

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DETERMINAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DE AQUECEDORES EM FORMA DE FILAMENTOS
PARA UM FORNO DE AQUECIMENTO COM TEMPERATURA E FLUXO DE CALOR
UNIFORMES

por

Felipe Airoidi Accorsi

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2012



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

DETERMINAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DE AQUECEDORES EM FORMA DE FILAMENTOS
PARA UM FORNO DE AQUECIMENTO COM TEMPERATURA E FLUXO DE CALOR
UNIFORMES

por

Felipe Airoidi Accorsi

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Francis H. R. França

Comissão de Avaliação:

Prof. Me. Cristiano Frandalozo Maidana

Prof. Dr. Sérgio Viçosa Möller

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 7, dezembro 2012.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, por todo esforço e sacrifício realizado para me propiciar uma boa educação, tanto no quesito formação de caráter como em nível de instrução técnica.

Agradeço ao Professor Francis H. R. França pela orientação neste Trabalho de Conclusão de Curso, dedicação e tempo empregados para que fosse possível sua conclusão.

Dedico também um imenso obrigado ao Mestre Rogério Brittes da Silva pela inesgotável paciência e por todo suporte que tive de sua parte nas tardes em que realizei esse trabalho no GESTE.

Por fim, ao CESUP pela disponibilização dos recursos computacionais.

Accorsi, F. A. **Determinação da Configuração de Aquecedores em Forma de Filamentos para um Forno de Aquecimento com Temperatura e Fluxo de Calor Uniformes.** 2012. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

Esse trabalho envolve o projeto inverso de uma cavidade radiante tridimensional com superfícies cinza e difusas. Deseja-se determinar uma configuração espacial (forma geométrica e localização) de um conjunto de aquecedores em forma de filamentos, posicionados na superfície superior da cavidade retangular, para se atender as condições prescritas de fluxo de calor e temperatura uniformes ao longo da superfície de projeto (situada na base da cavidade). São estudados três casos de configuração para os aquecedores, sendo que em cada caso o modelo do filamento é representado por um número distinto de elementos aquecedores. A radiação térmica é o modo dominante de transferência de calor e para os cálculos de troca térmica entre superfícies é utilizado o método das radiosidades. É aplicada uma rotina em Fortran, que contém o algoritmo de otimização extrema generalizada (GEO), para a solução do problema inverso. Os resultados ilustram três configurações espaciais para os filamentos, que proporcionam condições próximas as prescritas (desvio máximo inferior a 6% no caso em que o filamento é modelado com trinta elementos aquecedores) e são de difícil determinação intuitiva.

PALAVRAS-CHAVE: Radiação Térmica, Método das Radiosidades, Análise Inversa

Accorsi, F. A. **Configuration Determination of Filament-type Heater to Heating Furnace with Uniform Temperature and Radiative Heat Flux.** 2012. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

This work applies the inverse analysis for the thermal design of a three-dimensional radiative enclosure formed with diffuse-gray surfaces. The objective is determine the spatial distribution of a filament-type heater, located in the top surface of the rectangular enclosure, to attain the prescribed uniform temperature and radiative heat flux on the design surface (at the bottom of the enclosure). This work studied three heater configuration cases, whereas in each case the heater is modeled with distinct number of heater elements. Thermal radiation is the governing mode of heat transfer and for the computation of the radiative exchanges between the surfaces it is applied the radiosity method. The method to solve the inverse problem is the generalized extremal optimization (GEO). The results illustrate special configuration to filament-type that propitiate conditions near to prescribed (maximum deviation inferior to 6% in the case where the filament-type is modeled with thirty heater elements) and have hard intuitive determination.

KEYWORDS: Thermal Radiation, Radiosity Method, Inverse Analysis

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Configuração dos bits no método GEO
$e_{b,j}$	Poder emissivo de corpo negro para elemento j
\mathcal{E}_j	Emissividade hemisférica total da superfície j
F	Função Objetivo
F_{j-k}	Fator de forma (radiação que sai do elemento j e atinge o elemento k)
F_m	Média das funções objetivo
γ_{\max}	Desvio máximo
γ_{avg}	Desvio médio
H	Dimensões altura da cavidade
l_i	Número inteiro da transformação da variável i de sua forma binária para a decimal no método GEO
i_x	Posição espacial horizontal no domínio discreto
i_y	Posição espacial vertical no domínio discreto
jd	Elementos da superfície de projeto
JD	Número de elementos da superfície de projeto
jh	Elementos aquecedores
JH	Número de elementos do filamento aquecedor
jw	Elementos de parede
K	Níveis de adaptabilidade do método GEO
L	Dimensões comprimento da cavidade
L_b	Comprimento da seqüência binária do método GEO
m	Número de bits que representa cada variável no método GEO
n	Número de avaliações da função objetivo no método GEO
q	Precisão adotada para o método GEO
$q_{o,j}$	Radiosidade do elemento j
$Q_{o,j}$	Radiosidade adimensional do elemento j
$q_{r,j}$	Fluxo de calor do elemento j
$Q_{r,j}$	Fluxo de calor adimensional da superfície do elemento j
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
T	Temperatura
T_{DS}	Temperatura da superfície de projeto
t_j	Temperatura adimensional no elemento j
T_j	Temperatura do elemento j
W	Dimensões largura da cavidade
x	Coordenada referente ao eixo x no sistema de coordenadas retangulares
x_i^l	Limites mínimos da variável i
x_i^u	Limites máximos da variável i
y	Coordenada referente ao eixo y no sistema de coordenadas retangulares
Z	Coordenada referente ao eixo z no sistema de coordenadas retangulares

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	1
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4 METODOLOGIA	3
4.1 FORMULAÇÕES FÍSICA E MATEMÁTICA	3
4.2 TÉCNICA DE SOLUÇÃO	5
4.2.1 Otimização Utilizando Algoritmo GEO	5
4.2.2 Procedimento da Solução	7
4.2.3 Verificação da Solução Inversa	8
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	9
5.1 Filamento com Dez Elementos Aquecedores	10
5.2 Filamento com Vinte Elementos Aquecedores	13
5.3 Filamento com Trinta Elementos Aquecedores	13
6. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
Apêndice I	16
Apêndice II	17
Apêndice III	18
Apêndice IV	19

1. INTRODUÇÃO

Projetos de fornos de aquecimento para propiciar uma distribuição de temperatura e fluxo de calor uniformes são de amplo interesse na indústria. As diversas aplicações incluem, por exemplo, tratamento térmico de materiais, cozimento de produtos alimentícios, cura e secagem de tintas e resinas, etc. Para a realização de processos de tratamento térmico utilizam-se fornos de aquecimento industriais que sustentam altas temperaturas, onde o modo de transferência de calor dominante é a radiação térmica. Um exemplo é o tratamento térmico de recozimento para aços que requer aumento da temperatura uniforme para que se evite o surgimento de tensões internas. Para atender a essa exigência térmica deve-se controlar o fluxo de calor produzido na superfície do material, chamada de superfície de projeto, já a temperatura e o fluxo de calor são condições do tipo do material, sendo condições simultaneamente prescritas. As fontes de calor desses fornos são dadas por aquecedores tipo lâmpadas ou pequenas resistências que são distribuídas ao longo do forno ou por filamentos aquecedores. Aquecedores tipo filamento possuem dimensões maiores que aquecedores pontuais e conseqüentemente, com apenas um aquecedor de filamento tem-se a vantagem de cobrir uma área maior. Tipicamente os estudos de projeto inverso utilizam aquecedores pontuais, sendo um diferencial desse estudo o emprego da análise inversa para filamentos. Um problema comum quando se utiliza filamentos aquecedores é a determinação de sua forma geométrica e a localização espacial desses elementos no forno. A determinação da configuração dos aquecedores é muito difícil de ser feita intuitivamente, e as técnicas convencionais para sua determinação baseiam-se na tentativa e erro. De modo geral, parte-se da experiência do projetista, estimam-se algumas configurações e comparam-se as distribuições de fluxo de calor e temperatura resultantes na superfície de projeto para escolher a que mais se aproxima das condições prescritas na superfície de projeto. Esse procedimento não fornece garantias de que as soluções encontradas sejam próximas das melhores configurações. Como uma alternativa para essa abordagem pode-se empregar a análise inversa, onde se tem as condições de fluxo de calor e temperatura uniformes na superfície de projeto e deseja-se a partir dessas condições determinar a configuração dos aquecedores.

A análise inversa de sistemas de radiação térmica é capaz de evitar a abordagem da tentativa e erro, porém são formuladas por um conjunto de equações de Fredholm de primeira ordem que possuem comportamento mal posto. Diz-se que um sistema de equações é mal posto quando a solução: não satisfaz as condições de existência, unicidade e dependência contínua dos dados iniciais – caso não obedeça um dos requisitos é dito mal-posto. Para a solução desse sistema de equações utilizam-se formulações implícitas ou explícitas. Na abordagem implícita a formulação pode ser tratada como um problema de otimização de múltiplas variáveis, enquanto os métodos explícitos buscam determinar diretamente os parâmetros desconhecidos, como por exemplo em técnicas de regularização.

Existem, basicamente, dois tipos distintos de técnicas de otimização, sendo eles os métodos determinísticos (método de Newton, Levenber-Marquardt, etc) e a abordagem estocástica (simulações de algoritmos genéticos, recozimento simulado, etc). Em geral, métodos determinísticos convergem para uma solução mais rapidamente, porém possuem uma maior probabilidade de convergir para uma solução de mínimo ou máximo local. Enquanto os métodos estocásticos possuem uma maior probabilidade de convergir para a mínima ou máxima global, embora contenha um custo computacional maior. A análise inversa e os algoritmos de otimização geralmente não conduzem a uma solução exata, mas diferentes soluções aproximadas que satisfazem ao fluxo de calor e temperatura prescritos.

2. OBJETIVOS

Esse trabalho considera a análise inversa de uma cavidade radiante tridimensional como modelo de um forno de aquecimento com superfícies cinza e difusas. O espaço entre as superfícies é preenchido com um meio não participante. A distribuição espacial dos aquecedores contínuos é deixada livre enquanto duas condições de contorno são impostas na

superfície de projeto – fluxo de calor por radiação e temperatura uniformes. O objetivo desse trabalho é encontrar a configuração de um filamento que atenda as condições prescritas para três casos (aquecedor com dez, vinte e trinta elementos). Para atingir esse objetivo faz-se um equacionamento implícito e soluciona-se com o auxílio de uma rotina em Fortran utilizando o algoritmo da otimização extrema generalizada (GEO), onde para esse problema de otimização a função objetivo que deve ser minimizada é uma medida da diferença entre o fluxo prescrito e o obtido pelas condições impostas na superfície de projeto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estudos aplicados a problemas de troca térmica radiante em cavidades com o objetivo de determinar a localização de aquecedores utilizando a análise inversa tendo-se como condições de contorno distribuição de fluxo de calor e temperatura uniformes em superfícies são amplamente estudados. Dentre esses estudos pode-se ressaltar Pourshaghaghay et alli., 2006. que expõem uma alternativa de solução para o problema de distribuição de fluxo de calor prescrito na superfície de projeto em uma cavidade com meio participante e procura determinar a distribuição dos aquecedores e o estudo de Mehraban et. Alli, 2008 que expõem um método para determinar a localização de aquecedores utilizando a análise inversa em regime transiente com o método quasi-estático.

A análise direta para problemas envolvendo cavidades com troca térmica radiante possui como dados de entrada a localização e a potência dos aquecedores e buscam-se os dados de saída, distribuição de fluxo de calor e temperatura nas superfícies. Quando se deseja achar a configuração dos elementos aquecedores (forma e posição geométrica) que fornece determinadas distribuições de fluxo de calor e temperatura, essa abordagem exige uma sistemática de tentativa e erro, onde se propõem algumas configurações de aquecedores, calculam-se os dados de saída desejados e fazem-se comparações para verificar qual está mais próximo das condições procuradas. A análise inversa utiliza as condições de contorno de temperatura e fluxo de calor uniformes ao longo da superfície como dados de entrada, e está em busca do agente causador dessas condições, localização e potência dos aquecedores. A análise inversa tem por objetivo partir de menos restrições, fornecendo mais liberdade de solução ao sistema e criando oportunidades para descobrir soluções que os métodos tradicionais teriam dificuldades em encontrar. Alguns exemplos da aplicação da análise inversa utilizada em problemas de transferência de calor podem ser observados nos estudos de Colaço et alli, 2006, França et alli, 2001, e Howell et alli, 2000.

Na análise inversa o sistema de equações pode se tornar mal posto quando se utiliza como dados de entrada as condições de contorno da superfície de projeto e se deixa as condições dos aquecedores sem especificação. Técnicas ordinárias como Gauss-Seidel, eliminação de Gauss ou decomposição LU, quando aplicados a sistemas mal postos não conseguem fornecer uma resposta com sentido físico. Como alternativa para soluções de problemas inversos para cavidades radiantes esses sistemas de equações podem ser manipulados por métodos de regularização ou otimização como expresso em Hartnett. et. Alli, 2002.

Os métodos de regularização possuem por base a manipulação algébrica dos sistemas de equações. Dentre os estudos de métodos de regularização pode-se citar os apresentados em Ertürk et alli, 2001, que trazem uma análise comparativa de soluções de problemas inversos de radiação térmica apenas com técnicas de regularização, dando enfoque a três métodos. O método de regularização de decomposição em valores singulares truncada (TSDV), regularização de gradientes conjugado (CGM), e o método gradiente bi-conjugado.

Métodos de otimização são amplamente utilizados para solução de cavidades radiantes. Li e Yang, 1997, e Safavinejad et alli, 2008, elaboraram uma técnica de solução de análise inversa via otimização utilizando algoritmos genéticos. O algoritmo da Otimização Extrema Generalizada (GEO) desenvolvido por De Sousa, et alli, 2003, foi utilizado por Cassol et alli, 2010, em um projeto de iluminação para buscar a distribuição espacial e a potência de um conjunto de lâmpadas.

Embora cada método de regularização ou otimização tenha suas particularidades alguns trabalhos comparam essas diferentes técnicas de solução. Daun et alli, 2006, comparam técnicas de regularização (TSDV, CGM, regularização de Tikhonov) com métodos de otimização (minimização de quasi-Newton e o método do recozimento simulado) na solução da cavidade radiante.

Uma alternativa recente de Brittes e França, 2012, para a solução de sistemas envolvendo a análise inversa em cavidade radiante, uniu as vantagens das técnicas de regularização com as de otimização. A solução denominada híbrida foi baseada no algoritmo de otimização GEO e na técnica de regularização TSVD.

Nesse trabalho utiliza-se o algoritmo da otimização extrema generalizada (GEO), para solução do sistema de equações implícito da análise inversa onde busca-se configurações para o filamento aquecedores que se aproximem das condições prescritas de fluxo de calor e temperatura uniformes ao longo da superfície de projeto de um forno.

4. METODOLOGIA

4.1 FORMULAÇÕES FÍSICA E MATEMÁTICA

O forno considerado neste estudo é modelado por uma cavidade radiante retangular. As dimensões comprimento (L), largura (W) e altura (H) estão representadas Figura 4.1. No plano superior situam-se os aquecedores tipo filamento contínuo e deseja-se determinar uma configuração (localização espacial e forma geométrica) que atenda as condições prescritas para a superfície de projeto. No plano inferior encontra-se a superfície de projeto onde o fluxo de calor e temperatura são prescritos. As paredes laterais e demais elementos são considerados termicamente isoladas. A cavidade é preenchida com um meio não participante e a transferência de calor fica restrita às trocas radiantes entre as superfícies. O filamento tem liberdade para se posicionar em qualquer elemento do plano superior. A cavidade tridimensional é dividida em elementos de área quadrado. Os elementos da superfície de projeto e os elementos aquecedores são designados respectivamente, por jd , jh e os demais elementos de parede (isolados) são representados, jw .

Em função da simetria, as análises podem ser realizadas para um quarto da cavidade, como pode ser visto na Figura 4.2. Na Figura 4.3 pode-se visualizar a representação da base da cavidade e da superfície de projeto discretizadas. A base da cavidade é formada por 180 elementos, sendo que ao longo do eixo x tem-se 15 divisões e ao longo do eixo y tem-se 12 divisões. A superfície de projeto não cobre inteiramente a base da cavidade, pois nas extremidades o efeito da emissão direta dos aquecedores é minimizado devido o significativo efeito da reflexão das paredes. A superfície de projeto está discretizada com uma malha de 108 elementos com 12 divisões ao longo de x e 9 divisões ao longo de y , conforme Figura 4.3

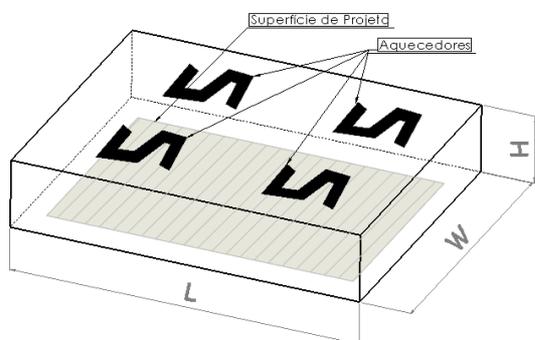


Figura 4.1 – Representação de um forno, na base tem-se a indicação da superfície de projeto, no plano superior dos aquecedores tipo filamento.

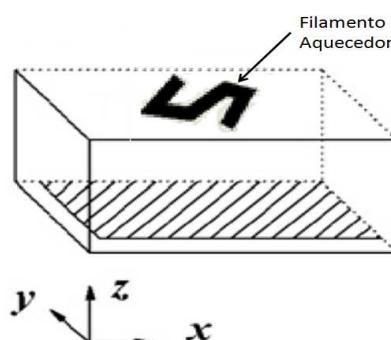


Figura 4.2 - Representação parcial (um quarto) da cavidade, no plano superior há uma representação de um aquecedor tipo filamento.

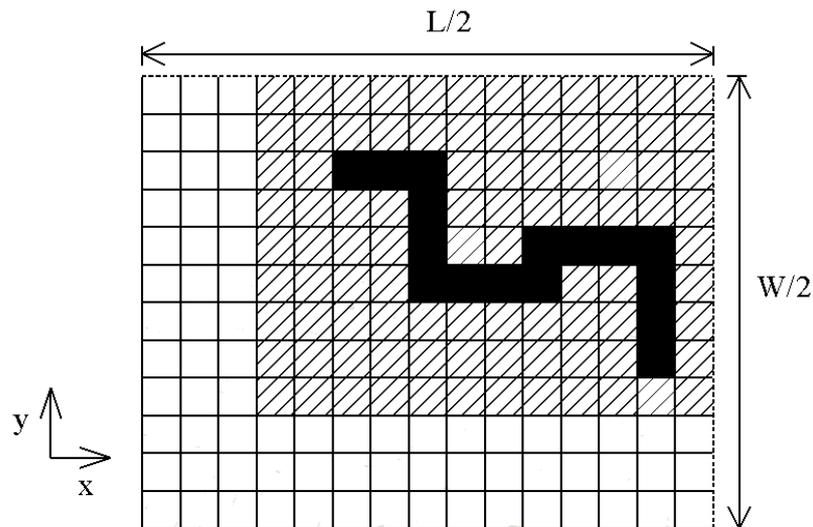


Figura 4.3 - Representação da vista superior de um quarto da base da cavidade com a superfície de projeto (área achurada) e filamento aquecedor (em preto).

Dentre os diversos métodos para solução de problemas que envolvem cavidades radiantes, Siegel e Howell, 2002, apresentam o método das radiosidades, que se baseia em um balanço de energia nas superfícies para a construção de um sistema de equações utilizando a radiosidade (radiação térmica emitida e refletida) dos elementos que formam a cavidade, conforme apresentado abaixo:

$$q_{o,j} = \varepsilon_j e_{b,j} + (1 - \varepsilon_j) \sum_{k=1}^N F_{j-k} q_{o,k} \quad (4.1)$$

$$q_{o,j} = q_{r,j} + \sum_{k=1}^N F_{j-k} q_{o,k} \quad (4.2)$$

onde $q_{o,j}$ é a radiosidade e $q_{r,j}$ é a fluxo de radiação deixando a superfície do elemento j . O termo $e_{b,j} = \sigma T_j^4$ representa o poder emissivo de corpo negro, F_{j-k} o fator de forma entre dois elementos (radiação que sai do elemento j e atinge o elemento k) e ε_j representa a emissividade hemisférica total da superfície j . As Eqs. (4.1) e (4.2) são válidas para superfícies cinzas e difusas, sendo utilizadas de acordo com as condições de contorno que se tem conhecimento. A Eq. (4.1) é utilizada quando se tem conhecimento da temperatura do elemento e a Eq. (4.2) quando se tem conhecimento do fluxo de calor do elemento.

As Eqs (4.1) e (4.2) são reescritas na forma adimensional conforme apresentado nas equações abaixo:

$$Q_{o,j} = \varepsilon_j t_j^4 + (1 - \varepsilon_j) \sum_{k=1}^N F_{j-k} Q_{o,k} \quad (4.3)$$

$$Q_{o,j} = Q_{r,j} + \sum_{k=1}^N F_{j-k} Q_{o,k} \quad (4.4)$$

onde a adimensionalização do fluxo de calor é dada por $Q_{r,j} = q_{r,j} / \sigma T_{DS}^4$, da radiosidade por $Q_{o,j} = q_{o,j} / \sigma T_{DS}^4$ e da temperatura por $t_j = T_j / T_{DS}$. Onde T_{DS} é a temperatura na superfície de projeto.

Para garantir o balanço de energia, o fluxo de calor do filamento deve ser o mesmo da superfície de projeto, já que os elementos de parede, jw , são isolados. Determina-se a taxa de calor adimensional de cada elemento aquecedor pela equação abaixo:

$$Q_{r,jh} = Q_{r,jd} (JD/JH) \quad (4.5)$$

Para a superfície de projeto tem-se temperatura e fluxo de calor (condições prescritas), Inicialmente aplica-se a Eq. (4.3) para cada elemento da superfície de projeto, jd :

$$Q_{o,jd} = \varepsilon_{jd} t_{jd}^4 + (1 - \varepsilon_{jd}) \left(\sum_{jh=1}^{JH} F_{jd-jh} Q_{o,jh} + \sum_{jw=1}^{JW} F_{jd-jw} Q_{o,jw} \right) \quad (4.6)$$

onde a temperatura adimensional da superfície de projeto é $t_{jd} = 1$.

A radiosidade $Q_{o,jw}$ referente aos elementos de parede é determinada pela aplicação da Eq. (4.4) juntamente com a condição de elementos isolados, $Q_{r,jw} = 0$:

$$Q_{o,jw} = \sum_{jd=1}^{JD} F_{jw-jd} Q_{o,jd} + \sum_{jh=1}^{JH} F_{jw-jh} Q_{o,jh} + \sum_{jw=1}^{JW} F_{jw-jw} Q_{o,jw} \quad (4.7)$$

A partir do valor do fluxo de calor adimensional dos elementos aquecedores, $Q_{r,jh}$, obtido pela Eq. (4.5), pode-se determinar o valor da radiosidade, $Q_{o,jh}$, aplicando-se a Eq. (4.4) para os elementos aquecedores:

$$Q_{o,jh} = Q_{r,jh} + \sum_{jd=1}^{JD} F_{jh-jd} Q_{o,jd} + \sum_{jw=1}^{JW} F_{jh-jw} Q_{o,jw} \quad (4.8)$$

As radiosidades desconhecidas, $Q_{o,jh}$, $Q_{o,jw}$ e $Q_{o,jd}$ podem ser obtidas através da solução do sistema formado pelas Eqs. (4.6) a (4.8). De posse desses valores pode-se determinar o valor resultante do fluxo de calor adimensional dos elementos na superfície de projeto pela equação abaixo:

$$Q_{r,jd} = Q_{o,jd} - \left(\sum_{jh=1}^{JH} F_{jd-jh} Q_{o,jh} + \sum_{jw=1}^{JW} F_{jd-jw} Q_{o,jw} \right) \quad (4.9)$$

Pode-se formar um sistema com as Eqs. (4.6) a (4.9) e obter-se o fluxo de calor na superfície de projeto, $Q_{r,jd}$.

4.2 TÉCNICA DE SOLUÇÃO

4.2.1 Otimização Utilizando Algoritmo GEO

O método da otimização extrema generalizada (GEO) é um método estocástico desenvolvido por De Souza et al., 2003, que utiliza uma lógica evolucionária. Neste método L espécies são alinhadas, associando-se a cada uma delas um número de adaptabilidade, o qual determinará aquelas que têm maior probabilidade de sofrer mutação. Imaginam-se as espécies como bits que assumem valores de zero ou um. Desta forma, toda a população será representada por uma única seqüência binária que codifica todas as N variáveis do projeto de otimização. Essa representação é similar a um cromossomo em algoritmos genéticos com representação binária. Os bits são distribuídos de forma aleatória para formar a distribuição inicial da seqüência binária, conforme representação na Figura 4.4:

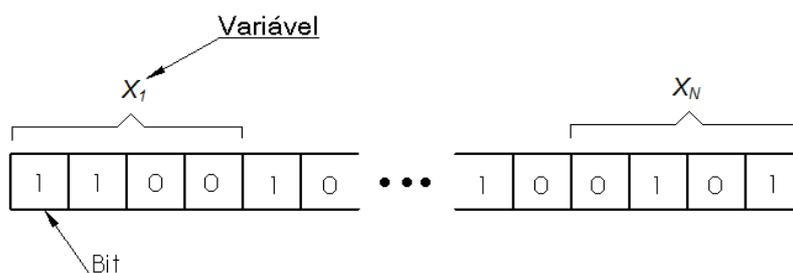


Figura 4.4 - Representação da seqüência binária formada por N variáveis (na figura, cada variável é representada por 4 bits).

O número de bits que representa cada variável é diretamente relacionado à precisão, q , que se deseja. Escolhe-se qual precisão é aceitável para cada variável e se estabelece o respectivo número de bits, m , para atender a esse requisito pela Eq. (4.11). Segundo o método GEO todas as variáveis possuem o mesmo número de bits, logo se deve estabelecer o maior valor de m dentre todos os valores obtidos:

$$2^m \geq \frac{x_i^u - x_i^l}{q} + 1 \quad (4.11)$$

onde x_i^u e x_i^l são, respectivamente, os limites máximos e mínimos da variável i , com i iniciando em 1 até N . A dimensão da seqüência binária é expressa pelo produto do número de variáveis, N , pelo número de bits das variáveis ($L_b = N \times m$). A transformação de cada variável da forma binária para o seu valor físico é expresso pela equação abaixo:

$$x_i = x_i^l + (x_i^u - x_i^l) \frac{l_i}{2^m - 1} \quad (4.12)$$

onde l_i é o número inteiro obtido da transformação da variável i de sua forma binária para a decimal.

No método GEO, faz-se a inversão (mutação) de um bit (espécie), calcula-se a variação que essa inversão causa em uma função objetivo e associa-se um número de adaptabilidade que é proporcional ao ganho (ou perda) no valor dessa função objetivo ao se inverter o bit. Um a um, todos os bits da seqüência sofrem esse processo de inversão (de 0 para 1, ou vice-versa) e são associados a um grau de adaptabilidade. Os bits são distribuídos por níveis, k , de acordo com sua adaptabilidade, sendo o bit menos adaptado colocado no nível $k=1$ e o mais adaptado no nível $k=L_b$. A inversão dos bits é regida pela distribuição de probabilidade dada pela Eq. (4.13), onde τ é um parâmetro positivo de ajuste, que permite a mutação de qualquer variável, porém privilegia aquela de menor adaptabilidade.

$$P(K) = K^{-\tau}, \quad 1 \leq k \leq L_b \quad (4.13)$$

As etapas a seguir ilustram a aplicação do algoritmo GEO:

- 1) Define-se a precisão necessária, q , para cada variável e assim determina-se o número de bits por variável.
- 2) Inicia-se com uma seqüência de bits aleatória de comprimento L_b , codificando todas as variáveis do projeto ($L_b = N \times m$). Calcula-se o valor da função objetivo, F , para esta configuração inicial dos bits, C . Faz-se $C_{best} = C$ e $F_{best} = F$.
- 3) Para cada bit j ($1 \leq j \leq L_b$) da seqüência binária, em uma dada interação: a) Inverte-se o bit (de 0 para 1 ou vice-versa) e calcula-se o valor da função objetivo F_j para a

- configuração C_j ; b) Associa-se um valor correspondente a adaptabilidade (variação no valor da função objetivo) $\Delta F_j = F_j - F_{best}$, que indica o ganho relativo (ou perda) quando o bit é invertido e compara-se com o melhor valor da função objetivo encontrado até aqui; c) Retorna-se o bit para seu valor inicial.
- 4) Ordenam-se os bits de acordo com seus valores de adaptabilidade, $k=1$, para o menos adaptado e $k=L_b$ para o mais adaptado. Em problemas de minimização, os bits com maiores valores de ΔF_j ocupam níveis mais altos, e vice-versa para problemas de maximização. Se dois ou mais bits possuírem o mesmo valor para a adaptabilidade, ela é distribuída aleatoriamente.
 - 5) Escolhe-se com igual probabilidade um bit qualquer para inverter (de 0 para 1, ou vice-versa). Cria-se um número aleatório RAN, com distribuição uniforme no intervalo compreendido entre $[0,1]$. Se K^{-r} for maior ou igual ao número RAN, confirma-se a inversão do bit. Caso contrário, escolhe-se outro bit e repete-se o processo até se confirmar a mutação.
 - 6) Quando se obteve a alteração do bit j na etapa anterior, faz-se $C_j = C$ e $F_j = F$.
 - 7) Se $F < F_{best}$ para problemas de minimização, ou $F > F_{best}$ para problemas de maximização, faz-se $C = C_{best}$ e $F = F_{best}$.
 - 8) Repetem-se as etapas de (2) a (7) até um critério de parada.
 - 9) Retornam-se os valores de C_{best} e F_{best} .

4.2.2 Procedimento da Solução

Deseja-se encontrar configurações para os elementos aquecedores que atendam às condições prescritas. Forma-se um sistema com as Eq. (4.6) a (4.9) e se faz uma comparação desse fluxo de calor, $Q_{r,jd}$, encontrado na superfície de projeto pelo sistema de equações com o fluxo prescrito. Isto é realizado pela Eq. (4.14), chamada de função objetivo, que mede o desvio entre o fluxo de calor prescrito e o fluxo de calor obtido pela configuração dos aquecedores estimado. Como uma estratégia para evitar a abordagem da tentativa e erro, utiliza-se algoritmo de otimização GEO para minimizar a função objetivo:

$$F(x_{jh}, y_{jh}) = \sqrt{\sum_{jd=1}^{JD} (Q_{DS} - Q_{r,jd})^2} \quad (4.14)$$

Essa expressão permite uma abordagem simples para o problema da determinação dos elementos aquecedores. Nota-se que a função objetivo, F , é dependente das variáveis x_{jh} e y_{jh} , logo pode-se fazer a análise de uma nova configuração de aquecedores com uma rápida resposta.

A variável contínua x_i na Eq. (4.12), que representa a posição dos aquecedores no domínio, será substituída pelas variáveis discretas i_x e i_y (posições espaciais nas direções x e y , respectivamente). Assim, as restrições das variáveis serão dadas por $i_x^l \leq i_x \leq i_x^u$ e $i_y^l \leq i_y \leq i_y^u$ onde os sobrescritos l e u representam, respectivamente, os limites inferiores e superiores.

Na proposta de De Souza, et al, 2003, as restrições utilizadas na Eq. (4.12) são mantidas inalteradas durante a execução do algoritmo. Neste trabalho, realizou-se uma implementação, após o cálculo da posição do primeiro aquecedor do filamento, as restrições dos aquecedores subsequentes são atualizadas para garantir que estes permaneçam unidos. Na prática, toda a vez que a posição de um aquecedor (i_x ou i_y) é calculada as restrições do aquecedor seguinte são dadas pelas Eqs. (4.14) e (4.15) respectivamente para a direção x e y .

$$\begin{aligned} i_x^l &= i_x - 1 \\ i_x^u &= i_x + 1 \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} i_y^l &= i_y - 1 \\ i_y^u &= i_y + 1 \end{aligned} \quad (4.15)$$

Essas restrições permitem a formação dos filamentos aquecedores, porém não limitam o posicionamento dos aquecedores à parte interna da cavidade radiante. Em conjunto às restrições das Eqs. (4.14) e (4.15), limita-se o posicionamento dos aquecedores nos intervalos da malha compreendidos por $1 < i_x < 15$ na direção x e $1 < i_y < 12$ na direção y . Os aquecedores são posicionados na superfície superior da cavidade, logo a função objetivo a ser minimizada é dependente de um número de variáveis duas vezes maior do que o número de elementos aquecedores – as variáveis de posicionamento i_x e i_y para cada elemento. Essas variáveis possuem precisão unitária, $q = 1$ já que a malha é associada apenas a valores inteiros.

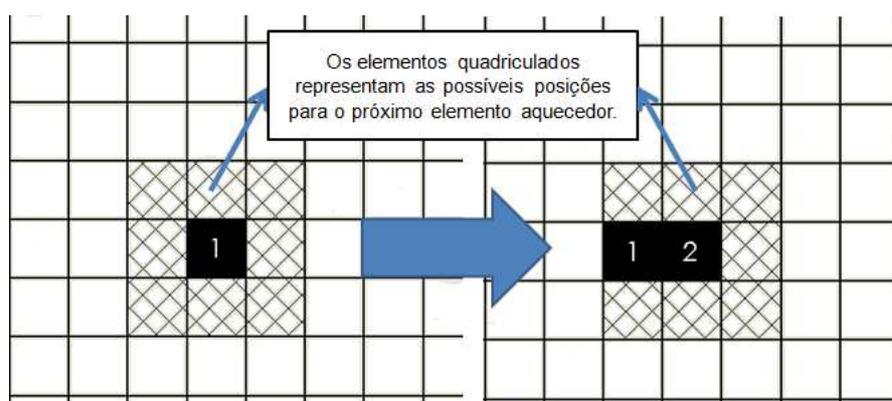


Figura 4.5 - Representação do posicionamento dos elementos aquecedores e possíveis locais para a posição do próximo elemento aquecedor.

Um ponto negativo dos métodos de otimização é que o problema deve ser resolvido várias vezes, para se chegar aos pontos de mínimo, especialmente quando se está usando métodos estocásticos. Como o método GEO é um método de otimização estocástico, o critério de parada é determinado fazendo-se uma curva do número de avaliações da função objetivo, n , pelo valor da média das funções objetivo, F_m - essa média contém dez repetições independentes do procedimento de cálculo. O critério de parada é estabelecido quando a média das funções objetivo, F_m , não varia significativamente em relação ao número de avaliações, n .

4.2.3 Verificação da Solução Inversa

O desvio da solução pode ser verificado simplesmente simulando-se a configuração dos aquecedores obtidos pela análise inversa e calculando o fluxo de calor resultante na superfície de projeto para cada elemento. Então os desvios médios e máximos são expressos respectivamente pelas equações abaixo:

$$\gamma_{avg} = \frac{1}{JD} \sum_{jd=1}^{jd=JD} \left| \frac{Q_{DS} - Q_{r,jd}}{Q_{DS}} \right| \times 100\% \quad (4.16)$$

$$\gamma_{max} = \max \left| \frac{Q_{DS} - Q_{r,jd}}{Q_{DS}} \right| \times 100\% \quad (4.17)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os estudos deste trabalho consideram a cavidade tridimensional como a apresentada na representação esquemática da Figura 4.1. As emissividades da superfície de projeto e das fontes aquecedoras são, respectivamente, de $\varepsilon_{jd} = 0,9$ e $\varepsilon_{jh} = 0,9$ - os demais elementos são considerados completamente isolados, logo sua emissividade não interfere na solução. As relações de adimensionalização pelo comprimento L da cavidade tridimensional retangular são de $W/L = 0,8$ para a base, e de $H/L = 0,2$, para altura. Como pode ser visualizado nas Figuras 4.1 e 4.2 a cavidade possui uma geometria com simetria em cada quarto da cavidade. A discretização da cavidade radiante é realizada com uma malha composta respectivamente por 15, 12 e 6 elementos nas direções x , y e z . Essa malha já foi validada em estudos anteriores como em Brittes e França, 2012 e Cassol et alli, 2010. A superfície de projeto não cobre inteiramente a base da cavidade, tendo em vista que os elementos próximos às extremidades são relativamente pouco influenciados pela emissão dos elementos aquecedores, mas principalmente pela reflexão das paredes laterais, como observado por Brittes e França, 2012. A superfície de projeto é adotada como $W_{DS} / L = 0,6$ e $L_{DS} / L = 0,8$, e é discretizada em uma porção de malha com 108 elementos, $JD = 108$, conforme apresentado na Figura 4.3.

As condições prescritas para os elementos da superfície de projeto são fluxo de calor de $q_{DS} = -3,22 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ e temperatura igual à $T_{DS} = 673\text{K}$. Os valores dessas condições adimensionalizadas (como descrito na secção 4.1) são de $Q_{r, jd} = Q_{DS} = -0,277$ e $t_{jd} = t_{DS} = 1$, respectivamente. O valor negativo para o fluxo de calor segue a convenção de sinais de troca térmica radiante, onde o sinal negativo indica fluxo de calor chegando à superfície.

A fonte da energia térmica são os filamentos aquecedores localizados no plano superior da cavidade e considera-se um filamento ideal, que possui mesmo fluxo de calor ao longo de toda a sua extensão. Logo todos os elementos aquecedores possuem o mesmo fluxo de calor adimensional $q_{r, jh}$. Os demais elementos são considerados perfeitamente isolados logo $Q_{r, jw} = 0$. Para ilustrar a aplicação da metodologia são considerados três modelos de filamentos aquecedores, representados por dez elementos ($JH=10$), vinte elementos ($JH=20$) e trinta elementos aquecedores ($JH=30$) em cada quarto da cavidade.

Para a aplicação do algoritmo GEO dois parâmetros são necessários, τ que estabelece a probabilidade de inversão de cada bit de acordo com a Eq. (4.13) e n que é o número de avaliações da função objetivo (critério de parada). O algoritmo GEO já foi utilizado por Brittes e França, 2012, onde é realizado um trabalho de análise inversa aplicada a troca térmica semelhante. Com base nesse estudo adotou-se o valor de $\tau = 1,25$ para as análises.

No algoritmo GEO, a distribuição inicial dos bits é aleatória (como descrito na Secção 4.2.1). Tendo em vista essa condição, faz-se mais de uma repetição do procedimento de cálculo, criando-se assim vários cenários iniciais. Esse procedimento permite uma análise ampla do comportamento da função objetivo. As rotinas de cálculo são repetidas dez vezes, sendo que para inicialização é criado uma distribuição aleatória diferente para a seqüência binária e conseqüentemente para a configuração inicial dos aquecedores tipo filamento.

O número de bits m para cada variável está associado à precisão desejada q . A precisão de $q=1$ é escolhida, pois está se buscando os pontos espaciais de posicionamento dos elementos aquecedores referentes às variáveis i_x e i_y , que no domínio discreto utilizam apenas números inteiros. Utilizando a Eq. (4.11) o número de bits necessários para representar cada variável, atendendo a exigência de precisão unitária, é de $m=4$. Tem-se dessa forma uma seqüência binária composta por $L_{b, 10}=80$, $L_{b, 20}=160$ e $L_{b, 30}=240$ bits, respectivamente para os casos em que o filamento é modelado com dez, vinte e trinta elementos aquecedores.

O fluxo de calor adimensionalizado para o filamento aquecedor deve ser o mesmo que o da superfície de projeto (valor prescrito de $JD \times Q_{DS} = -29,92$). Na Tabela 5.1. pode-se visualizar o valor da taxa de calor radiante para cada elemento aquecedor nas três dimensões do filamento propostas para o estudo.

Nas análises fazem-se dez repetições independentes de cada caso (filamento modelado com dez, vinte e trinta elementos aquecedores). Para a análise das três dimensões

de filamento aquecedor, os resultados obtidos são referentes ao ponto em que a média das funções objetivo, F_m , não varia significativamente. Então, nesse ponto, seleciona-se dentre as 10 repetições do algoritmo GEO, a configuração dos aquecedores que fornece o menor resultado da função objetivo.

Tabela 5.1 - Número de elementos aquecedores que compõem o filamento aquecedor e seus respectivos valores de taxa de calor radiante adimensionalizada.

Número de elementos aquecedores (JH)	Taxa de calor radiante para cada elemento aquecedor ($Q_{r,jh}$)
10	2,992
20	1,496
30	0,998

As rotinas contendo os procedimentos de cálculos foram empregadas em linguagem Fortran e utilizaram a infra-estrutura do CESUP (Centro Nacional de Supercomputação) equipado com computadores AMD Opteron 2210 Dual Core, 1.8Ghz e 8GB de memória RAM. O tempo computacional para uma avaliação é de 0,05 segundos e para as soluções envolvendo dois milhões de avaliações o tempo de processamento é de 27,6 horas.

5.1 Filamento com Dez Elementos Aquecedores

No caso em que o filamento é representado por dez elementos ($JH=10$), tem-se $Q_{r,jh}=2,992$, como o fluxo de calor adimensional para cada elemento aquecedor, também apresentado na Tabela 5.1. Como esperado a função objetivo decresce continuamente com o número de avaliações n , e pode ser visualizado na Figura 5.1.a. Estabeleceu-se como critério de parada do algoritmo GEO o número de dois milhões de avaliações ($n = 2000000$). Nas primeiras 1,5 milhões de avaliações, ocorre um expressivo decaimento da média da função objetivo e tendo em vista que mais avaliações não reduzem significativamente o valor da função objetivo, determina-se que o valor de 1,5 milhões permanece como o ponto para obtenção da configuração do aquecedor.

Como exemplo da evolução da solução pode-se visualizar na Figura I.1 do apêndice, a configuração dos elementos aquecedores desde a sua distribuição inicial (aleatória), algumas configurações intermediárias e a sua melhor configuração ao longo de uma repetição independente – a melhor configuração é referente a que obteve o menor valor da função objetivo até o ponto de obtenção das configurações. Na Figura II.1 do apêndice pode-se visualizar a representação das configurações obtidas nas dez repetições independentes.

O método indica como solução a configuração do aquecedor tipo filamento representado na Figura 5.1.b. e coordenadas apresentadas na Tabela III.1 do apêndice para um filamento modelado com 10 elementos aquecedores ($JH=10$) posicionado no plano superior da cavidade radiante retangular com fluxo de calor e temperatura uniformes na superfície de projeto. Essa geometria em formato similar a letra “V” é uma solução que pode ser aproximada para dois segmentos de retas em um sistema físico real, conforme representado na Figura IV.1.a do apêndice.

Na Figura 5.2.a. pode-se visualizar o fluxo de calor adimensional na superfície de projeto referente à configuração representada na Figura 5.1.b. Essa solução foi obtida pelo método inverso dentre dez repetições independentes e o fluxo de calor adimensional da configuração se encontra próxima à condição prescrita, $Q_{DS} = -0,277$, já que a média do desvio definido pela Eq. (4.16) é de 6,19%. Contudo podem-se visualizar picos onde o desvio máximo, calculado pela Eq. (4.17) chega a 26,53%.

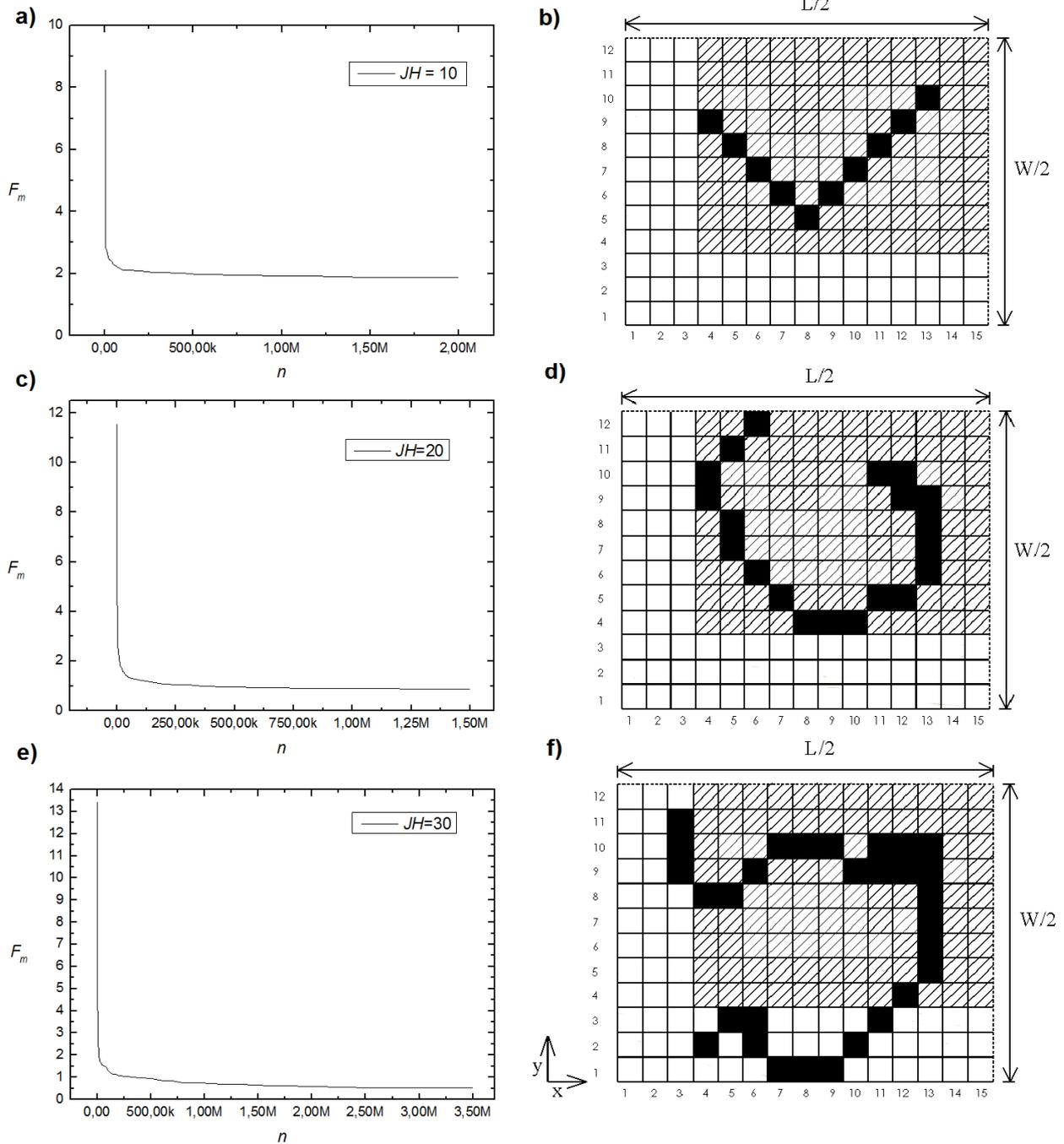


Figura 5.1 – A esquerda visualiza-se as curvas de análise da média das funções objetivo, F_m , para dez repetições independentes, pelo número de avaliações da função o objetivo, n . A direita as respectivas configurações encontradas pelo método inverso em cada caso $JH = 10$, $JH = 20$ e $JH = 30$.

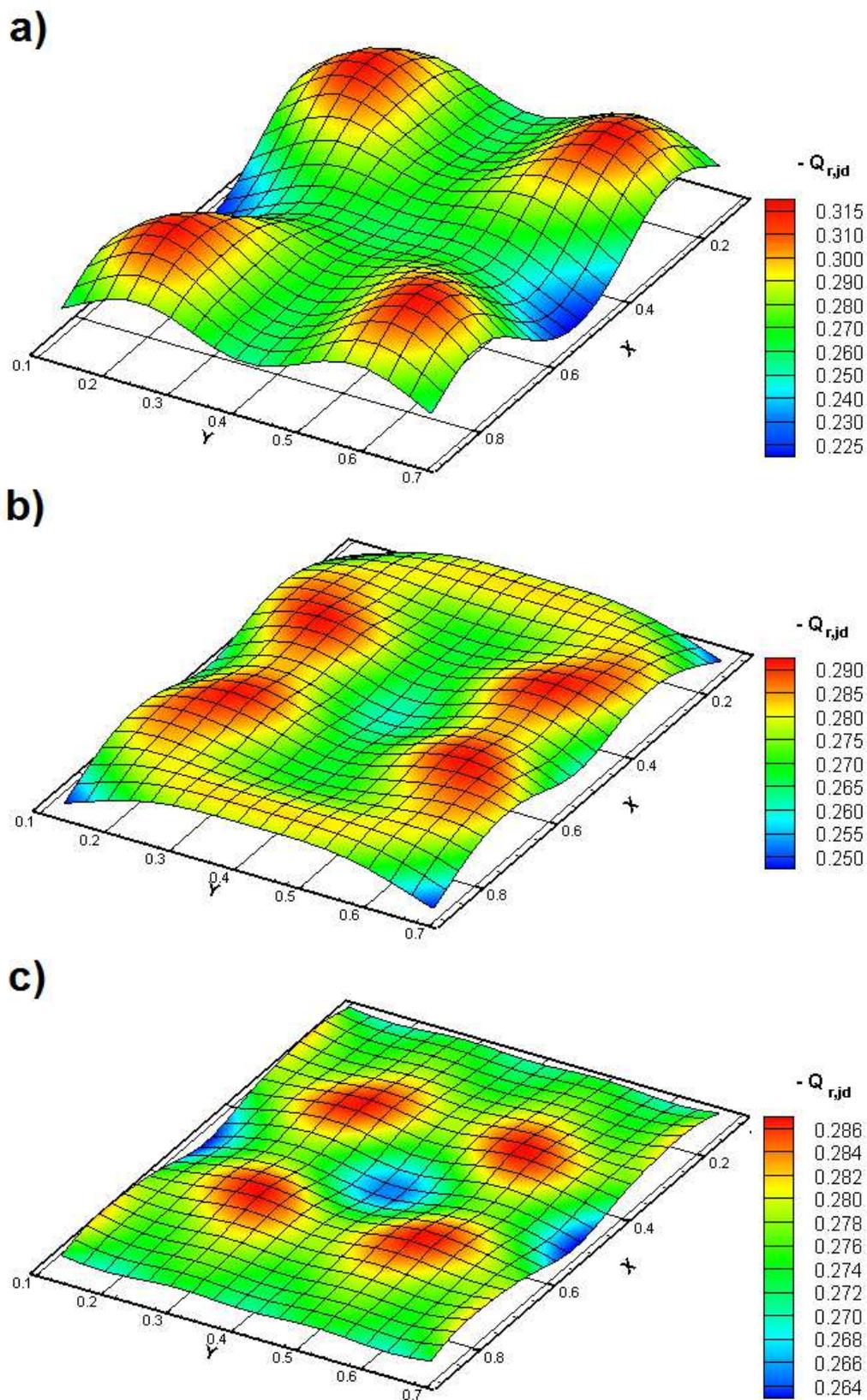


Figura 5.2 – Distribuição do fluxo de calor ao longo da superfície de projeto para as configurações dos elementos aquecedores representadas na Figura 5.1, respectivamente para $JH = 10$, $JH = 20$ e $JH = 30$.

5.2 Filamento com Vinte Elementos Aquecedores

No caso em que o filamento é representado por vinte elementos ($JH=20$), tem-se $Q_{r,jh} = 1,496$, como valor para o fluxo de calor adimensional em cada elemento aquecedor, também apresentado na Tabela 5.1. Como esperado a função objetivo decresce continuamente com o número de avaliações n , e pode ser visualizada na Figura 5.1.c. Estabeleceu-se como critério de parada do algoritmo GEO o número de 1,5 milhões de avaliações ($n=1500000$). Nas primeiras 900 mil avaliações da função objetivo ocorre um expressivo decaimento da média da função objetivo e tendo em vista que mais avaliações não reduzem significativamente o valor da função objetivo, determina-se que o valor de 900 mil avaliações permanece como o ponto para obtenção da configuração do aquecedor.

O método indica como solução a configuração do aquecedor tipo filamento representado na Figura 5.1.d e coordenadas apresentadas na Tabela III,1 do apêndice para um filamento modelado com vinte elementos aquecedores ($JH=20$) posicionado no plano superior da cavidade radiante retangular com fluxo de calor e temperatura uniformes na superfície de projeto. Essa geometria em formato similar à letra “G” inclinado, poderia ser aproximada por alguns pequenos segmentos de reta, conforme representado na Figura IV.b do apêndice.

Na Figura 5.2.b. pode-se visualizar o fluxo de calor adimensional na superfície de projeto, referente a configuração representada na Figura 5.1.d. Essa solução foi obtida pelo método inverso dentre dez repetições independentes e o fluxo de calor adimensional da configuração se encontra próxima a condição prescrita, $Q_{DS} = -0,277$, já que a média do desvio definido pela Eqs.(4.16) é de 2,44% contudo pode-se visualizar picos onde o desvio máximo, calculado pela Eq. (4.17) chega a 12,34%.

5.3 Filamento com Trinta Elementos Aquecedores

No caso em que o filamento é representado por trinta elementos ($JH=30$), tem-se $Q_{r,jh} = 0,998$ o fluxo de calor adimensional para cada elemento aquecedor, também apresentado na Tabela 5.1. Como esperado a função objetivo decresce continuamente com o número de avaliações n , e pode ser visualizada na Figura 5.1.e. Estabeleceu-se como critério de parada do algoritmo GEO o número de 3,5 milhões de avaliações ($n= 3500160$). Nas primeiras 2,5 milhões de avaliações da função objetivo ocorre um expressivo decaimento da média da função objetivo e tendo em vista que mais avaliações não reduzem significativamente o valor da função objetivo, estabeleceu-se que o valor de 2,5 milhões de avaliações permanece como o ponto para obtenção da melhor configuração de aquecedor.

O método indica como solução a configuração do aquecedor tipo filamento representado na Figura 5.1.d f coordenadas apresentadas na Tabela III,1 do apêndice para um filamento modelado com trinta elementos aquecedores ($JH=20$) posicionado no plano superior da cavidade radiante retangular com fluxo de calor e temperatura uniformes na superfície de projeto. Essa geometria possui uma forma característica, porém não apresenta nenhuma complexidade construída. Se analisarmos a parte superior direita do aquecedor, nota-se uma necessidade de maior acúmulo de filamento, nessa região. Para que o sistema físico mantenha um resultado similar ao obtido na análise inversa pode-se fazer um ondulado com filamento (popularmente chamado de zigzag), conforme representado na Figura VI.1.b do apêndice.

Na Figura 5.2.b. pode-se visualizar o fluxo de calor adimensional na superfície de projeto, referente à configuração apresentada na Figura 5.1.f do filamento para as dez repetições independentes. Esse fluxo de calor adimensional da configuração se encontra próxima à condição prescrita, $Q_{DS} = -0,277$, já que a média do desvio definido pela Eq. (4.16) é 1,42% porém podem-se visualizar picos onde o desvio máximo, calculado pela Eq. (4.17) pode chegar a 5,82%.

Tabela 5.2 - Desvios do fluxo de calor adimensional das configurações dos filamentos aquecedores obtidos pela solução inversa em relação ao fluxo adimensional prescrito.

	$JH = 10$	$JH = 20$	$JH = 30$
Erro médio, γ_{avg} (%):	6,18	2,44	1,42
Erro máximo, γ_{max} (%):	26,53	12,34	5,82

6 CONCLUSÕES

Esse trabalho propôs o projeto de um forno radiante retangular tridimensional com superfícies cinza e difusas. Objetiva-se obter a configuração (forma geométrica e posição) dos aquecedores tipo filamento situados no plano superior partindo-se dos dados de entrada temperatura e fluxo de calor uniformes na superfície de projeto. Como alternativa à abordagem da tentativa e erro, utiliza-se o método de análise inversa a partir de uma formulação implícita que é resolvida com o auxílio do algoritmo de otimização GEO. As variáveis no domínio real que permitem o posicionamento dos elementos aquecedores quando discretizadas são restritas a posicionarem dentro da malha da cavidade e após o posicionamento do primeiro elemento aquecedor limita os aquecedores subseqüentes a posicionarem-se apenas na vizinhança desse elemento ainda respeitando a malha da cavidade.

São analisados três casos distintos, onde filamento foi modelado com dez, vinte e trinta elementos aquecedores e mantendo-se inalterado o número de elementos que formam a malha. Esses três casos representam dimensões proporcionais distintas do filamento em relação ao forno e trabalhos futuros podem estudar a modelagem do filamento com maior número de elementos aquecedores ou incluir um maior número de filamentos na cavidade. Na Figura 5.1 podem-se visualizar as configurações que mais se aproximaram das condições prescritas para os três modelos de aquecedores e na Figura IV.1 tem-se as mesmas configurações com uma representação do filamento aquecedor centrado ao longo dos elementos. Uma importante observação é que os elementos aquecedores, embora restritos a se posicionarem na vizinhança do elemento aquecedor anterior não possuem restrições quanto a ocuparem a mesma posição de outro elemento aquecedor. Provavelmente essa não é uma boa configuração tendo em vista que esse posicionamento não ocorre em nenhuma das soluções resultantes desse trabalho. Isto indica como verdadeira uma análise intuitiva de que quanto melhor espalhados estiverem os elementos aquecedores, melhor será a distribuição do fluxo de calor.

O método indicou formas geométricas que podem ser aproximadas para geometrias reais e manteve erros aceitáveis para o fluxo de calor - onde para o pior caso ($JH=10$) o erro médio não superou 6,2% e o máximo de 26,6% em relação ao prescrito. Conforme o filamento ocupa uma maior área (filamentos mais longos) na superfície superior do forno a solução tende a diminuir o erro, chegando a valores em que o desvio médio é de 1,42% e o desvio máximo é 5,82% para o caso em que o filamento foi modelado com trinta elementos aquecedores. Isso parece confirmar uma análise intuitiva, de que quando mais longo o filamento melhor será a distribuição do fluxo de calor. Contudo a análise inversa foi capaz de indicar como soluções para o filamento formas geométricas e respectiva localização com difícil determinação intuitiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. Pourshaghaghay; K. Pooladvand; F. Kowsary; K. Karimi-Zand; **“An inverse radiation boundary design problem for an enclosure filled with an emitting, absorbing, and scattering media”**, International Communications in Heat and Mass Transfer No. 33, 381–390, 2006.

Brittes, R.; França, F. H. R.; **“A hybrid inverse method for the thermal design of radiative heating systems”**, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012.

Cassol, F.; Schneider, P. S; França, F. H. R; Neto, A. J. S; **“Multi-objective optimization as new approach to illumination design of interior spaces”**, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010.

Colaço, Marcelo J.; Orlande, Helcio R. B.; Dulikravich, George S.; **“Inverse and Optimization Problems in Heat Transfer”**, J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng, Vol. XXVIII, 2006.

Daun, Kyle; França, F. H. R; Larsen, Marvin; Leduc, Guillaume; Howell, John R.; **“Comparison of Methods for Inverse Design of Radiant Enclosures”**, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006

De Sousa, F.L.; Ramos, F.M.; Paglione, P.; Girardi, R.M.; **“New stochastic algorithm for design optimization”**, AIAA Journal, 2003.

. Ertürk, Hakan; Ezekoye, Ofodike A.; Howell, John R.; **“Comparison of three regularized solution techniques in a three-dimensional inverse radiation problem”**, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 73, pp. 307–316, 2002,.

França H. R. Francis; Ezekoye, Ofodike A.; John R. Howell; **“Inverse Boundary Design Combining Radiation and Convection Heat Transfer”**, Journal of Heat Transfer, Vol. 123, 2001.

Hartnett J. P. ; Irvine, T. F. Jr.; Cho, Y. I.; Greene, G. A.; **“Advances in Heat Transfer”**, - Advances in Heat Transfer - Thomas F. Irvine , JR Memorial Volume, vol 36, 2002.

Howell, J. R.; Ezekoye, O. A.; Morales ,J. C.; **“Inverse Design Model for Radiative Heat Transfer”**, Journal of heat transfer Vol. 122, 2000.

Li, H. I.; Yang, Y, C; **“A genetic algorithm for inverse radiation problems”** International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006.

Mehraban, S.; Sarvari, S.M.H; Farahat, S.; **“Quasi-Steady Method For Inverse Design And Control Of A Twodimensional Radiant Oven In Transient State”**, ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, 2008.

Safavinejad, Shigenao M. Ali; Mansouri, Seyed H.; Sakurai, Atsushi; **“Optimal Boundary Design od Radiant Enclosures Using Micro-Genetic Algorithm”**, Journal of Thermal Science and Technology, Vol.3 No.2, 2008.

Siegel, R., Howell, J.R.; **“Thermal Radiation Heat Transfer”**, 3th edition, New York, pp. 207-248, 2002.

APÊNDICE I

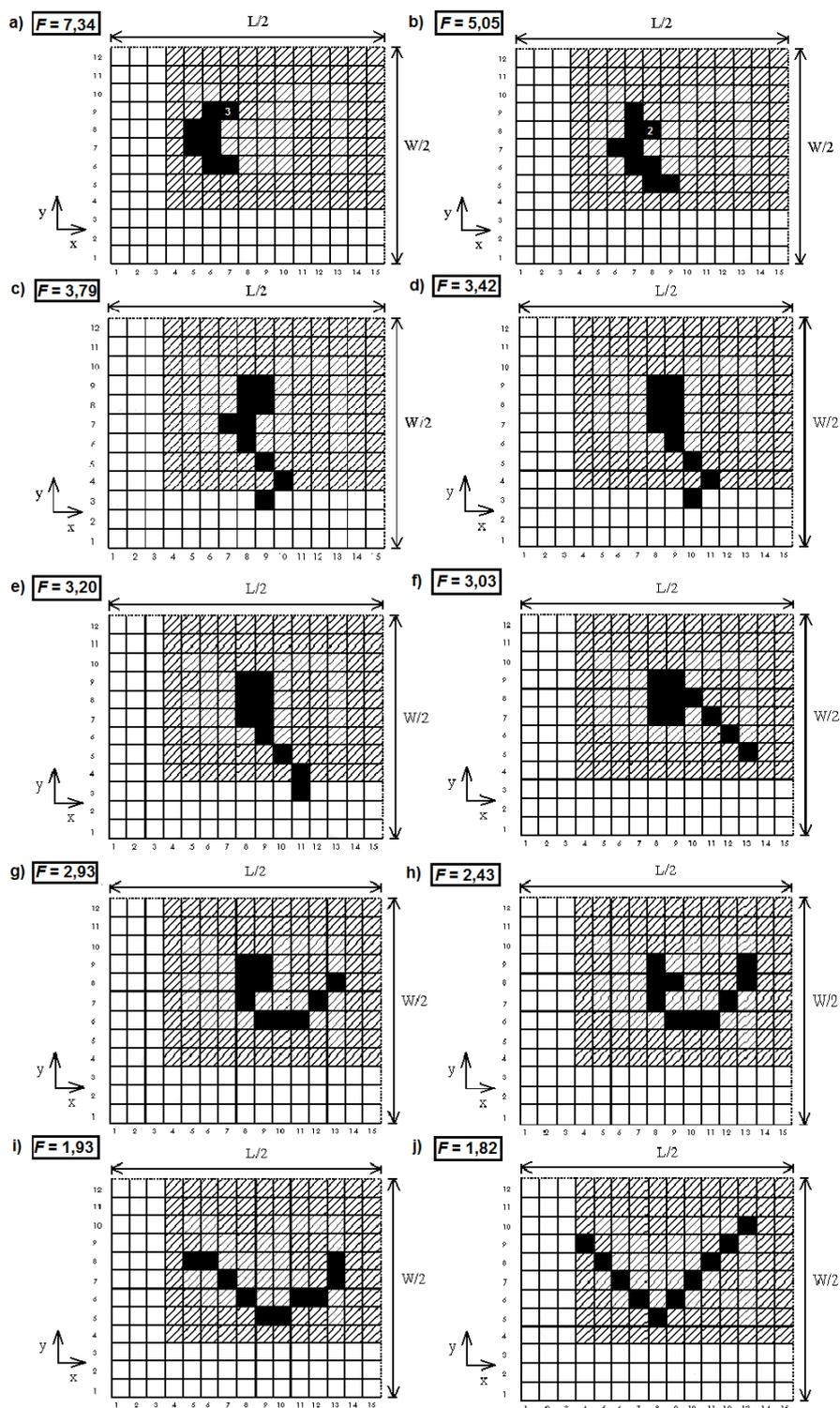


Figura I.1 – Evolução da configuração dos elementos aquecedores de acordo com o decaimento do valor da função objetivo, F , para uma das repetições do caso de $JH=10$. No posicionamento “a” o número 3 indica três aquecedores na mesma posição e no posicionamento “b” o número 2 indica dois aquecedores na mesma posição.

APÊNDICE II

Distribuição das 10 repetições independentes para o caso do filamento com $JH=10$

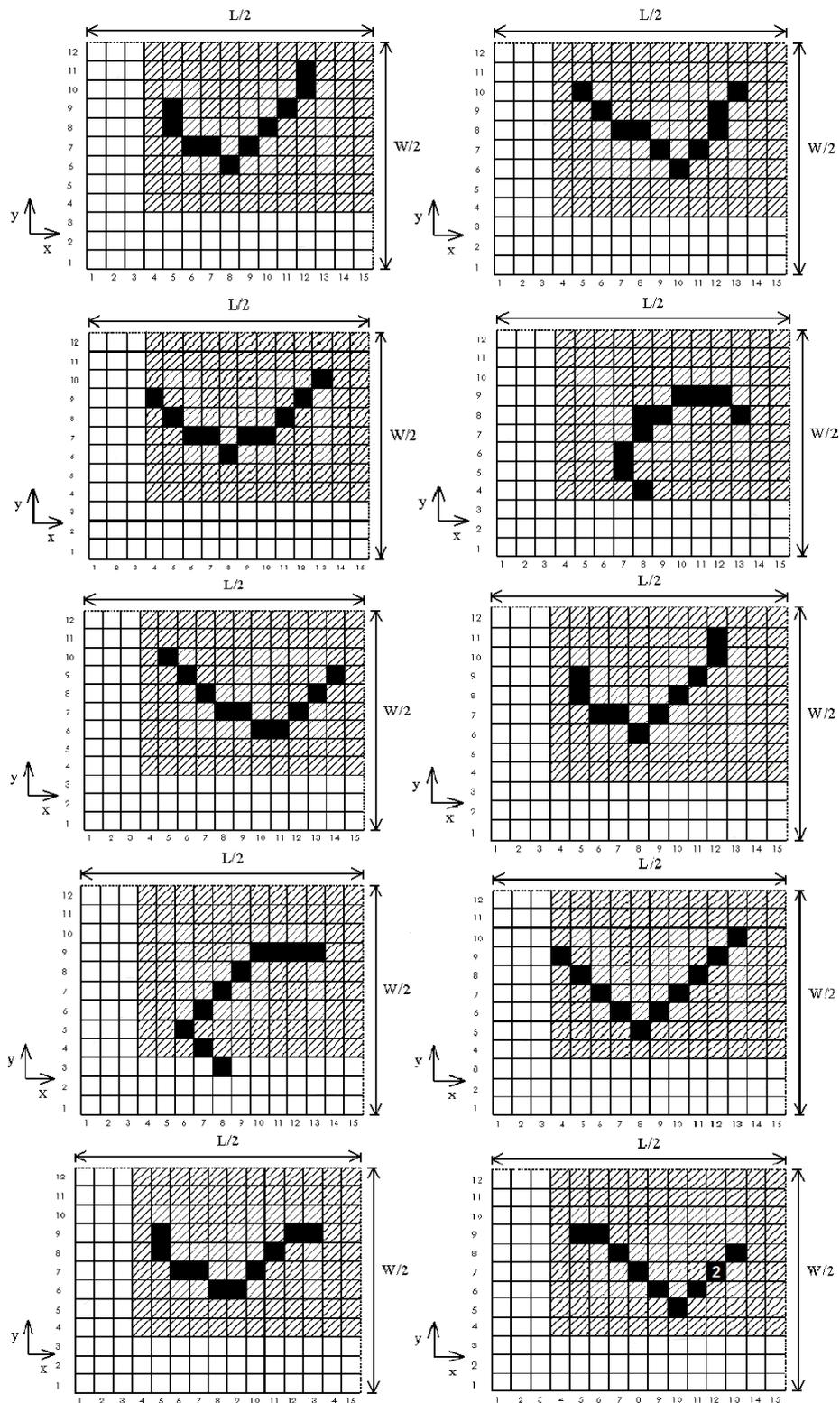


Figura II.1 – Representação das 10 soluções independentes para o caso onde o filamento foi modelado com 10 elementos aquecedores.

APÊNDICE III

Tabela III.1 – Pontos das soluções referente a 10, 20 e 30 elementos aquecedores

Pontos das Configurações Propostas						
Número do Elemento Aquecedor	10 Elementos Aquecedores (JH=10)		20 Elementos Aquecedores (JH=20)		30 Elementos Aquecedores (JH=30)	
	(x)	(y)	(x)	(y)	(x)	(y)
1	4	9	13	9	4	2
2	5	8	12	10	5	3
3	6	7	11	10	6	3
4	7	6	12	9	6	2
5	8	5	13	8	7	1
6	9	6	13	7	8	1
7	10	7	13	6	9	1
8	11	8	12	5	10	2
9	12	9	11	5	11	3
10	13	10	10	4	12	4
11			9	4	13	5
12			8	4	13	6
13			7	5	13	7
14			6	6	13	8
15			5	7	13	9
16			5	8	12	9
17			4	9	13	10
18			4	10	12	10
19			5	11	11	10
20			6	12	11	9
21					10	9
22					9	10
23					8	10
24					7	10
25					6	9
26					5	8
27					4	8
28					3	9
29					3	10
30					3	11

