches” que podem atingir quaisquer outros elementos que façam parte do sistema [Bak e Chen, 1991].

De acordo com Souza, 2003, um método de otimização baseado no modelo de Bak-Sneppen, e que possuísse uma busca dinâmica com características de SOC, possibilitaria atingir soluções ótimas rapidamente, pela modificação sistemática das espécies menos adaptadas da

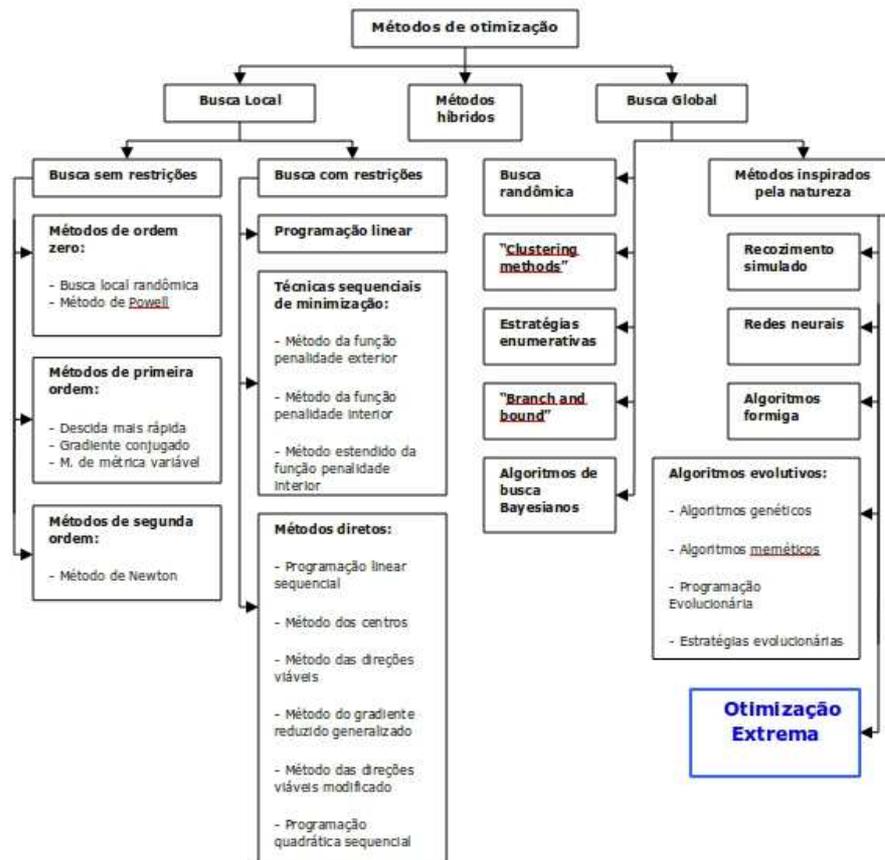


Figura 4.4 – Técnicas numéricas para uso em problemas de otimização [Sousa et al., 2003]

população, ao mesmo tempo em que poderia escapar de mínimos locais por meio de avalanches.

4.3 Método da Otimização Extrema Generalizada

O sucessor do EO é o método da Otimização Extrema Generalizada (GEO), que foi selecionado para resolver o problema de iluminação considerado neste trabalho. Neste algoritmo, pressupõe-se que a probabilidade de uma variável ser escolhida para ser modificada é:

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

onde P é a probabilidade, em porcentagem; k é o índice de adaptabilidade e τ é o parâmetro, que pode variar de 0 a $+\infty$.

Quando $\tau \rightarrow 0$, o algoritmo torna a busca pelo valor ótimo totalmente aleatória, situação em que todas as variáveis têm a mesma probabilidade de serem escolhidas para sofrer mutação.

maior adaptabilidade, N . Na próxima iteração, outro bit será escolhido para sofrer mutação, e o ciclo se repetirá até que o critério de parada seja satisfeito. A melhor configuração de bits identificada durante processo é armazenada e, no final, é recuperada e apresentada como resposta.

Há somente um parâmetro livre que pode ser ajustado no GEO, diferentemente dos algoritmos genéticos e do recozimento simulado, para os quais existem, no mínimo, três. Este parâmetro unitário possui um intervalo de variação relativamente mais estreito, e é válido para uma ampla gama de problemas de otimização. Estes ajustes menos dispendiosos no GEO conferem-lhe vantagem em relação aos outros algoritmos.

4.3.1 Aplicação do Algoritmo da Otimização Extrema Generalizada

Para implementar o GEO, é necessário, primeiramente, definir o número de bits que representará cada uma das variáveis de projeto. O fator determinante deste número é a precisão requerida pelo problema. No domínio contínuo, a inequação que permite calcular o número de bits necessários à representação de uma variável contínua é (Lin e Hajela, 1992):

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

onde m é o número de bits; p é a precisão requerida; x_i é a variável de projeto; e x_{i_inf} e x_{i_sup} são, respectivamente, os valores mínimo e máximo da variável x_i .

O número m obtido pela Inequação 4.8 corresponde ao número mínimo de bits l_i necessários para representar a variável x_i no GEO. Se o valor calculado para m não for um número inteiro, atribui-se a l_i o próximo número inteiro superior a m .

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

$$x_i = x_{i_inf} + (x_{i_sup} - x_{i_inf}) \cdot \frac{x_{B_{i0}}}{2^{l_i} - 1} \quad (4.9)$$

onde x_{i_10} é o número inteiro na base decimal correspondente ao valor da variável binária x_i .

Antes de iniciar a busca do valor ótimo, o parâmetro τ deve ser definido. Para cada problema, existe um valor de τ que torna mais eficiente a busca pelo mínimo, portanto, o parâmetro deve ser bem escolhido.

De acordo com Souza, 2003, o algoritmo GEO constitui-se dos seguintes passos:

1. Inicializa-se aleatoriamente uma sequência binária que codifica N variáveis de projeto.
2. Codifica-se cada variável em uma subsequência de comprimento $l_i = 1, N$.
3. Calcula-se, para uma configuração inicial de bits C , o valor da função objetivo V , e atribui-se $C_{melhor} = C$ e $V_{melhor} = V$.
4. Para cada bit da sequência:
 - a) Inverte-se o valor do bit e calcula-se o valor da função objetivo V_i da configuração de bits C_i .
 - b) Atribui-se ao bit um índice de adaptabilidade $\Delta = (V_i - V_{melhor})$, que indica o ganho (ou a perda) observado quando da mudança do valor do bit, comparado ao melhor valor encontrado para a função objetivo até o momento.
 - c) Restitui-se o valor original do bit.
5. Ordenam-se os bits de acordo com os seus índices de adaptabilidade, de $k = 1$, para o menos adaptado, a $k = L$, para o mais adaptado. Em problemas de minimização, valores altos de ΔV_i terão maior “rank”, enquanto que em problemas de maximização ocorre o oposto. Se dois ou mais bits apresentarem o mesmo valor ΔV_i , eles devem ser ordenados aleatoriamente com distribuição uniforme.
6. Escolhe-se, com igual probabilidade, um bit candidato i para sofrer mutação (mudar de 0 para 1 e vice-versa).
7. Gera-se um número aleatório RAN, com distribuição uniforme, no intervalo $[0,1]$.
8. Se $P_i(k) = k^{-\tau} \geq \text{RAN}$, o bit é modificado. Caso contrário, repetem-se os passos 7 a 8 até que um bit seja confirmado para sofrer modificação.
9. Para o bit que sofreu sofreu mutação, atribui-se $C = C_i$ e $V = V_i$.
10. Se $V < V_{melhor}$ e o problema é de minimização, faz-se $V_{melhor} = V$ e $C_{melhor} = C$. Se $V > V_{melhor}$ e o problema é de maximização, faz-se $V_{melhor} = V$ e $C_{melhor} = C$.
11. Repetem-se os passos 4 a 10, até que um dado critério de parada seja satisfeito.
12. Retorna-se C_{melhor} e V_{melhor} .

4.3.2 Variáveis e Restrições no Método da Otimização Extrema Generalizada

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

1. Se a relação $(x_{i_sup} - x_{i_inf}) = 2^N - 1$ for satisfeita, haverá uma sequência de bits que representará todas as N variáveis biunivocamente. Se não existir uma correspondência direta entre uma sequência de bits e as variáveis:
2. O menor número m que satisfaz $2^m > (x_{i_sup} - x_{i_inf}) + 1$ é calculado, e cada uma das N variáveis é associada a uma sequência de bits. Às $2^m - N$ variáveis restantes, são atribuídos valores inteiros fora do intervalo das variáveis, os quais são tratados como soluções inviáveis.
3. As $2^m - N$ variáveis restantes são associadas a inteiros dentro do intervalo viável. Neste caso, uma ou mais variáveis serão associadas a mais de uma sequência de bits.

A última opção evita a necessidade de impor restrições adicionais ao problema, contudo, ela implica, no caso do GEO, em uma probabilidade não uniforme no processo de seleção de um bit que vai sofrer mutação, no passo 6 do algoritmo.

Variáveis discretas podem ser tratadas da mesma forma que variáveis inteiras. O processo é executado em dois passos: primeiro, um número inteiro é associado a cada variável discreta e, segundo, uma das três aproximações descritas anteriormente é usada para codificar estes valores na forma binária.

Para o GEO, as restrições laterais (limites das variáveis de projeto) são diretamente incorporadas quando as variáveis são codificadas na forma binária.

Restrições de igualdade e de desigualdade são tratadas atribuindo-se valores de índices aos bits das sequências. Aos bits que, quando modificados, levarem o algoritmo a soluções inviáveis, é atribuído um índice de adaptabilidade alto, se for um problema de minimização, ou baixo, se for um problema de maximização.

Em problemas de minimização, quando os valores de adaptabilidade são atribuídos aos bits no passo 4, aqueles que, quando invertidos, resultarem em configurações inviáveis recebem

um alto valor ΔV_i . Isto significa que estes bits serão considerados bem adaptados e terão uma baixa probabilidade de serem invertidos no passo 6. Entretanto, a baixa probabilidade não obsta à inversão do bit e, conseqüentemente, não impede o algoritmo de procurar soluções nas regiões inviáveis do espaço de projeto.

A possibilidade de procurar soluções em regiões inviáveis confere ao algoritmo uma grande flexibilidade, que pode ser explorada, por exemplo, em problemas que têm regiões viáveis descontínuas. Neste caso, ao invés de local, a solução obtida terá caráter global.

De fato, o GEO pode até mesmo começar de uma solução inviável. Basta atribuir um valor qualquer a V_{ref} na inicialização do algoritmo, pois ele será substituído pelo primeiro valor viável V encontrado durante a busca.

Esta seção apresentou as principais características do GEO relevantes a este trabalho. A descrição detalhada do método pode ser encontrada em Souza, 2003.

5 METODOLOGIA DE SOLUÇÃO

Consoante os objetivos descritos na Seção 1.2, este capítulo descreve a metodologia de solução desenvolvida e aplicada ao problema. Sucintamente, o objetivo pode ser resumido a determinar a posição e a potência ótimas das fontes de iluminação que satisfaçam, simultaneamente, a regiões distintas do plano de projeto para as quais se deseja prescrever valores de fluxos diferentes.

O ambiente no qual se desenvolve a metodologia tem características previamente definidas, observando-se que as superfícies diferem quanto às condições de contorno, pois algumas podem ter até duas condições enquanto que outras não têm nenhuma.

Inicialmente, considera-se uma sala retangular com características de cavidade radiante, isto é, o balanço energético nas superfícies que compõem a sala é nulo, sinônimo de que o sistema (a sala) não troca energia com o meio. A troca ocorreria, por exemplo, se fosse considerada a existência de portas e janelas na sala.

Para sistematizar o desenvolvimento da metodologia, as superfícies foram distribuídas em três classes: superfície de projeto, lâmpadas e paredes, como é mostrado na Figura 5.1.

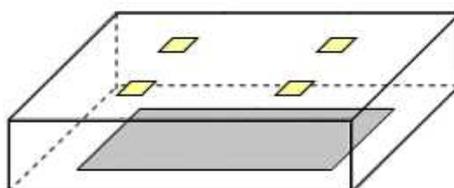


Figura 5.1 – Cavidade considerada no problema

A superfície de projeto, a região cinza no piso, é assim denominada pois sobre ela é que se controla alguma condição. Neste caso, a condição é o iluminamento incidente diferenciado em duas regiões desta mesma superfície.

As lâmpadas, os quadrados amarelos no teto, são modeladas como se fossem superfícies fontes de radiação luminosa delimitadas por um elemento de área da malha numérica.

As paredes, representadas pelas demais regiões, são elementos de superfícies normais.

Por meio de uma malha numérica que envolve toda a cavidade, os planos são subdividi-

dos em pequenas áreas quadradas, denominadas elementos de área.

Os elementos de área que compõem a superfície de projeto são identificados pelo índice jd , e possuem a condição de contorno de irradiação prescrita.

Os elementos de fontes de luz, cujo índice é jl , são os locais geométricos onde se encontram as fontes de iluminação. Não há qualquer condição prescrita para estes elementos, nem mesmo temperatura, fluxo ou localização.

Os elementos de área que compõem as superfícies de paredes, identificados por jw , formam as demais superfícies.

Com exceção das fontes luminosas, as demais superfícies 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. Esta condição de contorno é denominada *parede fria*, e será aplicada às superfícies fontes de luz e paredes ($e_{jd}^{(l)} = e_{jw}^{(l)} \rightarrow 0$).

No plano de projeto são controlados os níveis de fluxo luminoso, objeto principal de estudo. Sobre este plano, em duas regiões distintas, devem ser prescritos diferentes valores de fluxo, um para cada região. Para que isto seja possível, é necessário estabelecer uma relação entre os fluxos das duas regiões. Esta relação, que deve ser definida na função objetivo, será posteriormente determinada, de modo tal que o fluxo de uma das regiões possa assumir valores até duas vezes superiores ao da outra.

Considera-se que todas as superfícies da cavidade são cinza, ou seja, a emissividade e a absorvidade são iguais independente do comprimento de onda da radiação.

Para que a aplicação da metodologia não fique restrita à cavidade especificada e possa ser estendida a diferentes cavidades paralelepípedicas, é conveniente tornar as variáveis do problema adimensionais, de forma que qualquer condição possa ser prescrita.

Uma das condições prescritíveis é a irradiação do plano de projeto, que tem como referencial o valor de iluminância prescrito (q''_{ref}). Todos os valores de fluxo são divididos pelo valor referencial:

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

É oportuno ressaltar que valores adimensionais não devem ser usados em operações com características não lineares. Antes de executar uma operação desta natureza, as grandezas

devem ser tornadas dimensionais. Somente após concluí-la é que os valores devem ser tornados novamente adimensionais. Um exemplo disto é a equação de distribuição de Planck, na qual existe uma dependência não linear em relação à temperatura.

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

1. superfícies de projeto: poder emissivo nulo $(e_{jd}^{(l)} = 0)$ e iluminância total unitária $(Q_{i,jd}^{prescrito} = 1)$
2. superfícies de parede: poder emissivo nulo $(e_{jw}^{(l)} = 0)$
3. superfícies de lâmpada: nenhuma condição de contorno.

Observe-se, a partir das condições de contorno, que o problema é mal condicionado, haja vista existirem superfícies para as quais duas condições foram especificadas e outras que não as têm. A localização das lâmpadas, em função dos objetivos deste trabalho, também é considerada uma incógnita. Obviamente, para que a solução desenvolvida seja completa, será necessário, em algum momento, especificar a localização das fontes luminosas.

Em face do mau condicionamento do problema, seria necessário, primeiramente, aplicar algum método de regularização. Entretanto, o método de otimização utilizado na solução do modelo matemático se encarrega de encontrar os fluxos das lâmpadas que atendem às condições prescritas e suas respectivas posições, tornando o problema bem condicionado. O resultado disto é que o problema assume a forma de um problema inverso.

5.1 Formulação do Problema

Para determinar os valores de potência e o posicionamento das lâmpadas, o sistema de equações foi construído a partir das equações do Método das Radiosidades.

As superfícies de projeto e de parede, uma vez que lhes foram atribuídas condições de contorno de temperatura prescrita, podem ter suas equações de balanço descritas em função do poder emissivo.

As superfícies de lâmpadas, às quais nenhuma condição de contorno foi atribuída inicialmente, serão descritas com condição de fluxo radiante conhecido, pois são as superfícies de maior interesse.

Destarte, o sistema de equações para as superfícies jd , jw e jl é:

$$Q_{o,jd} = \varepsilon_{jd} \cdot \frac{e_{jd}^{(l)}}{q_{ref}''} + (1 - \varepsilon_{jd}) \cdot \left(\sum_{jdt=1}^{jdt} F_{dd} \cdot Q_{o,jd} + \sum_{jw=1}^{jw} F_{dw} \cdot Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jl} F_{dl} \cdot Q_{o,jl} \right) \quad (5.2)$$

$$Q_{o,jw} = \varepsilon_{jw} \cdot \frac{e_{jw}^{(l)}}{q_{ref}''} + (1 - \varepsilon_{jw}) \cdot \left(\sum_{jdt=1}^{jdt} F_{wd} \cdot Q_{o,jd} + \sum_{jw=1}^{jw} F_{ww} \cdot Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jl} F_{wl} \cdot Q_{o,jl} \right) \quad (5.3)$$

$$Q_{o,jl} = Q_{r,jl} + \left(\sum_{jdt=1}^{jdt} F_{ld} \cdot Q_{o,jd} + \sum_{jw=1}^{jw} F_{lw} \cdot Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jl} F_{ll} \cdot Q_{o,jl} \right) \quad (5.4)$$

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

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

As condições de contorno do problema são:

1. superfícies de projeto: $e_{jd}^{(l)} = 0$;
2. superfícies de parede: $e_{jw}^{(l)} = 0$;

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

$$Q_{o,jd} = (1 - \varepsilon_{jd}) \cdot \left(\sum_{jw=1}^{jw} F_{dw} \cdot Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jl} F_{dl} \cdot Q_{o,jl} \right) \quad (5.5)$$

$$Q_{o,jw} = (1 - \varepsilon_{jw}) \cdot \left(\sum_{jdt=1}^{jdt} F_{wd} \cdot Q_{o,jd} + \sum_{jw=1}^{jw} F_{ww} \cdot Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jl} F_{wl} \cdot Q_{o,jl} \right) \quad (5.6)$$

$$Q_{o,jl} = Q_{r,jl} + \left(\sum_{jdt=1}^{jdt} F_{ld} \cdot Q_{o,jd} + \sum_{jw=1}^{jw} F_{lw} \cdot Q_{o,jw} \right) \quad (5.7)$$

A localização de cada lâmpada e os valores dos fluxos são determinados pelo método GEO. Consequentemente, a todos os parâmetros desconhecidos é atribuído um valor, resultando

em um sistema que tem tantas equações quantas forem as superfícies consideradas e o mesmo número de incógnitas. O equacionamento assume, portanto, a forma de um sistema bem condicionado, com dominância da diagonal, e que pode ser resolvido pelo Método de Gauss-Seidel.

Os valores do fluxo líquido nas superfícies de projeto e paredes também podem ser encontrados, de modo que as equações correspondentes a jd e jw tornam-se, respectivamente:

$$Q_{r,jd} = Q_{o,jd} - \left(\sum_{jw=1}^{jw} F_{dw} \cdot Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jl} F_{dl} \cdot Q_{o,jl} \right) \quad (5.8)$$

$$Q_{r,jw} = Q_{o,jw} - \left(\sum_{jd=1}^{jd} F_{wd} \cdot Q_{o,jd} + \sum_{jw=1}^{jw} F_{ww} \cdot Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jl} F_{wl} \cdot Q_{o,jl} \right) \quad (5.9)$$

A equação para o fluxo incidente na superfície de trabalho jd é:

$$Q_{i,jd} = \left(\sum_{jw=1}^{jw} F_{dw} \cdot Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jl} F_{dl} \cdot Q_{o,jl} \right) \quad (5.10)$$

Por fim, o erro do fluxo líquido calculado na solução de jd é dado por:

$$erro_{jd} = \left| \frac{Q_{i,jd}^{atual} - Q_{i,jd}^{anterior}}{Q_{i,jd}^{atual}} \right| \quad (5.11)$$

5.2 Balanço de Energia

Depois de obtidos os resultados apresentados pela metodologia, é importante realizar um balanço de energia na cavidade.

Os fluxos líquidos das superfícies são considerados na sua totalidade, ou seja, é calculado o somatório dos fluxos líquidos totais em todas as superfícies.

A solução será tanto melhor quanto menor for o desvio do balanço global em relação ao valor nulo. Uma cavidade numericamente correta é caracterizada por valores de balanço da ordem de 10^{-3} . É de interesse, também, relacionar o balanço global de energia à quantidade total de energia em questão.

O balanço global relativo é dado por:

$$bal = \frac{\sum_{jd=1}^{jdt} Q_{r,jd} + \sum_{jw=1}^{jw} Q_{r,jw} + \sum_{jl=1}^{jlt} Q_{r,jl}}{\sum_{jd=1}^{jdt} |Q_{r,jd}| + \sum_{jw=1}^{jw} |Q_{r,jw}| + \sum_{jl=1}^{jlt} |Q_{r,jl}|} \quad (5.12)$$

Observe-se que a Equação 5.12 permite dimensionar a magnitude do balanço global independentemente da quantidade de energia trocada.

5.3 Avaliação da Metodologia

O último passo consiste em avaliar a capacidade da metodologia proposta em relação ao seu objetivo de definir a posição e a potência das lâmpadas.

Avaliar o resultado obtido na procura pelo ótimo global, referente à análise inversa, requer a minimização da função objetivo F , que é definida como sendo o quadrado da diferença entre o fluxo luminoso prescrito e o efetivamente obtido na superfície de projeto.

Os valores da função objetivo podem ser diversos, conforme sejam os valores atribuídos a α , observando-se que α também exerce influência no segundo termo da equação:

$$F = \alpha \sqrt{\sum_{jd} \left(|Q_{i,jd,1}^{prescrito}| - |Q_{i,jd,1}| \right)^2} + (1 - \alpha) \sqrt{\sum_{jd} \left(|Q_{i,jd,2}^{prescrito}| - |Q_{i,jd,2}| \right)^2} \quad (5.13)$$

Por derradeiro, cabe avaliar os desvios médio e máximo da solução. Ambos os desvios, cujos valores são expressos em forma percentual, relacionam a iluminância prescrita à que foi efetivamente atingida pela metodologia.

Ao desvio médio corresponde a seguinte equação:

$$desvio_{medio} = \frac{\sum_{jd} \left| \frac{Q_{i,jd} - Q_{i,jd}^{prescrito}}{Q_{i,jd}^{prescrito}} \right|}{M} \times 100 \quad (5.14)$$

onde M é o número de superfícies de projeto.

Por sua vez, o desvio máximo da iluminância na superfície de projeto é dado por:

$$desvio_{maximo} = \max_{jd} \left| \frac{Q_{i,jd} - Q_{i,jd}^{prescrito}}{Q_{i,jd}^{prescrito}} \right| \times 100 \quad (5.15)$$

6 RESULTADOS

A geometria adotada para os problemas estudados neste trabalho é a mesma utilizada por Cassol et al., 2008, dando sequência ao tema por eles proposto. O ambiente considerado tem forma de cavidade paralelepípedica, de 15x12x3 m, com iluminação exclusivamente artificial, gerada por lâmpadas instaladas no teto.

As medidas da cavidade foram tornadas adimensionais em relação ao eixo x , de 15 m, de modo que o comprimento (X), a largura (Y) e a altura (Z), terão, respectivamente, as proporções adimensionais: $X/X = 1$, $Y/X = 0,8$, e $Z/X = 0,2$. Com vistas a simplificar o processamento, será considerada a simetria existente entre dois planos perpendiculares, conforme ilustrado na Figura 6.1. Por efeito da simetria, as dimensões serão consideradas como $X/2$, $Y/2$ e Z .

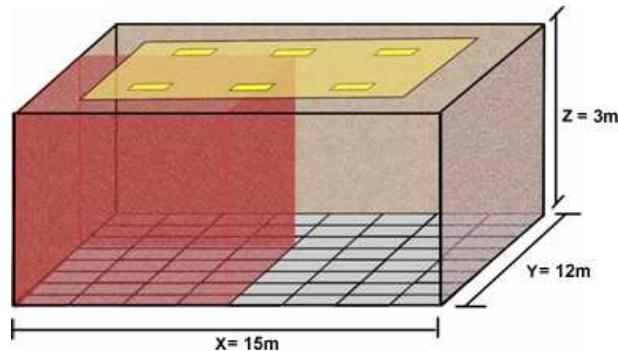


Figura 6.1 – Cavidade com plano de simetria considerado

A emissividades na superfície de trabalho será $\varepsilon_{jd} = 0,9$ e, para as superfícies de parede e teto, $\varepsilon_{jw} = 0,5$. Os valores de iluminância são retirados da Tabela 3.3, para tarefas visuais da classe B (trabalhos de escritório).

A potência e a localização das lâmpadas serão determinadas, primeiramente, pelo Método dos Lumens e, posteriormente, pelo método inverso.

6.1 Independência de Malha

O Método das Radiosidades, para que possa ser aplicado, requer o conhecimento prévio do número mínimo de elementos a serem utilizados na discretização da cavidade. Para determiná-lo, deve-se conduzir um estudo de independência de malha.

Com o conhecimento da independência de malha, além limitar o tempo de processamento computacional, é possível obter valores que não variem com o refinamento da malha. Este estudo foi desenvolvido por Seewald, 2006 e, mais recentemente, por Cassol et al., 2008, que o desenvolveram, para a geometria considerada, com 30x24x6 elementos discretos, relativos aos eixos de coordenadas x , y e z .

6.2 Resultados de Métodos Tradicionais de Iluminação

Os resultados encontrados foram comparados aos obtidos por métodos já consagrados, como o dos Lumens, apresentado no Capítulo 3.

O Método dos Lumens, que permite tão somente determinar o número de fontes luminosas, foi aplicado com as configurações apresentadas na Tabela 6.1. Posteriormente, o fluxo foi calculado pelo Método das Radiosidades.

Tabela 6.1 – Dados de projeto para aplicação do Método dos Lumens

Variável de projeto	Valor
Comprimento	15 m
Largura	12 m
Área	180 m ²
Altura	3m
Refletividade do teto	0,5
Refletividade da parede	0,5
Refletividade do piso	0,1
Iluminância planejada	500 lx

O índice do recinto κ , determinado pela Equação 3.4, calculado com os dados de entrada da Tabela 6.1, resulta em 2,2.

O fator de utilização η deste projeto é 0,59, extraído da tabela apresentada em Phillips, 1981. A tabela foi indexada pelo valor resultante da combinação de κ , previamente calculado, com a refletividade das superfícies.

O fator de depreciação, por se tratar de um ambiente no qual se desconsidera este fenômeno, é $\Pi = 1$.

O fluxo luminoso especificado para o plano de projeto é 500 lx.

A iluminância, aplicada a Equação 3.5, é:

$$q^{(l)} = \frac{q_{\text{piso}}^{(l)}}{hP} = \frac{500}{1(0,59)} = 847,45 \text{ lx} \quad (6.1)$$

O número de luminárias necessárias é calculado pela Equação 3.6. As lâmpadas escolhidas têm potência individual de 250 W e fluxo luminoso individual de 4205 lm, segundo o catálogo OSRAM, 2005. Substituindo-se estes valores na equação, obtém-se:

$$n = \frac{q_{\text{piso}}^{(l)} A}{\Phi} = \frac{(847,45)(180)}{4250} = 35,8 \quad (6.2)$$

Este valor pode ser convenientemente arredondado para $n = 36$, de modo que a distribuição das luminárias pode ser feita simetricamente em 6 fileiras no sentido da largura e em 6 fileiras ao longo do comprimento da cavidade. Este arranjo está ilustrado na Figura 6.2. Os valores de Δx e Δy são, respectivamente, $15/6$ e $12/6$ (2,5 m e 2 m). O fluxo resultante no teto é de 40 W/m^2 .

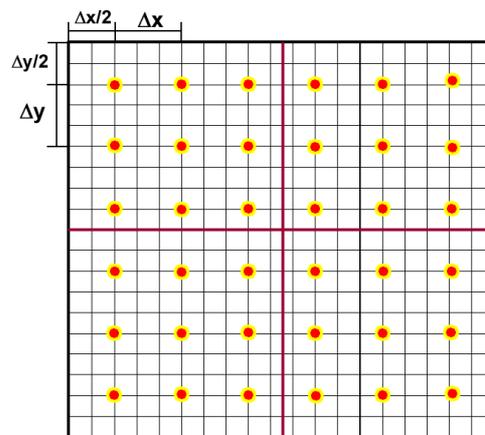


Figura 6.2 – Arranjo para a instalação de 36 lâmpadas segundo o Método dos Lumens

O cálculo da distribuição do fluxo luminoso radiante será feito pelo Método das Radio-sidades, apresentado na Subseção 2.1.3, implementado por um programa escrito em linguagem FORTRAN. Por meio deste cálculo, os valores da irradiação no plano de projeto são encontrados de forma direta. A malha utilizada na discretização das superfícies, com as fontes distribuídas em um quarto da região, é mostrada na Figura 6.3. A restrição do cálculo a apenas um quarto da região se justifica pela simetria do problema, referida na introdução deste capítulo. A disposição das fontes é tal qual foi determinada pelo Método dos Lumens.

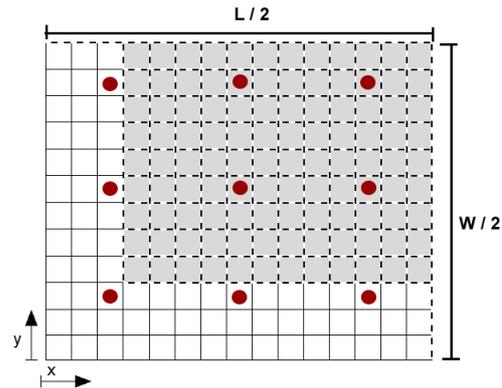


Figura 6.3 – Representação da malha numérica utilizada

Os resultados obtidos para os valores dos fluxos de iluminação sobre a superfície de trabalho ($Z=0$) são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Fluxos de iluminação no plano de trabalho calculados pelo Método das Radiosidades

Fluxo Desejado (lx)	Fluxo Médio (lx)	Fluxo Máximo (lx)	Desvio Médio (%)	Desvio Máximo (%)
500	738	842	45,68	66,30

O valor médio dimensional, 738 lx, é superior ao fluxo especificado, 500 lx. A diferença decorre do superdimensionamento natural do Método dos Lumens, que não prevê com exatidão se a energia emitida no teto será a mesma que chegará à superfície de trabalho. A incidência de fluxo está concentrada no centro da cavidade, como mostra o gráfico da Figura 6.4. O valor do desvio nesta configuração está por volta de 45%, o que permite concluir que o Método dos Lumens projeta uma condição de iluminância pouco uniforme, acima do esperado na área central e muito inferior próximo às paredes. Também é perceptível que as regiões mais externas da superfície são fortemente afetadas pela proximidade das paredes.

Os resultados alcançados também foram comparados aos obtidos pelo software WinElux, versão 3.0, mantidos a mesma configuração e os mesmos parâmetros. O software, que implementa o Método Ponto a Ponto para os cálculos, gerou a distribuição de fluxo apresentada na Figura 6.5 e os resultados vistos na Tabela 6.3.

Pelo Método das Radiosidades, o valor médio de fluxo resultou em 738 lux (1,47 na forma adimensional), superior ao calculado pelo WinElux, 611 lux (1,22 na forma adimensional); uma diferença, portanto, de 127 lux (0,25 na forma adimensional).

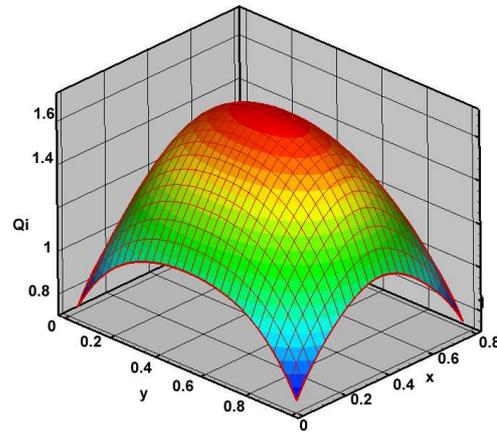


Figura 6.4 – Distribuição do fluxo incidente sobre o plano de projeto, pelo Método dos Lumens

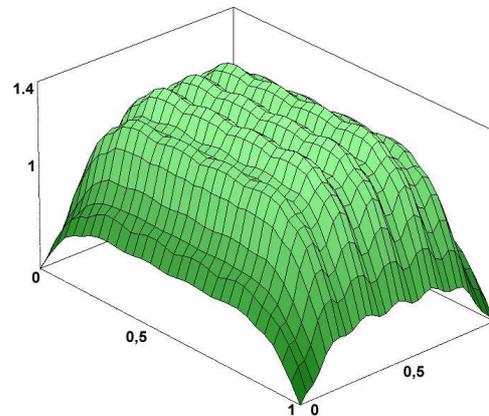


Figura 6.5 – Distribuição do fluxo luminoso pelo programa WinElux

Tabela 6.3 – Fluxos de iluminação no plano de trabalho calculados pelo programa WinElux

Fluxo Desejado (lx)	Fluxo Médio (lx)	Fluxo Máximo (lx)
500	611	742

A comparação entre os valores de fluxo máximo, 842 lux pelo Método das Radiosidades, e 742 lux pelo programa WinElux, resulta numa diferença de 100 lux (0,2 na forma adimensional).

O valor de fluxo médio obtido pelo Método das Radiosidades é superior àquele encontrado pelo Método Ponto a Ponto do WinElux, contudo, segundo EEE, 2008, existe um fator de manutenção que influencia diretamente os resultados do fluxo, gerando valores mais baixos no programa.

A diferença entre as metodologias, que neste trabalho são os métodos dos Lumens e o

das Radiosidades, e no WinElux é o Ponto a Ponto, não permite que os resultados sejam direta e efetivamente comparados, muito embora haja uma tendência similar na distribuição do fluxo ao longo da superfície de projeto. O mesmo se dá com os valores de iluminância, que também estão concentrados no centro da cavidade e têm sua intensidade diminuída à medida que se aproximam das paredes.

Da forma como foi apresentado, o Método dos Lumens dimensiona o projeto luminoso para toda uma região. Porém, quando se deseja dimensionar, para um mesmo ambiente, diferentes intensidades luminosas, não são encontradas metodologias ou referências disponíveis. Em razão disto, a proposta deste trabalho é empregar uma metodologia inversa para estabelecer fluxos luminosos das lâmpadas, bem como sua distribuição nas diferentes regiões, e assim promover um correto dimensionamento do projeto de iluminação.

6.3 Projeto Inverso de Iluminação

Consoante os objetivos deste trabalho, o foco da solução contempla situações de iluminação nas quais o plano de trabalho é composto por duas regiões distintas, aqui designadas por Região Principal (RP) e Região Secundária. Admite-se que a região principal tenha um fluxo duas vezes superior ao da secundária, e emprega-se o método GEO para dimensionar o sistema de iluminação. Para os casos estudados, a partir de um número fixo de fontes de iluminação, foram determinados o seu posicionamento e sua potência, informações necessárias para satisfazer ao problema de otimização.

Três casos foram tratados. No primeiro, denominado Caso A, a região de interesse (RP) foi estabelecida como sendo o centro do plano de trabalho, deixando toda a região que a circunda com outro nível de iluminação. No segundo, o Caso B, a região de interesse constituiu-se de duas tiras próximas às paredes com menor dimensão. O terceiro, o Caso C, é a situação mais complexa, pois a RP forma um anel de iluminação que delimita uma região secundária central com menor iluminação. A Figura 6.6 ilustra os três casos, destacando a região de interesse.

6.4 Função Objetivo

A função objetivo foi elaborada obedecendo-se à lógica de minimização das diferenças quadráticas entre os valores do fluxo $Q_{incidente}$, calculado pelo Método das Radiosidades, e o do

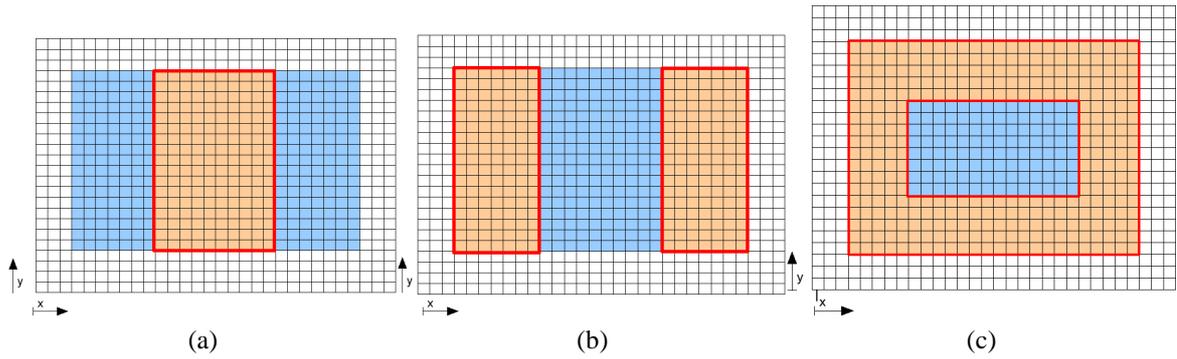


Figura 6.6 – Casos considerados para o problema: (a) Caso A; (b) Caso B; (c) Caso C. Em laranja com contorno vermelho, a região principal e em azul, a secundária

fluxo adimensional prescrito $Q_{prescrito}$, definido para o plano de trabalho. A equação resultante é:

$$F = \alpha \sqrt{\sum_{jd}^m \left(Q_{prescrito_RP}^{(l)} - Q_{incidente_RP}^{(l)} \right)^2} + (1 - \alpha) \sqrt{\sum_{jd}^m \left(Q_{prescrito_RS}^{(l)} - Q_{incidente_RS}^{(l)} \right)^2} \quad (6.3)$$

Os desvios quadráticos foram calculados para as duas regiões de interesse, RP e RS, e ponderados por um fator α , que estabelece o peso, ou importância, que cada região terá sobre a outra no processo de otimização.

Como a relação entre as regiões da superfície de projeto é duas vezes maior, tem-se que:

$$Q_{prescrito_RP}^{(l)} = 2 \quad (6.4)$$

e

$$Q_{prescrito_RS}^{(l)} = 1 \quad (6.5)$$

No desenvolvimento do projeto inverso de iluminação, é necessário conhecer a iluminação especificada para o plano de projeto, deixando que a metodologia de cálculo determine tanto o fluxo quanto o posicionamento de cada fonte luminosa de forma a melhor atender à condição de iluminação prescrita. O número de fontes será o mesmo anteriormente estabelecido na verificação dos resultados pelos métodos tradicionais, ou seja, 36 fontes luminosas para todo o ambiente considerado.

A região próxima às paredes exerce influência na distribuição de fluxo luminoso, causando uma baixa iluminação e, de certa forma, prejudicando a solução do sistema. Conforme

mostra a Figura 6.6, os elementos próximo até 1,5 m das paredes laterais foram desconsiderados, como forma de relaxar a solução inversa. Assim, o total de elementos de projeto que formam a cavidade será reduzido de 720 para 432.

Estabelecidas as condições, o método empregado neste trabalho otimiza as regiões principal e secundária a partir de um peso α . Este peso é previamente estabelecido, e tem a função de regular o nível de importância entre as regiões da superfície de projeto. Os dados da Tabela 6.1 continuam sendo usados na determinação do fluxo luminoso e da posição das lâmpadas, enquanto que os parâmetros para o algoritmo GEO são os da Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Dados empregados para a otimização com o método GEO

Parâmetro	Determinação
Número de variáveis (NX)	Dependente do número de lâmpadas e da condição das potências. No problema descrito serão consideradas 9 fontes e 1 potência.
Número de bits (NBITS)	9
τ (TAU)	Relação entre processo determinístico e probabilístico
Número de execuções (NIDOM)	Parâmetro que repete as chamadas à rotina de cálculo das radiosidades. Neste trabalho, o valor estabelecido é 10.
Número de iterações (NFOBMAX)	Número de iterações. Utilizado também como critério de parada.
Posição das Lâmpadas	$1 \leq x \leq 15$ $1 \leq y \leq 12$
Potência das Lâmpadas	$0 \leq P \leq 50$
Precisão (p)	0,1

O teto da cavidade comporta 36 fontes luminosas, mas a condição de simetria permitiu tratar apenas um quarto do problema, reduzindo este número a apenas 9. Dado que existe uma variável para cada posição x e uma para cada posição y , e que a potência será a mesma para todas as lâmpadas, o número de variáveis NX será 19.

O parâmetro NBITS é definido em função da variável que exigir o maior número de bits, que, neste caso, é a potência das lâmpadas. Para oferecer a precisão de 0,1, esta variável requer 9 bits, valor que foi estendido às demais variáveis.

O valor de NIDOM não é um critério absoluto para o funcionamento do método GEO, mas é determinante no momento em que, com um maior número de simulações, eleva a proba-

bilidade de serem alcançados valores satisfatórios para a solução do problema.

O valor de NFOB determina o número máximo de chamadas da rotina de cálculo das radiosidades.

As restrições impostas às posições das lâmpadas estão de acordo com as restrições físicas do sistema, respeitando a simetria imposta e a identificação de cada elemento no teto da cavidade.

As restrições feitas às potências das lâmpadas equivalem a um limite lógico, além do qual não são esperados resultados, e estão de acordo com os valores estabelecidos por Schneider e França, 2004. Optou-se por adotar estes valores para que fosse possível comparar as metodologias de solução, a que está sendo proposta e a do trabalho que subsidiou os valores de restrição, pois sabe-se que o intervalo de solução influencia o tempo computacional de resolução do problema.

A determinação do parâmetro τ será visto na Seção 6.5.

Em todos os casos, os parâmetros têm os seguintes valores: 19 variáveis; 10 execuções; 20.000, 50.000 e 200.000 iterações.

6.5 Determinação do Parâmetro τ

A metodologia GEO requer a determinação do parâmetro τ que melhor adapte o algoritmo ao caso considerado. Este parâmetro determina o balanço entre o determinístico e o probabilístico na solução do problema. O valor de τ foi determinado executando-se buscas nas condições estabelecidas para o projeto, no intervalo $\tau \in [0,25;2,50]$, para cada um dos casos que serão apresentados.

Os resultados da procura são mostrados nas Figuras 6.7, 6.8 e 6.9. Para os casos A, B e C, os valores de τ são, respectivamente, 1,05, 1,35 e 1,45.

6.6 Resultados dos Três Casos Simulados

Os resultados das simulações obtidos com o GEO, para os três casos ilustrados na Figura 6.6, são apresentados na Tabela 6.5. Os principais resultados são os valores da função



Figura 6.7 – Busca do valor de τ para o Caso A



Figura 6.8 – Busca do valor de τ para o Caso B



Figura 6.9 – Busca do valor de τ para o Caso C

objetivo, os desvios padrão, os desvios máximos e o tempo computacional, tanto na região de interesse como na região secundária, para diferentes números de iterações.

Em todas as simulações, os melhores valores obtidos para a função objetivo resultam de 200.000 iterações. Isto ocorre porque o algoritmo tem um campo de busca muito maior em rela-

Tabela 6.5 – Resultados para os casos propostos

Caso A (Centro) $\alpha = 1$			
Iterações (chamadas)	20.000	50.000	200.000
Função Objetivo	0,1762	0,1594	0,1434
Desvio Padrão RP	$2,2532 \times 10^{-2}$	$2,0600 \times 10^{-2}$	$1,7807 \times 10^{-2}$
Desvio Máximo RP	$5,7847 \times 10^{-2}$	$5,3038 \times 10^{-2}$	$5,4405 \times 10^{-2}$
Desvio Padrão RS	$133,0101 \times 10^{-2}$	$122,8317 \times 10^{-2}$	$85,5672 \times 10^{-2}$
Desvio Máximo RS	$134,0827 \times 10^{-2}$	$152,3628 \times 10^{-2}$	$104,2986 \times 10^{-2}$
Tempo Computacional	1,5h	2,06h	12,6h
Caso B (Parede) $\alpha = 1$			
Iterações (chamadas)	20.000	50.000	200.000
Função Objetivo	0,1721	0,1721	0,1168
Desvio Padrão RP	$2,4862 \times 10^{-2}$	$2,4862 \times 10^{-2}$	$1,2392 \times 10^{-2}$
Desvio Máximo RP	$5,5952 \times 10^{-2}$	$5,5952 \times 10^{-2}$	$4,3055 \times 10^{-2}$
Desvio Padrão RS	$70,9422 \times 10^{-2}$	$70,9422 \times 10^{-2}$	$93,9317 \times 10^{-2}$
Desvio Máximo RS	$98,3640 \times 10^{-2}$	$98,3640 \times 10^{-2}$	$108,5527 \times 10^{-2}$
Tempo Computacional	50 min	2,03h	9,5h
Caso C (Contorno) $\alpha = 1$			
Iterações (chamadas)	20.000	50.000	200.000
Função Objetivo	0,3848	0,3200	0,2657
Desvio Padrão RP	$3,4115 \times 10^{-2}$	$2,9967 \times 10^{-2}$	$2,2491 \times 10^{-2}$
Desvio Máximo RP	$11,9067 \times 10^{-2}$	$8,3521 \times 10^{-2}$	$8,2605 \times 10^{-2}$
Desvio Padrão RS	$79,8818 \times 10^{-2}$	$105,8805 \times 10^{-2}$	$101,6055 \times 10^{-2}$
Desvio Máximo RS	$92,7772 \times 10^{-2}$	$116,4785 \times 10^{-2}$	$112,7596 \times 10^{-2}$
Tempo Computacional	50 min	3,5h	8,2h

ção a 20.000 ou 50.000 iterações. Entretanto, como mostra a Tabela 6.5, o tempo computacional é mais elevado, se comparado aos outros números de iterações.

Devido à natureza da busca probabilística/aleatória do método, o aumento no número de iterações influencia a procura de uma melhor solução. Pelo mesmo motivo, o tempo computacional do algoritmo não evoluirá linearmente, razão pela qual não se pode estabelecer, *a priori*, o número de iterações necessárias para solucionar cada caso.

Com um número de iterações em torno de 20.000, foram obtidos valores razoáveis. Na verificação do Caso A, os valores dos desvios máximos estão muito próximos, o que garante também a proximidade dos desvios padrão. Como em todos os casos a região a ser otimizada é a principal, o Caso B, em que há proximidade da parede, se comportou de modo semelhante ao A. No Caso C, os resultados obtidos também foram satisfatórios.

Em face destas constatações, o número de iterações adotado para simular os demais casos foi 20.000, pois equilibra o tempo computacional e a qualidade dos resultados mediante a precisão adotada.

Quando se estabelece duas regiões distintas para o projeto de iluminação, mesmo que uma delas seja prioritária, elas exercerão, reciprocamente, alguma influência na distribuição do fluxo luminoso. O parâmetro α empregado na função objetivo (Equação 6.3) determina o grau de importância da influência mútua exercida entre as duas regiões no processo de otimização. Quando o parâmetro α assume o valor unitário, otimiza-se apenas a região principal e, à medida que se aproxima de zero, a região favorecida na otimização passa a ser a secundária. Em razão deste comportamento, a variação do parâmetro será $0,5 \leq \alpha \leq 1$, evitando que a região secundária receba maior prioridade na otimização.

6.6.1 Resultados para o Caso A

Para o Caso A, os resultados da variação $0,5 \leq \alpha \leq 1$ são apresentados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Resultados para o Caso A com diversos valores de α

α	F	REGIÃO PRINCIPAL		REGIÃO SECUNDÁRIA		$Q_{i,jd}$
		Desv. Padrão (%)	Desv. Máx. (%)	Desv. Padrão (%)	Desv. Máx. (%)	
0,5	1,3842	10,94	36,35	17,34	50,04	31,99
0,6	1,2740	7,94	29,62	18,91	55,73	38,29
0,7	1,1955	7,32	29,34	31,08	71,48	47,89
0,8	0,9372	4,77	18,19	31,77	78,45	39,09
0,9	0,6744	2,41	9,47	71,63	100,97	45,49
1	0,1668	1,61	8,13	94,42	121,31	45,29

As Figuras 6.10, 6.11, 6.12, 6.13, 6.14 e 6.15 ilustram a distribuição do fluxo luminoso nas regiões primária e secundária de acordo com a variação do parâmetro α .

Com $\alpha = 1$, otimizou-se apenas a região principal. Quando foi estabelecido um valor inferior a 1, o processo de otimização da região secundária alterou o desvio padrão da região principal de forma significativa, como pode ser visto na Tabela 6.6.

Quando $\alpha = 0,9$, as fontes luminosas foram dispostas sobre ambas as regiões. Conforme o valor deste parâmetro foi reduzido, é possível observar que as fontes se aproximaram da região principal. O fluxo estabelecido para região principal corresponde ao dobro do fluxo

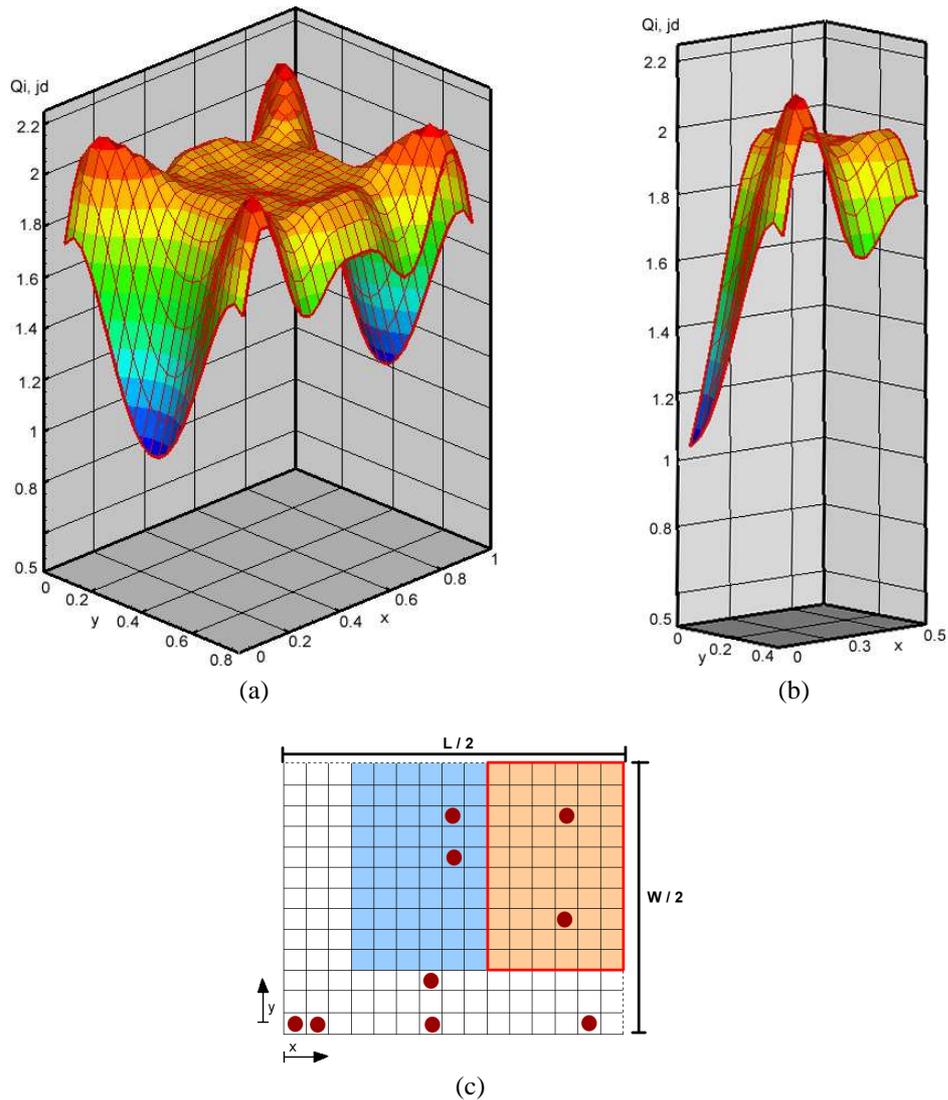


Figura 6.10 – Caso A. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 1$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

da secundária, de modo que as fontes se concentraram naquela para que ocorresse a otimização. O fluxo resultante, entretanto, foi suficiente para otimizar também a região secundária.

Quando $\alpha = 5$, não foram posicionadas fontes luminosas sobre a região secundária, e o desvio padrão atingiu o menor valor registrado nesta região.

Admitindo a influência mútua descrita, caberá ao projetista decidir sobre a importância atribuída a cada região.

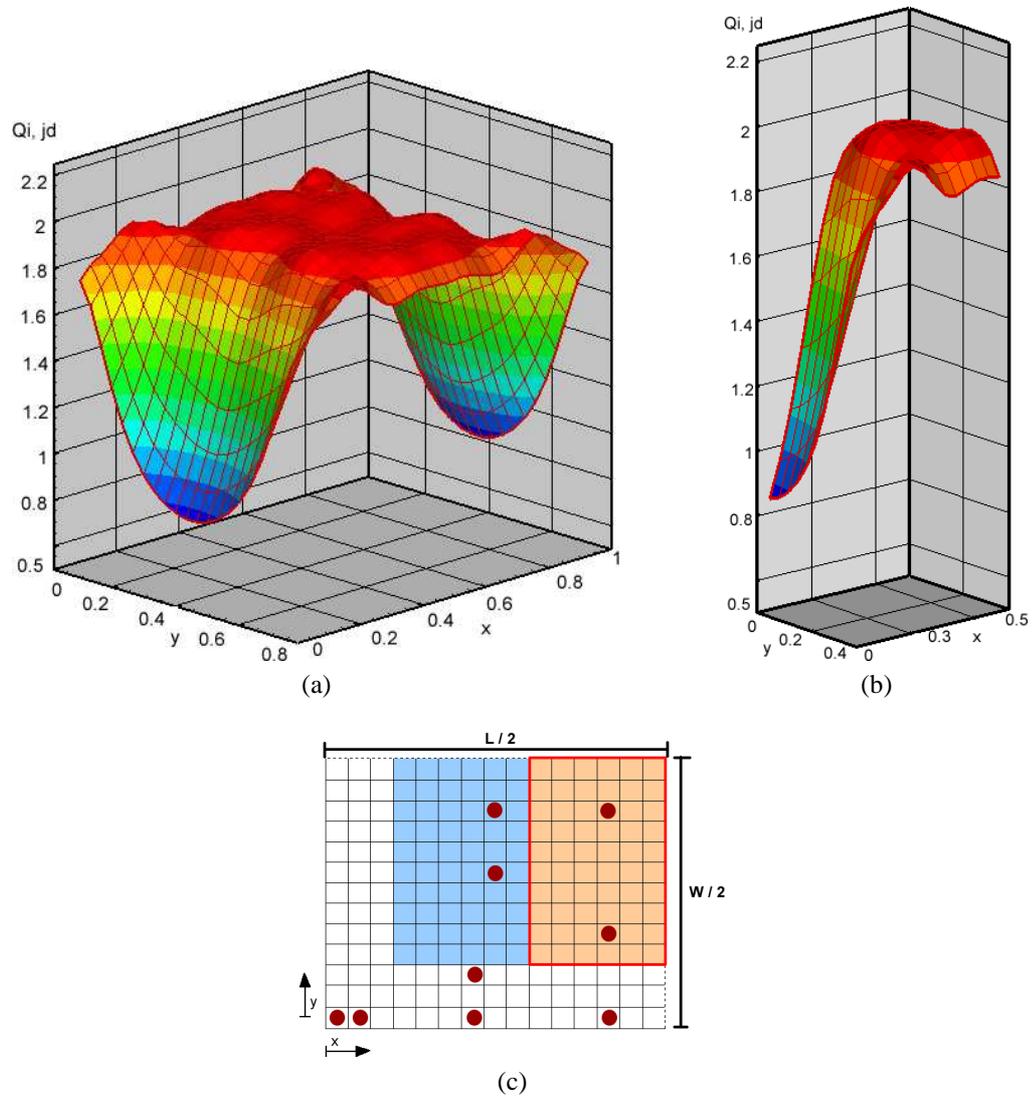


Figura 6.11 – Caso A. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,9$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

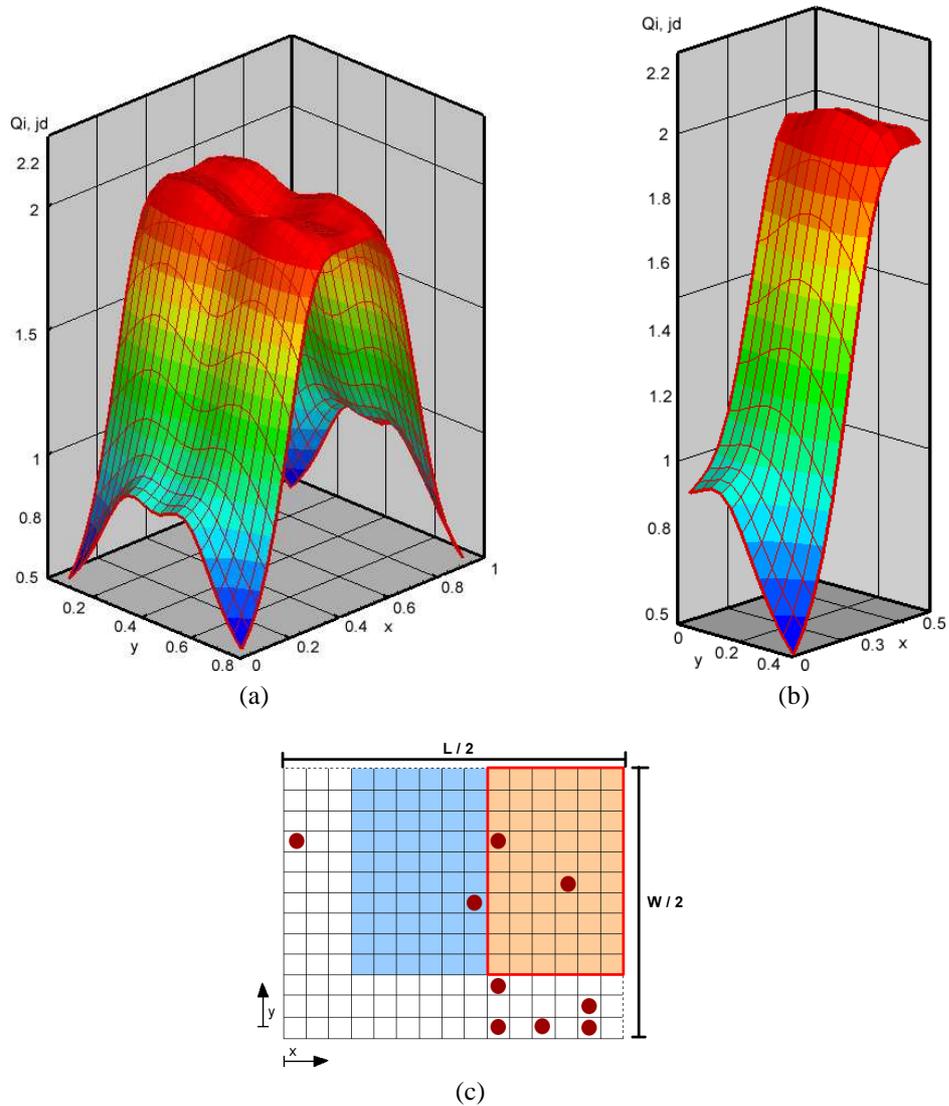


Figura 6.12 – Caso A. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,8$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

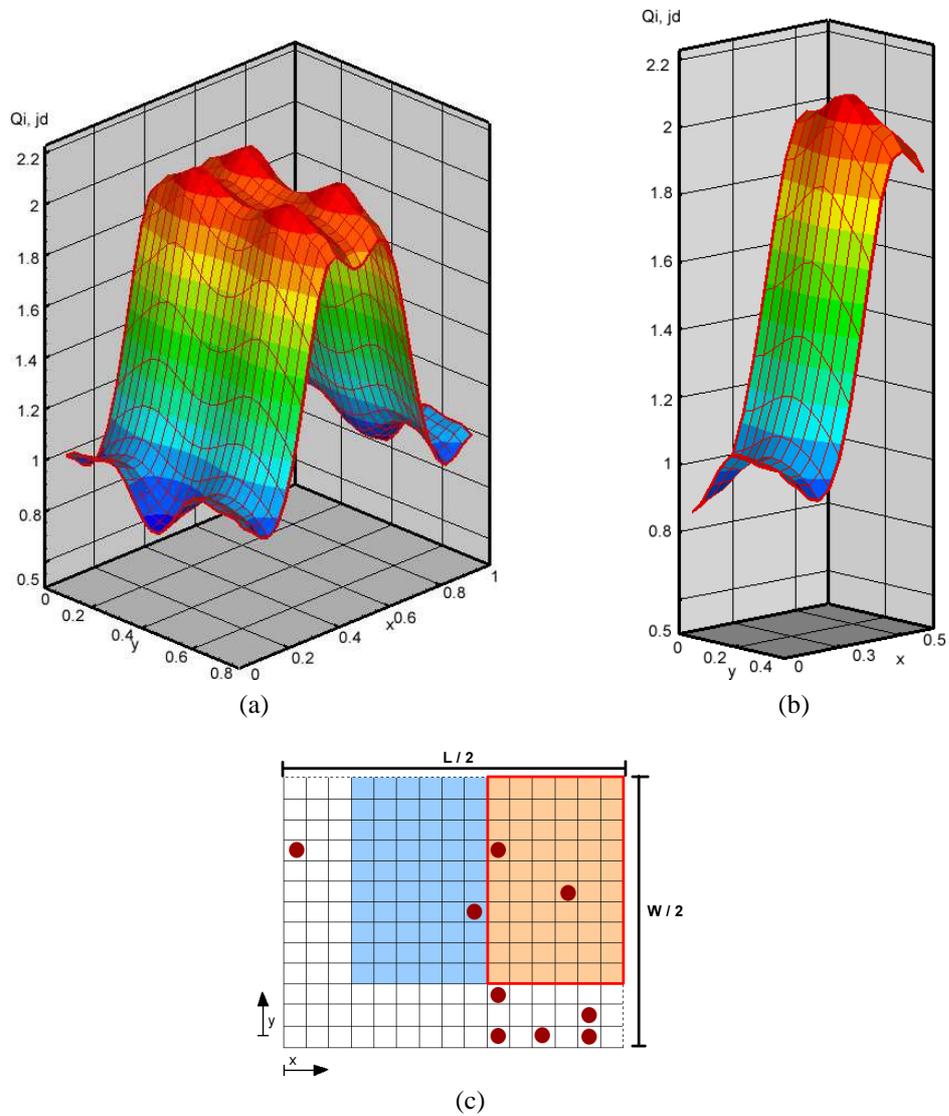


Figura 6.13 – Caso A. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,7$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

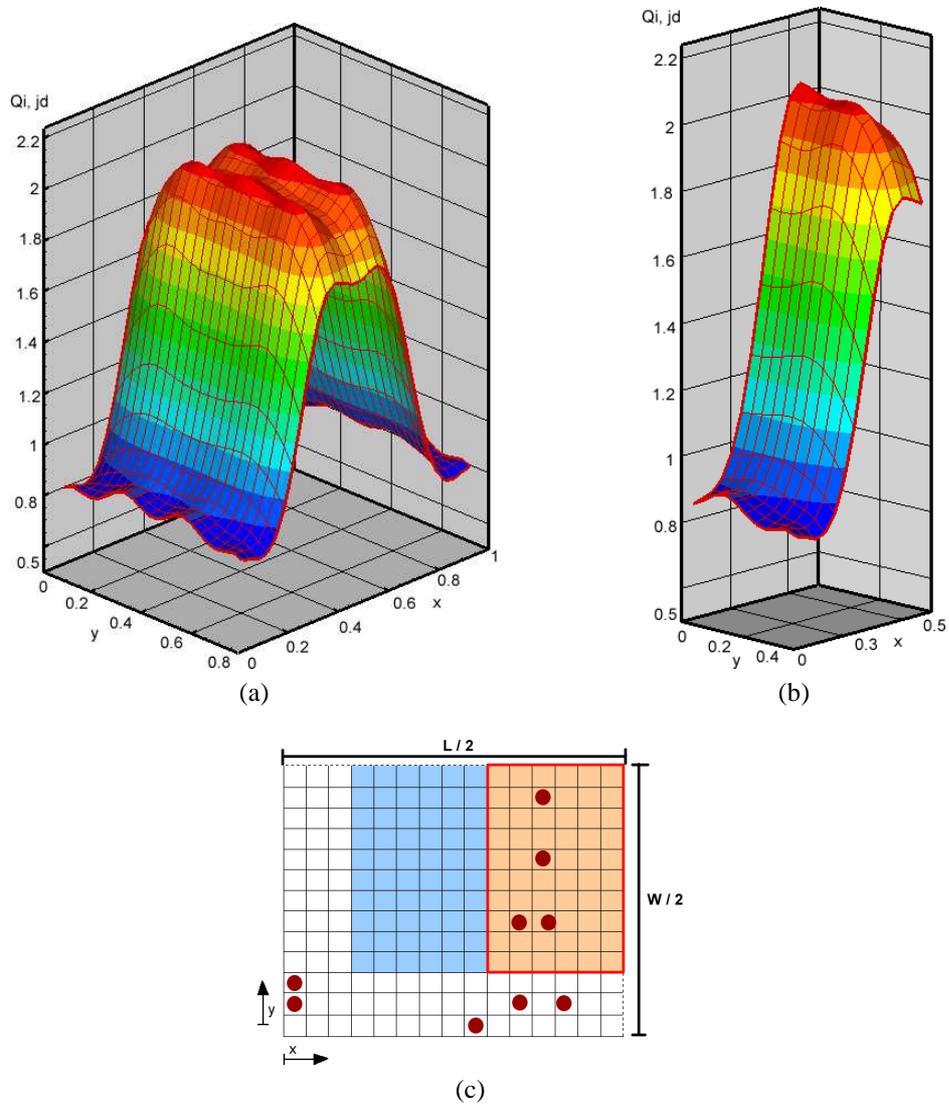


Figura 6.14 – Caso A. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,6$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

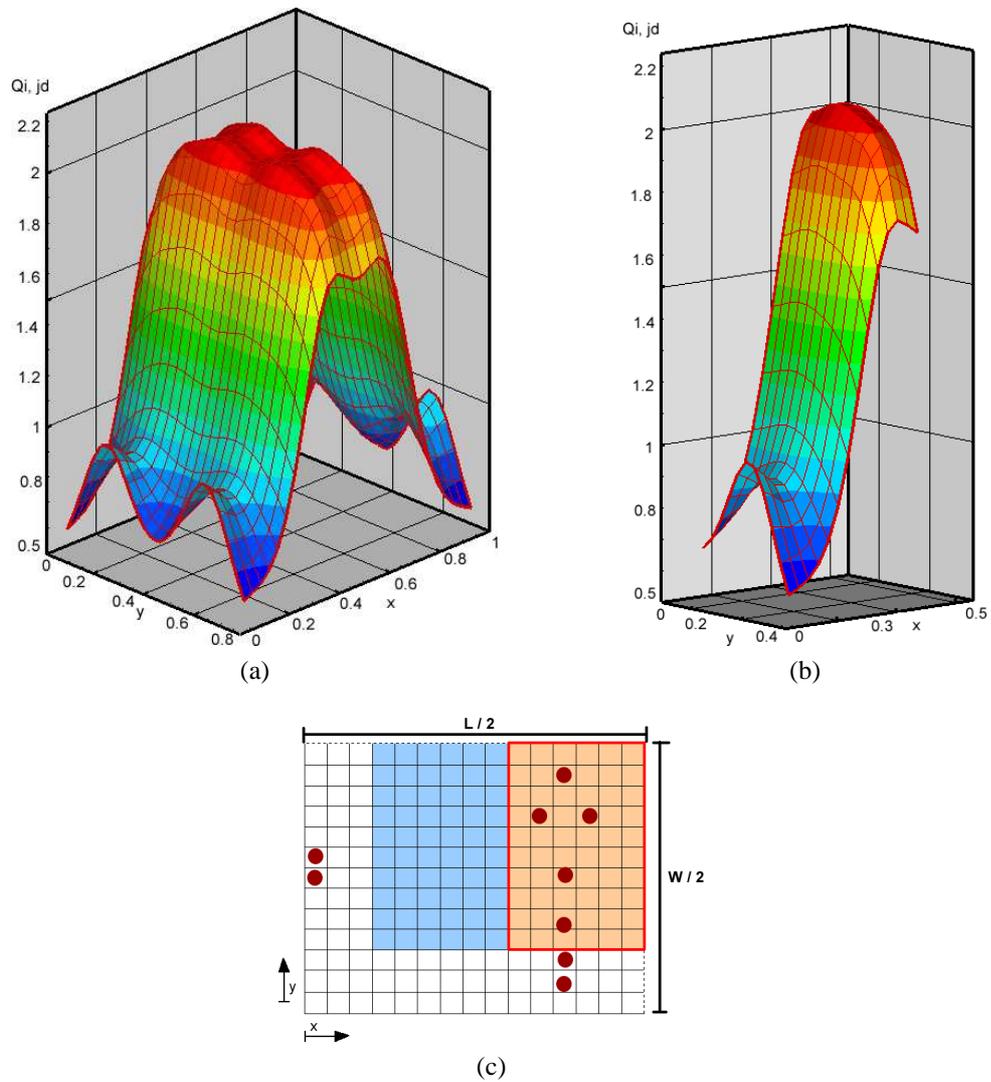


Figura 6.15 – Caso A. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,5$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

6.6.2 Resultados para o Caso B

Os resultados obtidos para o Caso B estão relacionados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Resultados para o Caso B com diversos valores de α

α	F	REGIÃO PRINCIPAL		REGIÃO SECUNDÁRIA		$Q_{i,jd}$
		Desv. Padrão (%)	Desv. Máx. (%)	Desv. Padrão (%)	Desv. Máx. (%)	
0,5	1,3904	9,03	32,28	20,36	51,49	45,29
0,6	1,2727	7,25	26,17	21,80	57,87	41,19
0,7	1,1212	5,56	17,19	25,11	67,89	45,79
0,8	0,8656	2,77	9,46	34,78	79,11	45,99
0,9	0,6214	2,26	7,47	53,59	95,64	45,19
1	0,1267	1,53	4,55	82,51	112,63	47,39

As Figuras 6.16, 6.17, 6.18, 6.19, 6.20 e 6.21 ilustram a distribuição do fluxo luminoso nas regiões primária e secundária conforme a variação do parâmetro α .

A distribuição das fontes luminosas na região próxima à parede diferiu do Caso A (região próxima ao centro) principalmente no que se refere ao seu comportamento.

Quando $\alpha = 0,9$, as fontes luminosas foram posicionadas, na sua maioria, na região principal. Este comportamento decorre da proximidade das paredes, nas quais parte do fluxo luminoso é refletido. Para satisfazer à condição prescrita, as fontes foram posicionadas distante do centro, pois, aparentemente, a refletividade bastou para atender à condição.

Os valores de fluxo adimensional também foram maiores, ao contrário do Caso A. A potência média adimensional para o Caso A foi 41,34, enquanto que no Caso B foi 45,14.

A partir de $\alpha = 0,7$, a região secundária exibiu valores de desvio maiores do que a região secundária no Caso A.

Os desvios padrão e máximo foram inferiores aos do Caso A, evidenciando a dificuldade em otimizar o centro da cavidade.

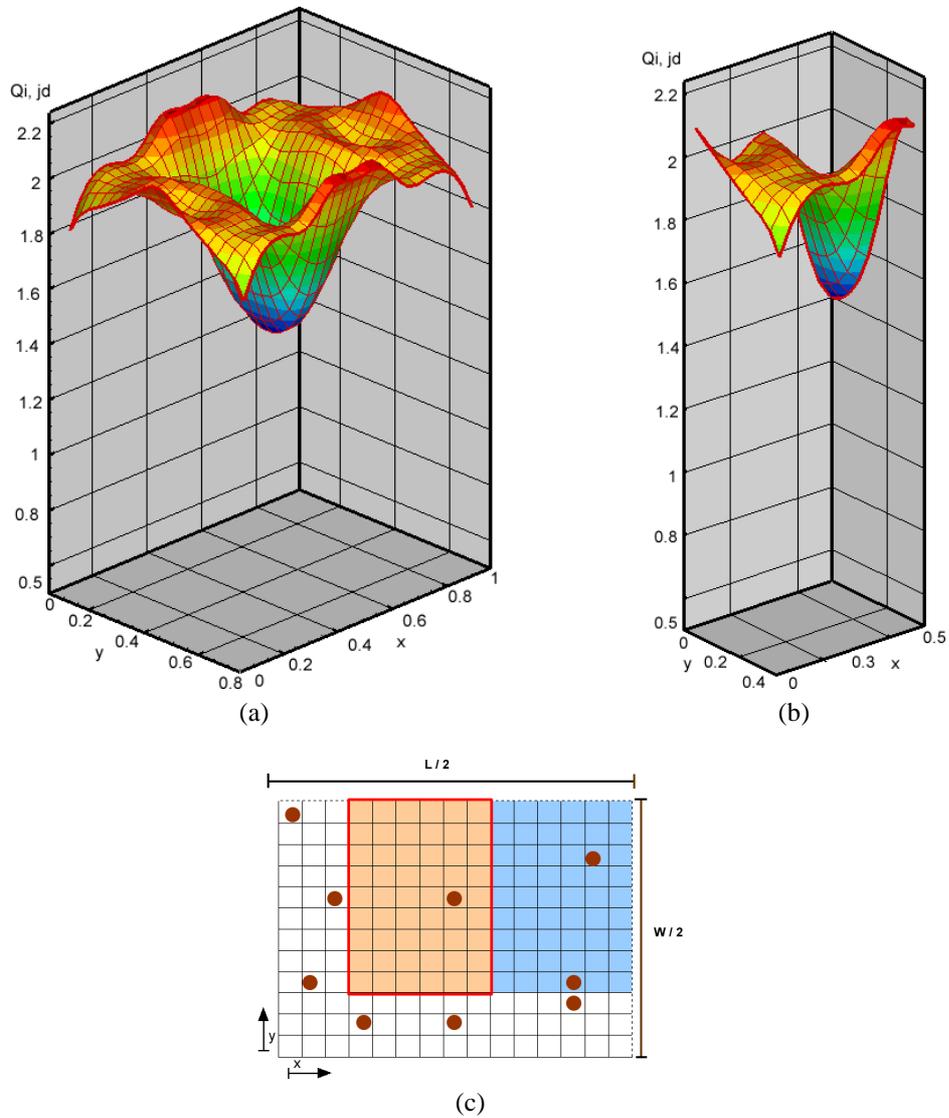


Figura 6.16 – Caso B. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 1$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

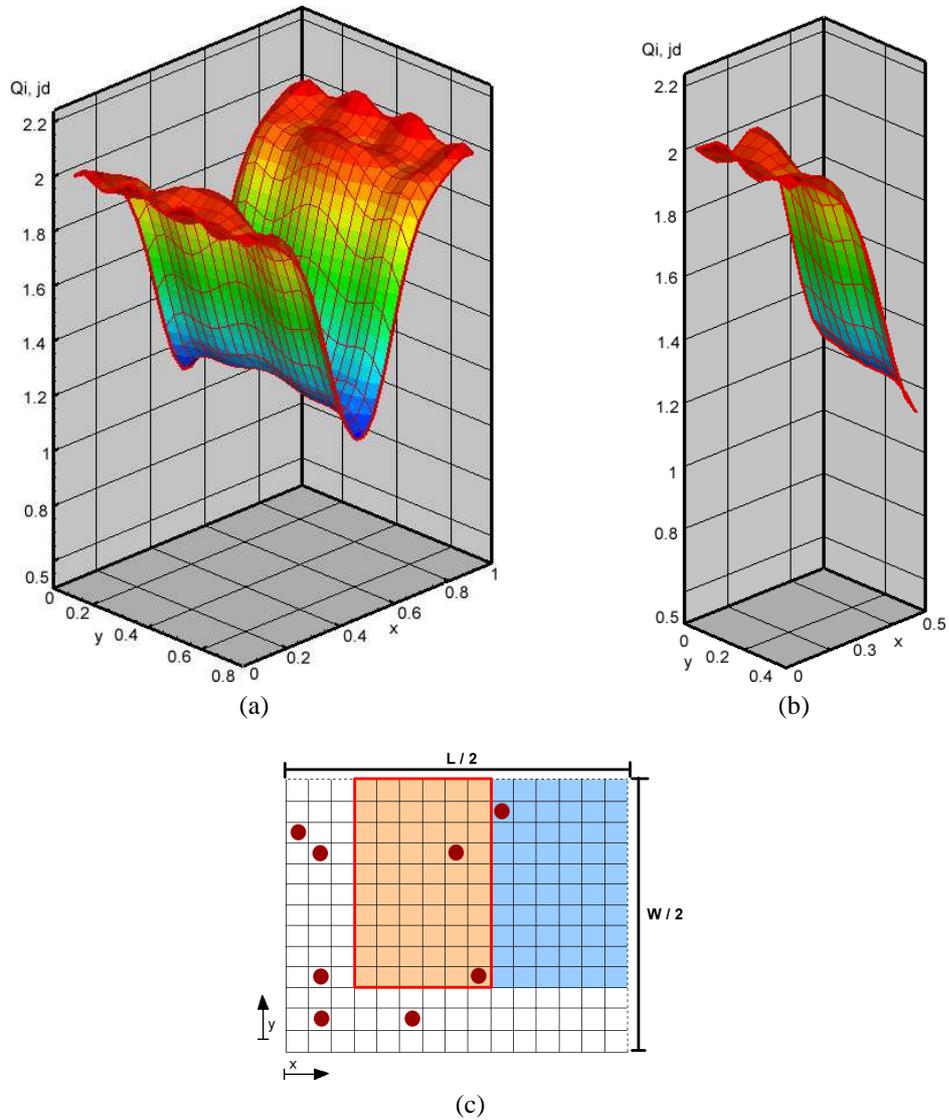


Figura 6.17 – Caso B. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,9$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

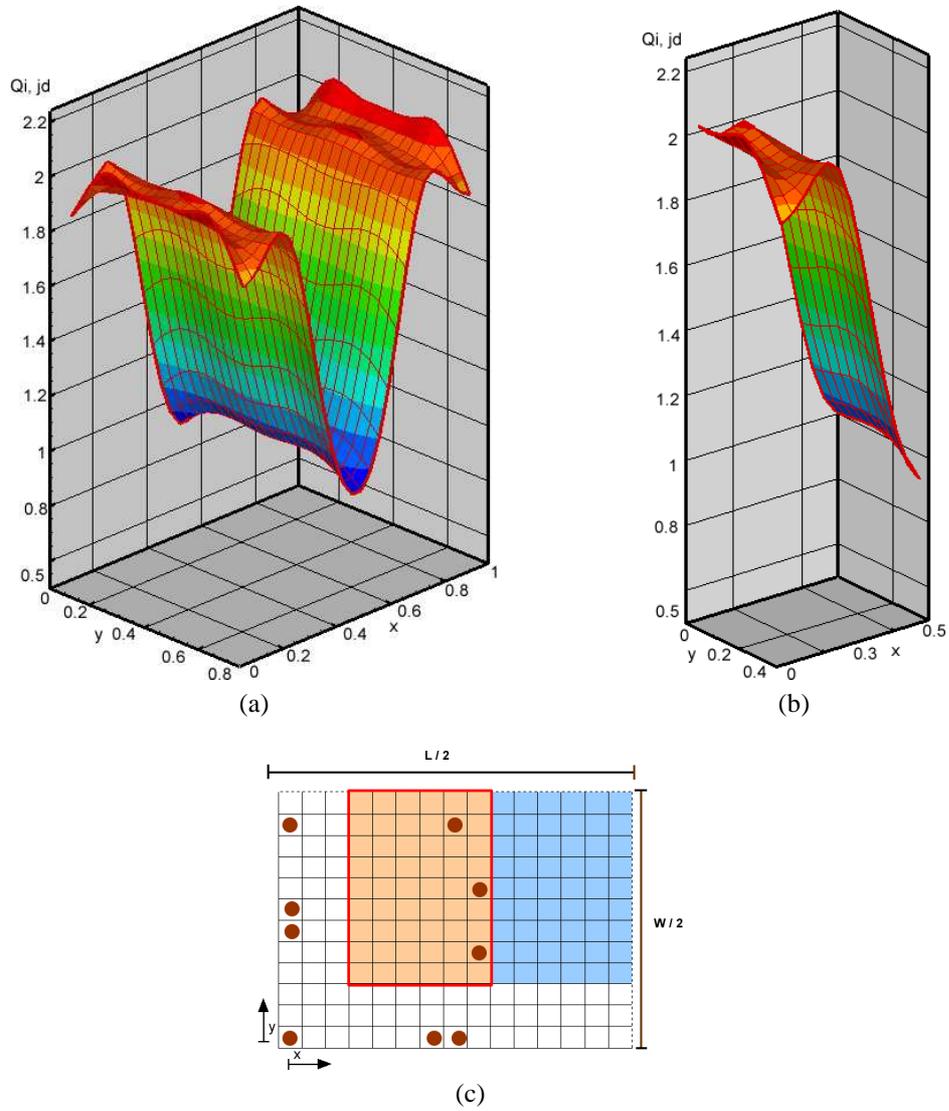


Figura 6.18 – Caso B. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,8$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

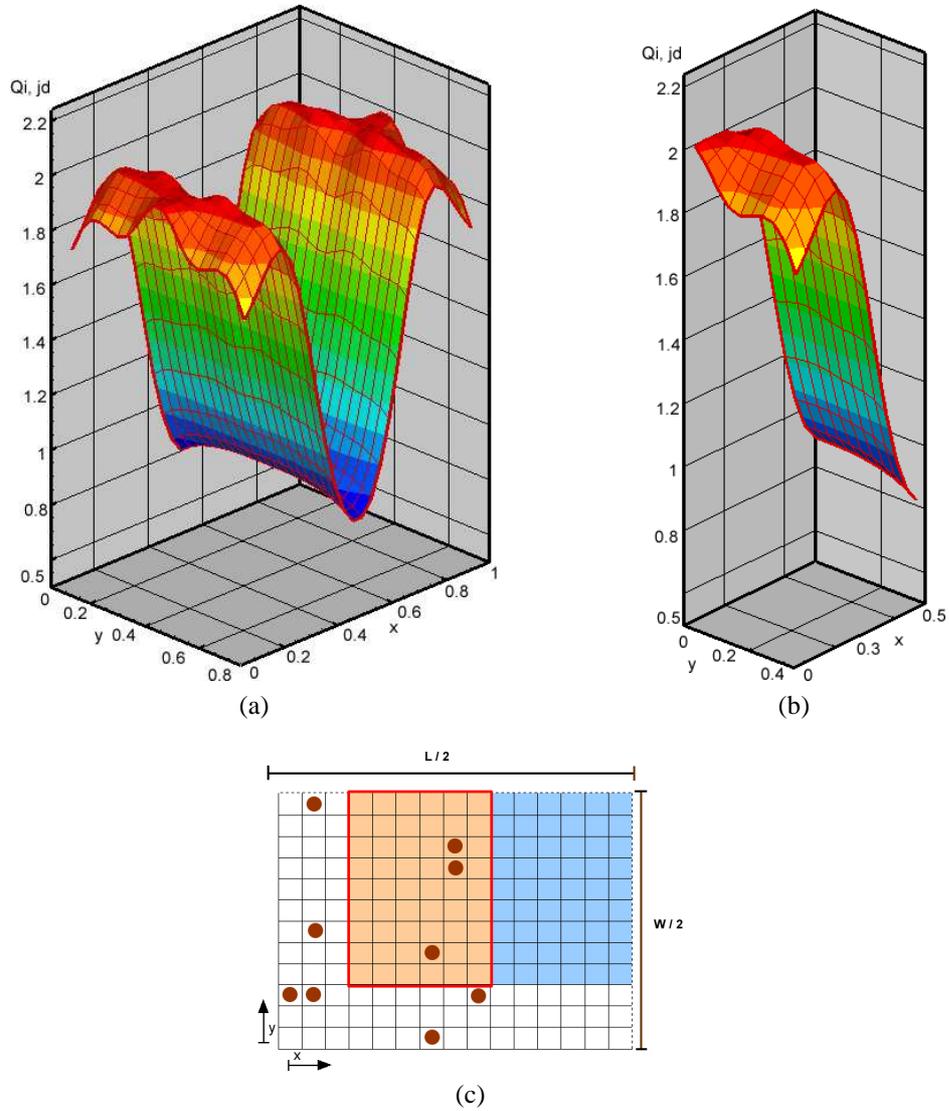


Figura 6.19 – Caso B. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,7$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

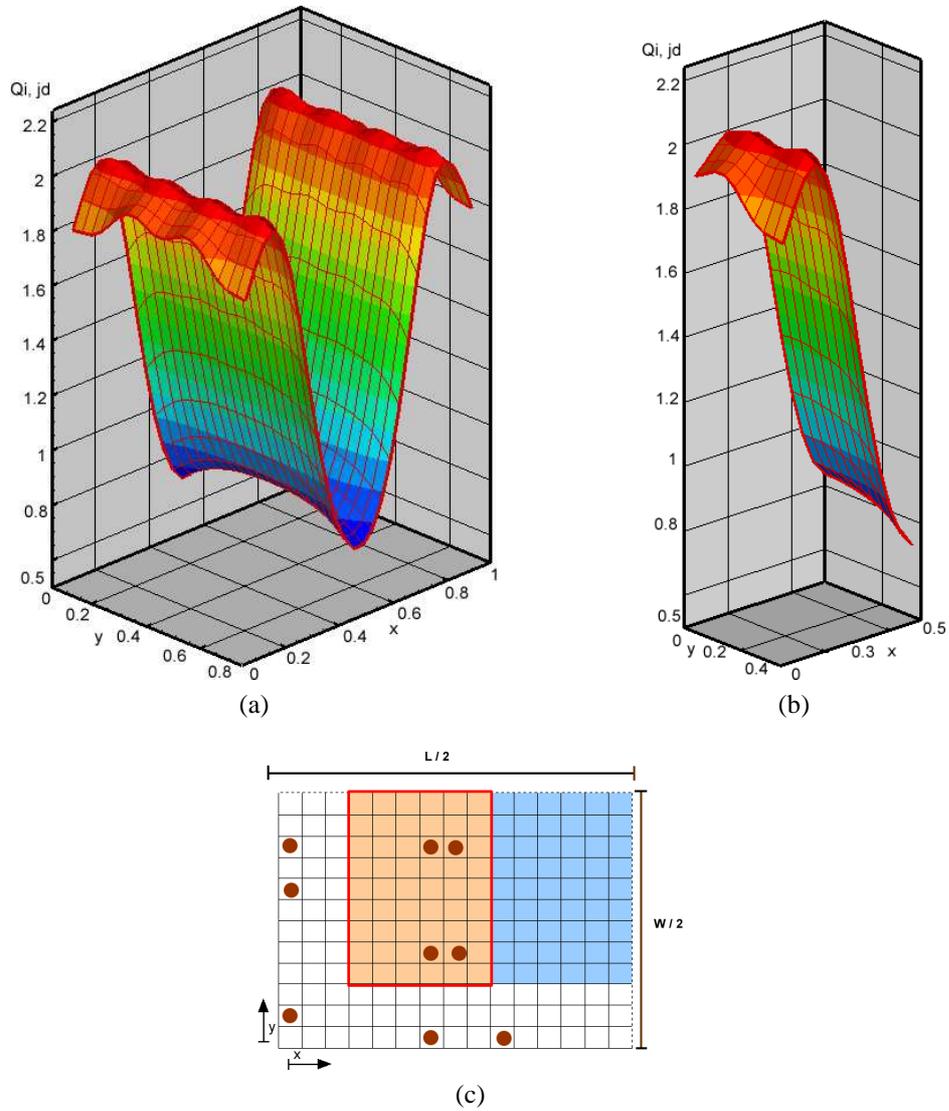


Figura 6.20 – Caso B. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,6$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

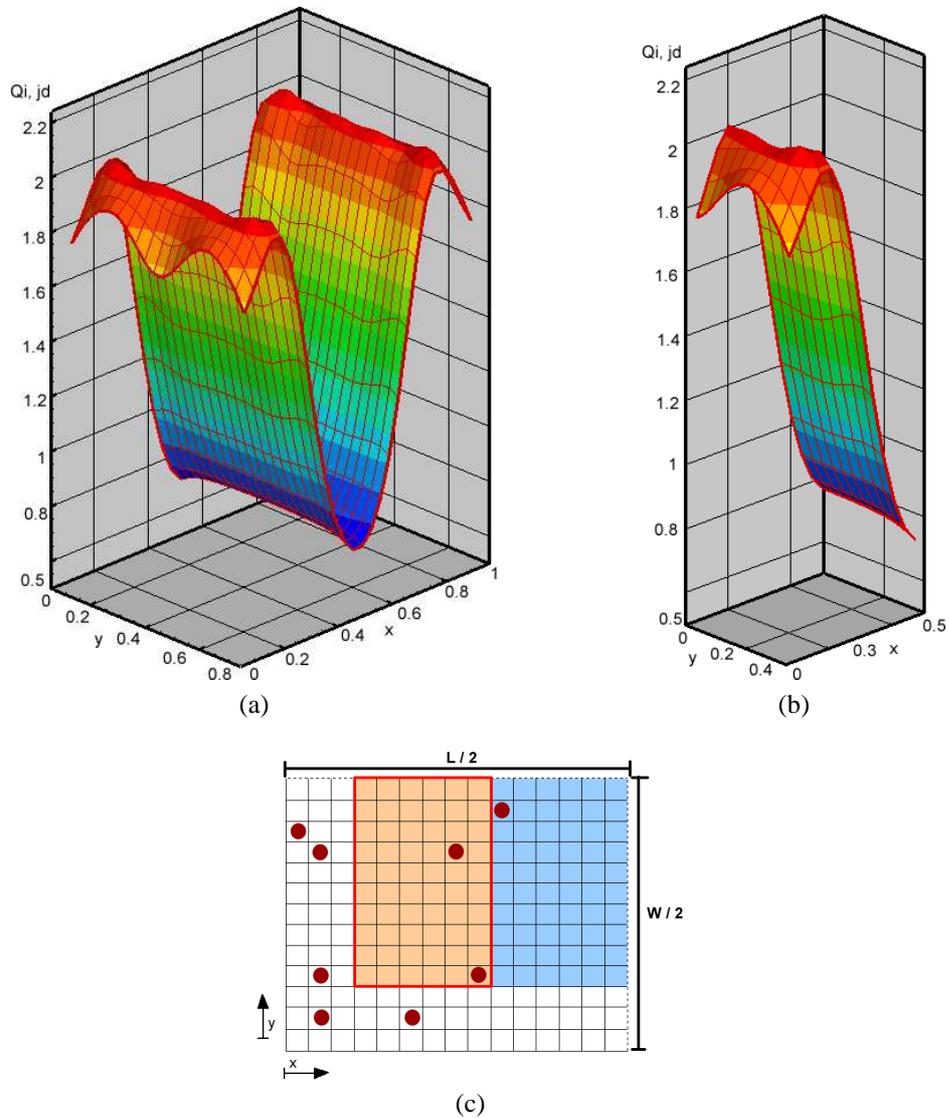


Figura 6.21 – Caso B. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,5$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

6.6.3 Resultados para o Caso C

O Caso C exibe a maior complexidade na distribuição do fluxo luminoso, pois, por meio dele, procura-se mostrar a possibilidade de otimizar um contorno na superfície de projeto.

Este caso também mostra a capacidade da metodologia de prescrever um fluxo para regiões cujas configurações sejam complexas.

Os resultados para o Caso C estão relacionados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Resultados para o Caso C com diversos valores de α

α	F	REGIÃO PRINCIPAL		REGIÃO SECUNDÁRIA		$Q_{i,jd}$
		Desv. Padrão (%)	Desv. Máx. (%)	Desv. Padrão (%)	Desv. Máx. (%)	
0,5	1,5871	10,29	48,73	33,70	71,62	41,49
0,6	1,4874	5,66	27,53	53,65	84,74	43,49
0,7	1,2900	4,28	19,10	61,43	93,29	43,89
0,8	1,0395	4,04	16,72	64,55	91,92	47,19
0,9	0,7285	3,07	10,47	87,17	102,82	46,39
1	0,2089	1,77	7,09	103,61	115,76	47,79

As Figuras 6.22, 6.23, 6.24, 6.25, 6.26 e 6.27 ilustram a distribuição do fluxo luminoso nas regiões primária e secundária de acordo com a variação do parâmetro α .

Comparado aos outros casos, o desvio padrão do Caso C correspondeu ao maior valor encontrado para os resultados de otimização na região principal, para $\alpha = 1$. Isto não significa, porém, que se trata de um resultado ruim. Quando é estabelecido o mesmo peso para ambas as regiões, o valor do desvio também é maior na região secundária, em comparação com os outros casos.

Por sofrer influência direta da região principal, a secundária se torna uma região de difícil otimização. Os gráficos mostram que somente quando $\alpha = 0,5$ a distribuição se aproxima do valor prescrito para esta região. Entretanto, não obstante o desvio padrão elevado, a metodologia consegue otimizar a região.

Em todos os três casos, à medida que α se aproximava de 0,5, a fontes foram concentradas na região principal. Isto mostra que o processo de otimização ocorreu em ambas as regiões, não obstante a atribuição de pesos às regiões e o fato da região principal ter um valor de fluxo superior.

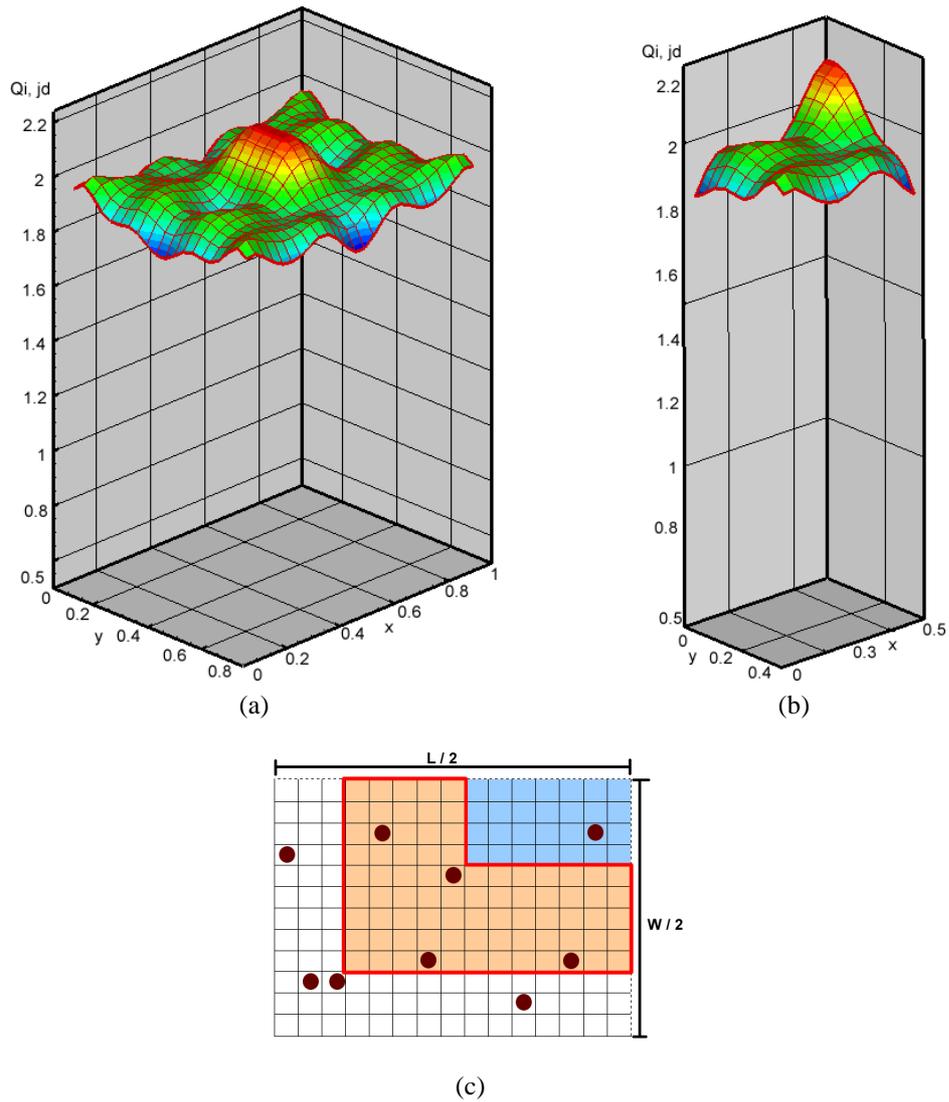


Figura 6.22 – Caso C. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 1$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

Estes resultados mostram que a metodologia estabelecida é capaz de otimizar as regiões, com diferentes pesos, e distribuir o fluxo de forma quantificada, como propõe o método.

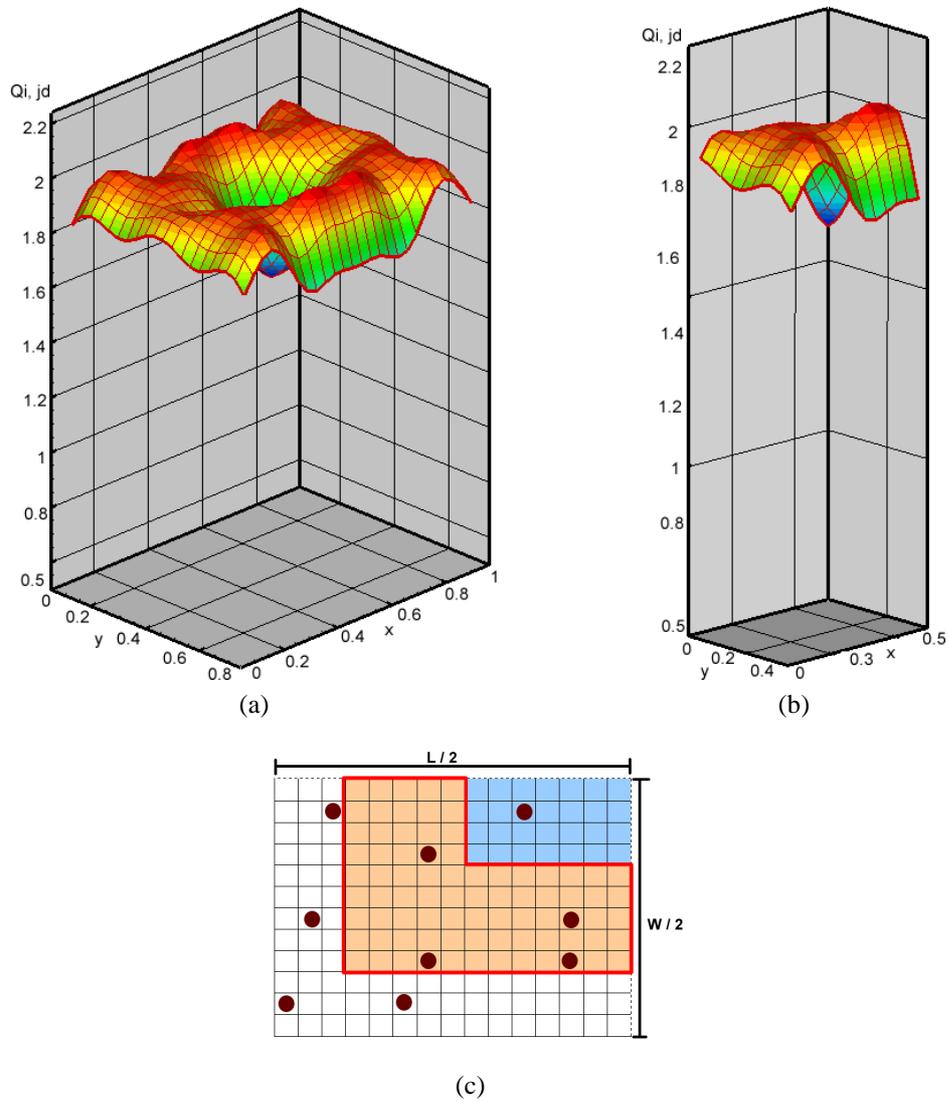


Figura 6.23 – Caso C. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,9$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

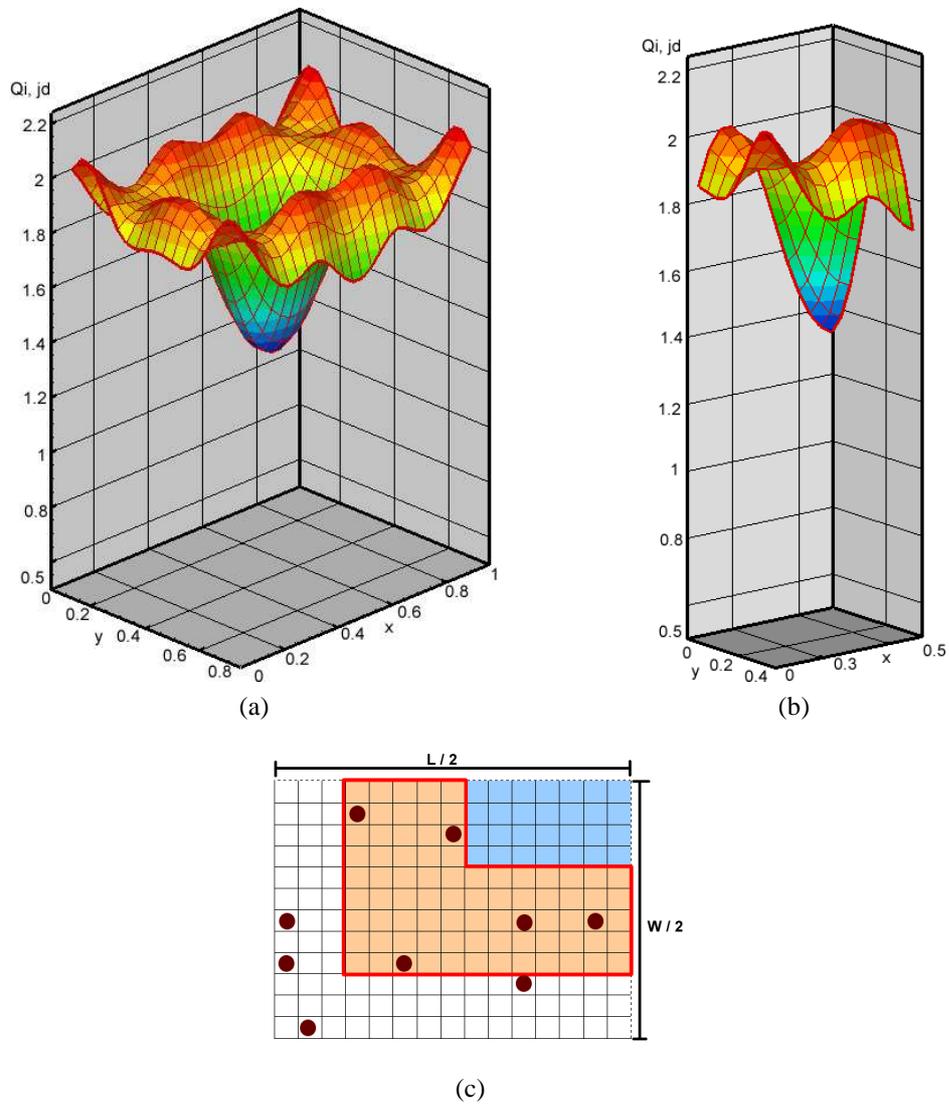


Figura 6.24 – Caso C. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,8$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

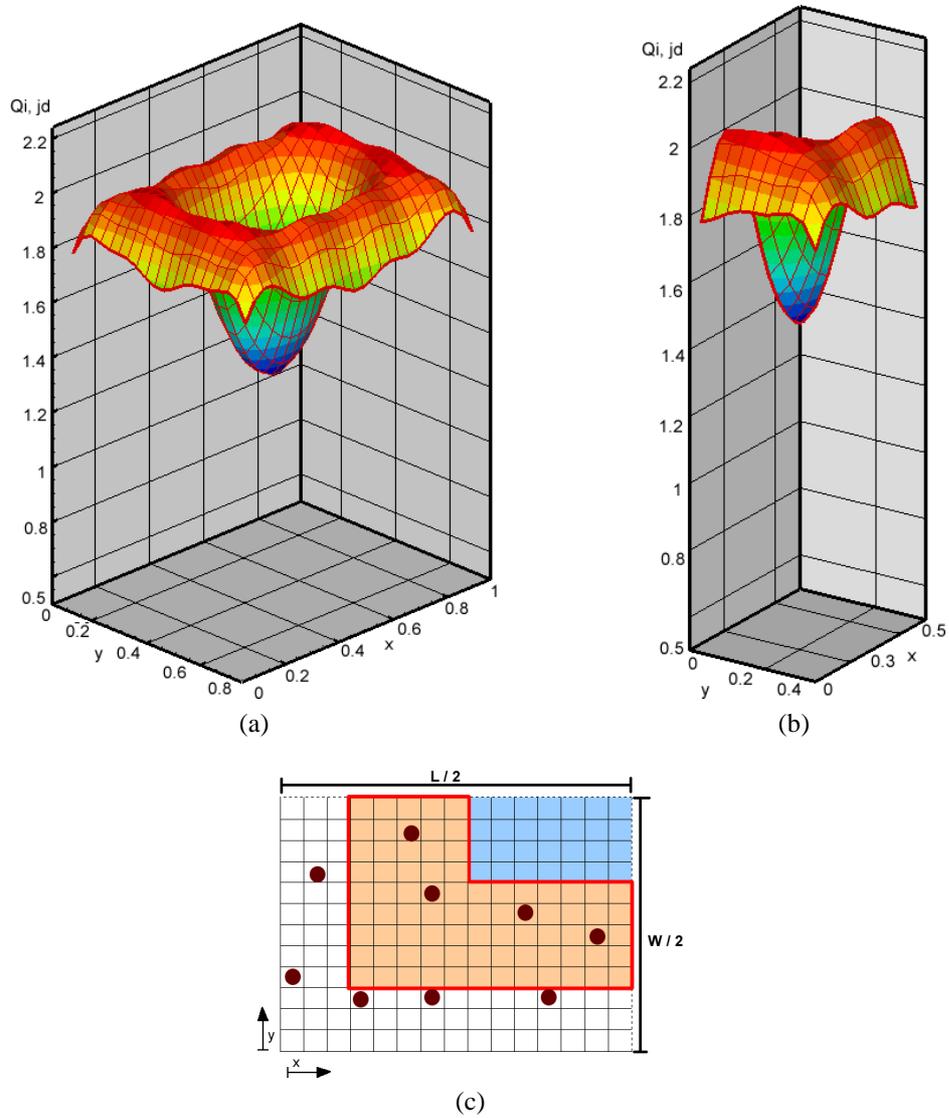


Figura 6.25 – Caso C. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,7$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

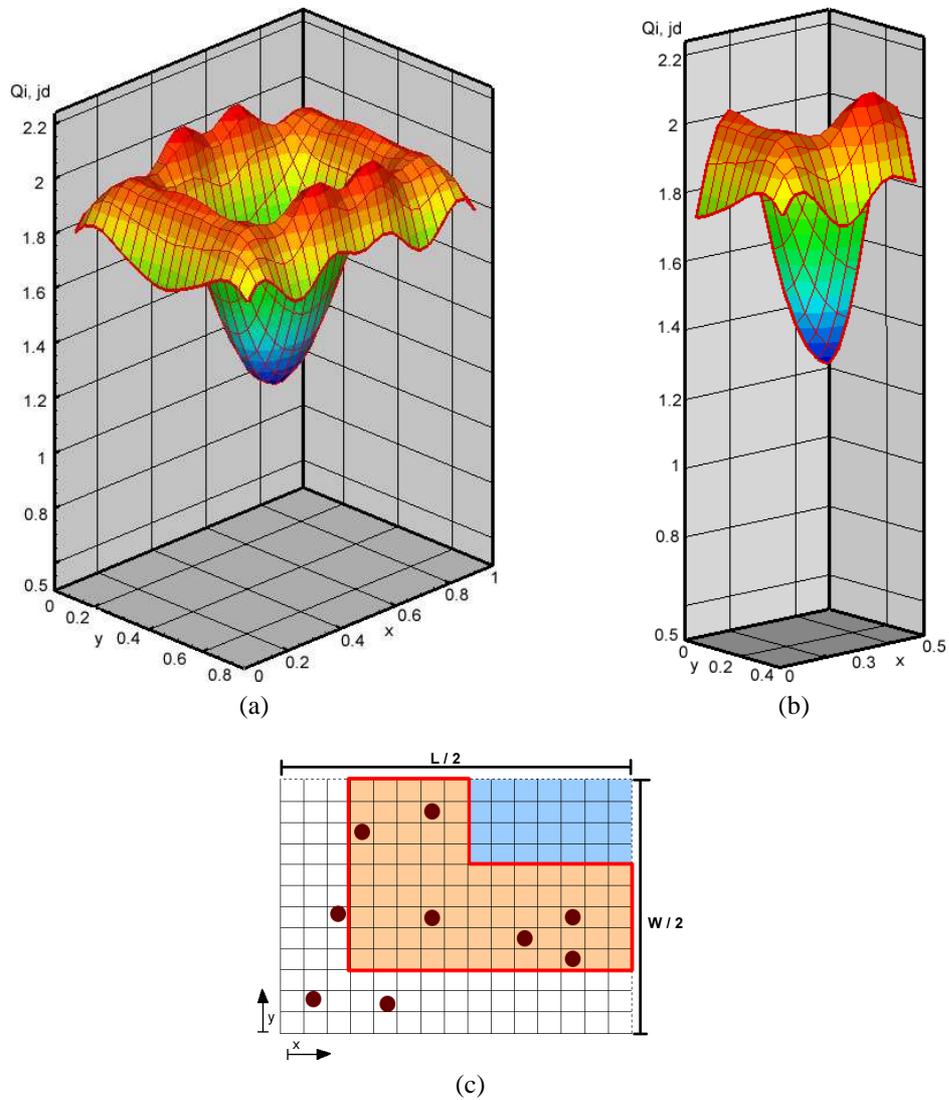


Figura 6.26 – Caso C. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,6$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

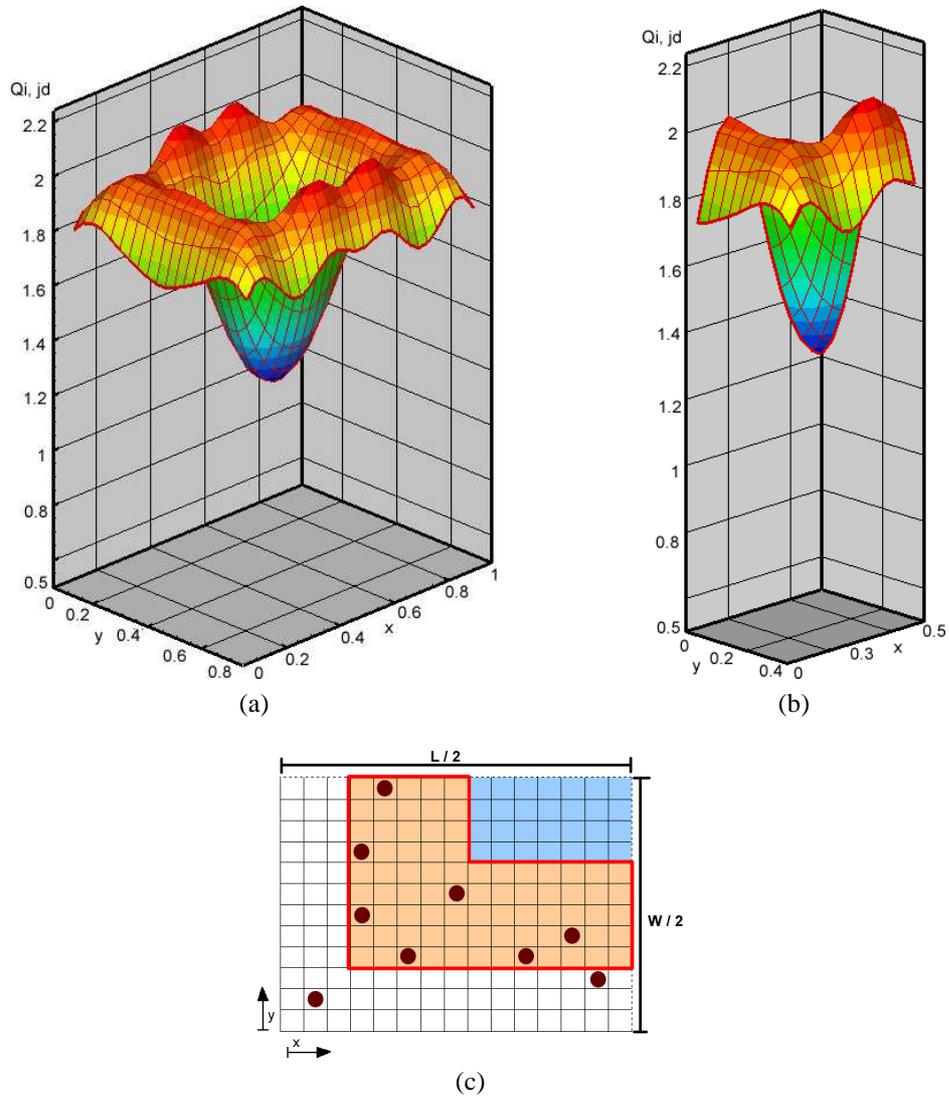


Figura 6.27 – Caso C. Resultado do posicionamento de 9 fontes com $\alpha = 0,5$. (a) Iluminância em toda a superfície de projeto. (b) Iluminância em um quarto da superfície de projeto. (c) Distribuição das lâmpadas em um quarto do teto.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho considerou um problema de iluminação no qual distintas regiões da superfície de trabalho deveriam ser iluminadas por diferentes fluxos luminosos. Para resolvê-lo, foi proposto um método que permitisse especificar diferentes valores de fluxo radiante em duas diferentes regiões do plano de projeto. No desenvolvimento da solução, foram empregados os conceitos de radiação térmica aplicados a uma cavidade radiante. Estes conceitos foram adaptados ao caso da iluminação, isto é, considerou-se a radiação na faixa de luz visível.

A solução foi obtida pelo método inverso, pois os métodos convencionais utilizados para calcular a iluminação de ambientes não são capazes de prescrever fluxos distintos em diferentes regiões. Este método tem como vantagem adicional permitir que o projetista estabeleça o número de fontes desejadas.

Para regularizar o sistema de equações mal condicionado, foi utilizado o algoritmo de Otimização Extrema Generalizada (GEO). O algoritmo produziu resultados satisfatórios, a estabilidade na utilização de variáveis discretas foi mantida e nenhum tipo de correção precisou ser aplicado às variáveis binárias.

A prova de conceito foi desenvolvida considerando-se uma cavidade com unidades de extensão adimensionais, de $1 \times 0,8 \times 0,2$. Foram simuladas configurações com 36 lâmpadas e, em todas elas, foram aplicadas relações em que as posições das lâmpadas eram variáveis. O valor da potência, apesar de também ser variável, foi compartilhado por todas as lâmpadas.

Neste trabalho, o método foi aplicado a uma cavidade cinza, porém, nada o impede de ser utilizado num projeto de iluminação de superfícies reais, haja vista que o método é adimensional.

A partir dos resultados encontrados, percebeu-se que é possível estabelecer um posicionamento das fontes luminosas de forma tal a prescrever um fluxo luminoso em diferentes regiões. Os casos apresentados mostram que os desvios padrão nas regiões principais têm valores próximos, o que também acontece nas regiões secundárias. O grau de importância de otimização atribuído às regiões pela variação do parâmetro α , peso atribuído às regiões primária e secundária, mostrou que a variação dos valores obtidos para os desvios, nos três casos, manteve o mesmo comportamento. Assim, à medida que α se aproximava de 0,5, o processo de otimização na região secundária era favorecido em detrimento da região principal. No caso C

foram registrados os maiores desvios padrão, por ser uma região de otimização complexa, mas, ainda assim, a metodologia encontrou resultados satisfatórios para as duas regiões. Cabe observar, contudo, que todos os resultados consideram o afastamento das paredes, pois a refletividade delas influencia a região.

O aumento do número de fontes luminosas não reduz a eficácia do método, apenas faz com que aumente o número de iterações na busca pelo ótimo global. Por isto, ao ser estabelecido o número de fontes, deve-se verificar se as lâmpadas podem fornecer uma boa quantidade de luminosidade, caso a escolha seja feita apenas pela atribuição de uma quantidade de lâmpadas. Adicionalmente, deve-se considerar o quanto as paredes refletirão.

Em projetos de iluminação nos quais determinadas regiões do plano de projeto devam receber mais luminosidade que outras, a metodologia desenvolvida pode ser utilizada inclusive de forma a economizar energia. Da mesma forma, o peso dado a cada região permite que cada uma possa ser otimizada conforme o interesse do projetista.

Dentre as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do trabalho, destaca-se a pouca literatura a respeito do estabelecimento de fluxo em regiões. Muitos trabalhos, principalmente na área de ergonomia, utilizam softwares que simulam a boa iluminação de um ambiente, mas pouco foi encontrado que permitisse estabelecer fluxos prescritos em duas ou mais regiões do plano de projeto.

Não obstante terem sido alcançados os objetivos propostos, é importante ressaltar que, para regiões com geometrias mais complexas, faz-se necessário realizar simulações adicionais que permitam refinar e melhorar os resultados. Para os propósitos deste trabalho, foi prescrito para a região principal um fluxo apenas duas vezes superior ao da região secundária. Portanto, é necessário verificar se o método é capaz de otimizar as regiões, sem dificuldade, quando a região principal for prescrita com, por exemplo, 3 ou 4 vezes o valor de fluxo da secundária.

7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Este trabalho desenvolveu uma nova possibilidade de dimensionamento e abriu diversas perspectivas de trabalhos futuros. As principais sugestões são:

1. aplicar a técnica a superfícies não-cinzas;
2. aplicar a técnica considerando a existência de iluminação externa;

3. aplicar a técnica viabilizando a economia de energia, com fontes luminosas fluorescentes;
4. utilizar outros métodos de regularização para resolver o sistema de equações, e comparar os resultados obtidos;
5. validar experimentalmente os resultados obtidos pelas simulações, e
6. estender a metodologia de resolução a outras aplicações relacionadas com radiação térmica, como, por exemplo, fornos de tratamento térmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IESNA. **The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application**. 9. ed. Nova Iorque: IESNA, 2000.

Jordan, R. A.; Tavares, M. H. F. Análise de diferentes sistemas de iluminação para aviários de produção de ovos férteis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 420–423. Campina Grande, 2005.

Cavichioli, J. C. et al. **Florescimento e Frutificação do Maracujeiro-Amarelo Submetido à Iluminação Artificial, Irrigação e Sombreamento**. Jaboticabal: Revista Brasileira de Fruticultura, 2006.

Paterniani, J. E. S.; Silva, M. J. M. Desinfecção de efluentes com tratamento terciário utilizando energia solar (SODIS): avaliação do uso do dispositivo para concentração dos raios solares. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 9–13. jan/mar 2005. Nota técnica.

CDEF. **Clínica Dermatológica Prof. Emmanuel França**. Disponível em: <<http://www.emmanuelfranca.com.br/>>. Acessado em julho de 2008. Brasil, 2008.

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

Teixeira, B. O. S.; Jota, F. G.; Teixeira, M. H. Modelagem, controle e otimização do processo dos fornos de reaquecimento de placas. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v. 18, n. 1, p. 67–93. 2007.

Leonardi, R. **Produção de Mapas de Anisotropia da Radiação Cósmica de Fundo em Microondas utilizando um Algoritmo Genético**. São José dos Campos, 2002.

Hoffmann, L. T.; Silva, J. D. S.; Gómez, A. T. Algoritmos para o problema de localização de torres de radiotransmissão. In: **III Workshop dos Cursos de Computação aplicada do INPE, Anais do III Workcpa**. São José dos Campos: [s.n.], p. 1–7. 2003.

Chunfeng, S.; Xueyin, L.; Yuanchun, S. Moving object tracking under varying illumination conditions. **Pattern Recognition Letters**, v. 27, p. 1632–1643. 2006.

- Ferentinos, K.; Albright, L. Optimal design of plant lighting system by genetic algorithms. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 18, p. 473–484. 2005.
- Gevrekci, M.; Gunturk, B. K. Illumination robust interest point detection. **Computer Vision and Image Understanding**, v. 113, p. 565–571. 2009.
- Kazanasmaz, T.; Murat Gu, N.; Binol, S. Artificial neural networks to predict daylight illuminance in office buildings. **Building and Environment**, v. 44, p. 1751–1757. 2009.
- Tavares, S. G. **Simulação Computacional para Projeto de Iluminação em Arquitetura**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- Marinoski, D. L.; Westphal, F. S.; Lamberts, R. Desenvolvimento de um algoritmo de cálculo luminotécnico para ambientes internos através do método ponto-a-ponto. In: **VI Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído**. [S.l.: s.n.]. São Paulo, 2001.
- Phillips. **Manual de iluminação**. 3. ed. Centro de Projetos de Iluminação da Philips Division, Holanda, 1981.
- OSRAM. **OSRAM - Luz, Lâmpadas, reatores e sistemas de iluminação**. Disponível em: <<http://www.osram.com.br/>>. Acessado em junho de 2008. Brasil, 2005.
- Costa, A. C.; Sousa, A. A.; Ferreira, F. N. Novos métodos de design de iluminação. In: **9º Encontro Português de Computação Gráfica**. Marinha Grande: [s.n.]. 2000.
- Schneider, P. S.; França, F. H. R. Inverse analysis applied to an illumination system. In: **10th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences**. [S.l.: s.n.]. Rio de Janeiro, 2004.
- Mossi, A. C. et al. Application of the generalized extremal optimization (geo) algorithm in an illumination inverse design. In: **19th International Congress of Mechanical Engineering, COBEM**. [S.l.: s.n.]. Brasília, 2007.
- Daun, K. et al. Comparison of methods for inverse design of radiant enclosures. **Journal of Heat Transfer**, v. 128, p. 269–282. 2006. ASME.
- Bayat, N.; Mehraban, S.; Sarvari, S. M. H. Inverse boundary design of a radiant furnace with diffuse-spectral design surface. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 37, p. 103–110. 2010.

Kudo, K. et al. Solution of the inverse radiative load problems by the singular value decomposition. In: **Proceedings of the First International Symposium on Radiation Transfer**. [S.l.: s.n.], (Radiative Transfer-I), p. 568–578. House, New York, 1996.

Howell, J. et al. The use of inverse methods for the design and control of radiant sources. **JSME International Journal**, (B, 4), v. 46, n. 4, p. 470–478. 2003.

Gamba, M. et al. Modeling of a radiative rtp-type production furnace through inverse design: Mathematical model and experimental results. In: **Proc. 2002 IMECE**. New York: ASME, v. 1. New Orleans, 2002.

Gamba, M.; Pavy, T.; Howell, J. R. Inverse methods for design and control of thermal systems: Validation in a 2-d visible light enclosure. In: **Proc. 2003 IMECE**. New York: ASME. Washington, DC, 2003.

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

Incropera, F. P.; DeWitt, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 5. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003.

Siegel, R.; Howell, J. R. **Thermal Radiation Heat Transfer**. 4. ed. New York: Taylor & Francis, 2002.

Barroso, L. C. et al. **Cálculo Numérico**. 2. ed. São Paulo: Ed. Harbra Ltda, 1983.

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

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

INMETRO. **SI Sistema Internacional de Unidades**. 8. ed. Rio de Janeiro, 2007. 114 p.

Iida, I. **Ergonomia: Projeto e Execução**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1990.

ABNT. : Iluminância de interiores. Rio de Janeiro, 1992.

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

- Grandjean, E. **Manual de Ergonomia**. 4. ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 1998.
- Braga Filho, W. **Problemas Inversos**. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2002.
- Campos Velho, H. F. **Problemas Inversos: Conceitos Básicos e Aplicações**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório de Computação e Matemática Aplicada. São José dos Campos, 2002.
- Vanderplaats, G. N. **Numerical Optimization Techniques for Engineering Design**. 2. ed. [S.l.]: Colorado Springs: Vanderplaats Reserch & Development, 1998.
- Sousa, F. L. d. et al. A new stochastic algorithm for desig optimization. **AIAA Journal**, v. 41, n. 9, p. 1808–1818. 2003.
- Bak, P.; Tang, C.; Wiesenfeld, K. Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise. **Physical Review Letters**, v. 59, n. 4, p. 381–384. 1987.
- Bak, P.; Chen, K. Self-organized criticality. **Scientific American**, p. 26–33. 1991.
- Souza, F. L. d. **Otimização Extrema Generalizada: Um Novo Algoritmo Estocástico para o Projeto Ótimo**. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 2003.
- Lin, C. Y.; Hajela, P. Genetic algorithms in optimization problems with discrete and integer desing variables. **Engineering Optimization**, v. 19, p. 309–327. 1992.
- Cassol, F. et al. Inverse analysis applied to illumination design: Determination of optimum locations of the light souces. In: **12th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences, ENCIT**. Belo Horizonte: [s.n.]. 2008.
- EEE. **Empresa de Equipamento Elétrico SA**. Disponível em: <<http://www.eee.pt/>>. Acessado em junho de 2008. Águeda, Portugal, 2008.