

TIAGO CHAVES MELLO

ELABORAÇÃO DE UM MÉTODO DE SOLUÇÃO PARA A ILUMINAÇÃO
UNIFORME DE UMA SUPERFÍCIE VISANDO O PROJETO
DE UM SIMULADOR SOLAR

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.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre
2010



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

ELABORAÇÃO DE UM MÉTODO DE SOLUÇÃO PARA A ILUMINAÇÃO
UNIFORME DE UMA SUPERFÍCIE VISANDO O PROJETO
DE UM SIMULADOR SOLAR

TIAGO CHAVES MELLO

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

Prof. José Gerbase Filho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey
UFRGS / DEMEC

Prof^a. Dr^a. Adriane Prisco Petry
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre
2010

MELLO, T. C. **Desenvolvimento de um Método de Solução para a Iluminação Uniforme de uma Superfície Visando o Projeto de um Simulador Solar.** 2010. 24f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RESUMO

Um fator determinante no desempenho de um simulador solar é a capacidade de gerar uma superfície homogênea de iluminação na superfície trabalhada. Quando uma superfície luminosa, no caso a lâmpada, é posta muito próxima de uma superfície, surgem nesta superfície, uma região de maior intensidade no centro e regiões secundárias de menor intensidade à medida que se afasta do centro. Quando se utiliza mais de uma lâmpada postas lado a lado, as regiões de cada lâmpada se sobrepõem e as intensidades se somam nestes locais. Através deste conceito, pode-se buscar um posicionamento ideal para um determinado número de lâmpadas a fim de iluminar a superfície o mais uniforme possível. Com esse objetivo, dois métodos de solução são utilizados a fim de obter o melhor posicionamento das lâmpadas sobre a superfície. Um dos métodos é baseado em um processo de força bruta, na qual simplesmente posiciona as lâmpadas em todas as posições possíveis na matriz. O outro método proposto consiste em um algoritmo genético que, através de processos de reprodução e mutação, convergem para um resultado. Ambos os métodos de abordagem tem suas soluções comparadas e analisadas. O método de força bruta apresenta melhor desempenho para matrizes pequenas e com poucas lâmpadas, mas é inviável na aplicação de casos reais mais complexos devido ao esforço computacional associado. O algoritmo genético apresenta bons resultados, quando comparado com o método de força bruta, além de resolver casos mais complexos com matrizes maiores, além de não limitar-se a um número fixo de lâmpadas.

PALAVRAS-CHAVE: Simulador Solar, Radiação Solar, Força Bruta, Algoritmo Genético

MELLO, T. C. Development of a Method of Solution for Uniform Illumination of a Surface Aiming Design of a Solar Simulator. 2010. 24f.. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ABSTRACT

A key factor in the performance of a solar simulator is the ability to generate a homogeneous surface of lighting on work surface. When a luminous surface, the lamp in this case, is placed very close to a surface, appear in this surface, a region of greater intensity in the middle and secondary regions of lower intensity as it moves away from the center. When using more than one lamp set side by side, the zones overlap each lamp and the intensities are added at these locations. Through this concept, we can get an ideal position for a number of lamps to illuminate the surface as even as possible. With this purpose, two solution methods are used to obtain the best positioning of the lamps on the surface. One method is based on a process of brute force, which simply places the bulbs in all possible positions in the array. The other proposed method consists of a genetic algorithm that through reproduction and mutation, converge to a result. Both methods of approach have its solutions compared and analyzed.

The brute force method shows better performance for small arrays with few lights, but is unworkable in real application cases, more complex due to the associated computational effort. The genetic algorithm yields good results if compared with the brute force method, and solve more complex cases with larger arrays, and is not limited to fixed number of lamps.

KEYWORDS: Solar Simulator, Solar Radiation, Brute Force, Genetic Algorithm

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
3.1. EMISSÃO RADIANTE	2
3.2. O Ângulo Sólido.....	3
3.3. Taxa de Energia Radiante	3
3.4. Transferência radiante entre superfícies.....	4
3.4.1. O Fator de Forma.....	4
4. METODOLOGIA.....	5
4.1. Generalidades	5
4.2. Cálculo da radiação.....	5
4.2.1. Fator de forma	6
4.3. ALGORITMO DE FORÇA BRUTA.....	7
4.3.1. Visão geral.....	7
4.4. ALGORITMO GENÉTICO.....	7
4.4.1. Generalidades	7
4.4.2. O algoritmo genético	7
5. RESULTADOS E ANÁLISES	9
5.1. CASO 1 – VERIFICAÇÃO DA MATRIZ DE RADIAÇÃO.....	9
5.2. CASO 2 – VERIFICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO	10
5.2.1. Influência do número de indivíduos da população inicial.....	11
5.2.2. Influência do número de gerações	11
5.2.3. Influência da taxa de mutação	12
5.3. CASO 3 – ALGORITMO GENÉTICO E FORÇA BRUTA.....	13
5.3.1. Força bruta.....	14
5.3.2. Algoritmo genético.....	14
6. CONCLUSÕES.....	15
7. REFERÊNCIAS	16
8. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	16
APÊNDICE	17

1. INTRODUÇÃO

O trabalho consiste no desenvolvimento de método com o objetivo de posicionar um determinado número de lâmpadas em um plano paralelo ao plano de uma superfície a ser iluminada. O objetivo é desenvolver um simulador solar para testes em células solares. Sem tal equipamento, o usuário depende diretamente das condições climáticas e não tem a possibilidade de ajustes na intensidade da irradiação luminosa a fim de testar diversos ambientes. Vis-to isso, torna-se vantajoso o investimento para adquirir o simulador, que permite testes no interior do laboratório, possibilitam o ajuste fino das condições de teste não dependendo das condições climáticas.

Um dos fatores importantes para o dimensionamento de um simulador solar é a uniformidade da irradiação luminosa que atinge a superfície a ser utilizada. Para tanto, são utilizados conceitos de trocas de calor entre superfícies e fatores de forma.

Com objetivo de atingir essa uniformidade, dois métodos computacionais são desenvolvidos e comparados a fim de obter um bom resultado final: algoritmo genético e força bruta. Ambas as abordagens são desenvolvidas em linguagem C.

A primeira abordagem, o algoritmo genético, constitui uma técnica de busca e otimização inspirada no princípio Darwiniano de seleção natural e reprodução genética. Os princípios da natureza nos quais os algoritmos genéticos se inspiram são simples. De acordo com a teoria de C. Darwin, o princípio de seleção privilegia os indivíduos mais aptos com maior longevidade e, portanto, com maior probabilidade de reprodução. Indivíduos com mais descendentes têm mais chances de perpetuarem seus códigos genéticos nas próximas gerações. Tais códigos genéticos constituem a identidade de cada indivíduo e estão representados nos cromossomas. Estes princípios são imitados na construção de algoritmos computacionais que buscam uma melhor solução para um determinado problema, através da evolução de populações de soluções codificadas através de cromossomas artificiais. Em algoritmos genéticos um cromossoma é uma estrutura de dados que representa uma das possíveis soluções do espaço de busca do problema. Cromossomas são então submetidos a um processo evolucionário que envolve avaliação, seleção, recombinação e mutação. Após vários ciclos de evolução a população deverá conter indivíduos mais aptos.

O método de força bruta é mais simples que o de algoritmos genéticos. Para o caso estudado, consiste basicamente em colocar as lâmpadas em todas as posições possíveis e mostrar o melhor resultado. Esse método apresenta algumas vantagens e algumas desvantagens com relação ao algoritmo genético. Comparações entre os métodos são abordados no trabalho.

Através da aplicação desses métodos, comparação e análise dos resultados, espera-se determinar a quantidade e a distribuição visando alcançar a melhor uniformidade do fluxo radiante sobre a superfície.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura relacionada ao tema da pesquisa. A pesquisa bibliográfica é desenvolvida em ordem cronológica, destacando diversos aspectos relativos à construção de um simulador solar, com o objetivo de caracterizar a evolução da pesquisa nesse assunto.

Segundo CODD (2010), um simulador de baixo custo e alto fluxo com grande área solar é feito, construído e caracterizado com a finalidade de estudar o comportamento da fusão óptica e a absorção da luz de sais fundidos. Sete lâmpadas de estádio, de iodetos metálicos, com 1500 W são utilizadas como fonte de luz para simular a concentração da energia solar. Lâmpadas de iodetos metálicos e reatores são muito mais baratos por watt do que as típicas fontes de luz de simuladores solares com lâmpadas em arco de xenon. Eles fornecem uma compara-

ção satisfatória à luz solar natural, embora lâmpadas de iodetos metálicos "não filtradas" têm picos de irradiância entre 800 e 1000 nm, o que representa um adicional de 5% da produção de energia medida em relação à radiação solar terrestre sobre o mesmo intervalo. Com o uso de um concentrador cônico secundário, os fluxos de saída de aproximadamente 60 kW/m^2 (60 sóis) e 45 kW/m^2 (45 sóis) em média são atingidos através de uma abertura de saída com 38 cm de diâmetro. Exclusivo para o projeto do simulador, o ângulo de inclinação e a distância entre a abertura de saída ao solo são ajustáveis para acomodar receptores de teste com geometria variável. Desconsiderando a parte estrutural, a iluminação e os componentes elétricos mantêm o custo de fabricação abaixo de dez mil dólares.

Já NAGAMINE (1993), desenvolve um novo simulador solar baseado no método complementar de luz para medição do desempenho da união de várias células solares. Ele é projetado para fazer uso da luz estável, com boa uniformidade e boa simulação espectral através da única lâmpada xenon utilizada atualmente no simulador solar. A distribuição espectral do novo simulador solar pode ser ajustada pela adição das luzes variáveis complementares a luz principal, e é utilizado para determinar a eficiência de conversão da união de duas ou três camadas de células solares.

Um simulador solar de fonte dupla provém uma maior precisão e alta fidelidade espectral frente ao espectro solar *Air Mass Zero* (AM0) quando comparado aos simuladores solares convencionais disponíveis, segundo KILMER (1994). O simulador solar de fonte dupla combina a luz ultravioleta (UV) de uma lâmpada xenon e a luz infravermelha (IR) de uma lâmpada de tungstênio. Entretanto, filtros adicionais foram necessários para igualar a fonte dupla e o espectro AM0. Foi determinado que a função transmissão necessária não pôde ser encontrada com um filtro simples, mas filtros individuais para cada fonte eram necessários. Um filtro de vidro de cor padrão foi escolhido para modificar a formato do espectro do xenon UV e para reduzir a magnitude dos pontos de alta intensidade nos comprimentos de onda visíveis e infravermelho. Um filtro de filme fino customizado foi projetado para igualar a função de transmissão necessária das porções visível e infravermelha da lâmpada de tungstênio. Combinado, o espectro filtrado fornece uma maior precisão na distribuição espectral e na energia integral igualando ao espectro AM0 sobre toda a faixa de comprimento de onda enquanto remove completamente os pontos comuns de alta intensidade da lâmpada xenon. O projeto é apresentado pela comparação com simuladores solares convencionais, identificando as limitações impostas pela presença de pontos no espectro da lâmpada xenon, analisando cada componente separadamente do projeto e seus impactos no sistema, e concluindo com opções adicionais ou variações que devem impor a faixa de precisão do simulador solar de fonte dupla.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. EMISSÃO RADIANTE

Segundo INCROPERA (1998), o mecanismo da emissão está relacionado à energia liberada como resultado de oscilações ou transições dos muitos elétrons que constituem a matéria. Essas oscilações são, por sua vez, sustentadas pela energia interna e, portanto pela temperatura da matéria. A emissão é um fenômeno volumétrico, isto é, a radiação que emerge de um volume finito de matéria corresponde ao efeito integrado da emissão local ao longo de todo o volume. Entretanto, a radiação pode ser considerada um fenômeno de superfície, pois a radiação emitida pelas moléculas no interior de um volume é absorvida pelas moléculas adjacentes e, portanto, a radiação emitida por um sólido ou por um líquido tem sua origem nas moléculas que se encontram a aproximadamente $1 \mu\text{m}$ de sua superfície exposta.

A radiação pode ser vista como a propagação de um conjunto de partículas conhecidas como fótons ou quanta. Por outro lado, pode-se considerar a radiação como a propagação de

ondas eletromagnéticas. Em qualquer caso, atribui-se a radiação as propriedades específicas de uma onda: frequência ν e comprimento de onda λ . Essas duas propriedades estão relacionadas de acordo com a Equação (3.1).

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (3.1)$$

onde c é a velocidade da luz no meio, no vácuo $c_0 = 2,998 \cdot 10^8$ m/s.

A fração intermediária do espectro, que se estende de 0,1 até 100 μm que inclui uma fração da região UV e todo o espectro visível e infravermelho, que é conhecida por radiação térmica e pertinente à transferência de calor.

A radiação emitida é formada por uma distribuição contínua e não uniforme de componentes monocromáticos (único comprimento de onda). Portanto, tanto a magnitude da radiação quanto a distribuição espectral variam de acordo com a natureza e a temperatura da superfície que emite a radiação. Complementarmente, uma superfície pode emitir preferencialmente em certas direções e, para quantificar a transferência de calor por radiação, deve-se ser capaz de tratar efeitos espectrais e direcionais.

3.2. O ÂNGULO SÓLIDO

Considerando uma direção particular a partir de um elemento de área dA_1 , essa pode ser especificada em termos dos ângulo zênite e azimutal, θ e ϕ , respectivamente, em um sistema de coordenadas esféricas. Uma superfície diferencial no espaço, dA_n , onde essa radiação passa, compreende um ângulo sólido $d\omega$ quando vista de um ponto sobre dA_1 .

Dessa forma, o ângulo sólido $d\omega$ é definido por uma região entre os raios de uma esfera e é medido pela razão entre o elemento de área dA_n sobre a esfera e o quadrado do seu raio r , conforme a Equação (3.2), medido em unidades de esterorradiano (sr).

$$d\omega \equiv \frac{dA_n}{r^2} \quad (3.2)$$

A área dA_n é normal a direção (θ, ϕ) e pode ser representada por $dA_n = r^2 \sin\theta d\theta d\phi$ para uma superfície esférica. Portanto, o ângulo sólido $d\omega$ pode ser obtido através da Equação (3.3).

$$d\omega = \sin\theta d\theta d\phi \quad (3.3)$$

3.3. TAXA DE ENERGIA RADIANTE

Define-se taxa de energia radiante $I_{\lambda,e}$, segundo INCROPERA (1998), como a taxa de energia radiante emitida com comprimento de onda λ na direção (θ, ϕ) por unidade de área da superfície emissora normal a essa direção, por unidade de ângulo sólido no entorno dessa direção, e por unidade de intervalo de comprimento de onda $d\lambda$ no entorno de λ .

Como a área utilizada para definir a intensidade é o componente de dA_1 normal a direção da radiação, conclui-se que a área projetada é igual a $dA_1 \cos\theta$. Portanto, a intensidade espectral $I_{\lambda,e}$ pode ser definida de acordo com a Equação (3.4).

$$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \equiv \frac{dq}{dA_1 \cos\theta \cdot d\omega \cdot d\lambda} \quad (3.4)$$

onde $dq/d\omega \equiv dq_\lambda$ é a taxa na qual a radiação passa por dA_n ao deixar dA_l .

Definindo $dq/d\lambda \equiv dq_\lambda$, pode-se rearranjar a Equação (3.4) de forma a encontrar a taxa de radiação dq_λ , conforme mostrado na Equação (3.5).

$$dq_\lambda = I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) dA_1 \cos\theta d\omega \quad (3.5)$$

onde dq_λ é taxa de radiação, em W/ μm .

3.4. TRANSFERÊNCIA RADIANTE ENTRE SUPERFÍCIES

3.4.1. O Fator de Forma

O fator de forma é a fração que deixa a superfície i e é interceptada pela superfície j , (INCROPERA, 1998). De acordo com a Equação (3.5), pode-se afirmar que a taxa na qual a radiação deixa uma área dA_i e é interceptada por uma segunda área dA_j pode ser definida pela Equação (3.6).

$$dq_{i \rightarrow j} = I_i dA_i \cos\theta_i d\omega_{j \rightarrow i} \quad (3.6)$$

onde I_i é a intensidade de radiação que deixa a superfície i , $d\omega$ o ângulo sólido subtendido por dA_j que é visto de dA_i . A partir da Equação (3.2), pode-se concluir que $d\omega_{j \rightarrow i} = \frac{\cos\theta_j dA_j}{r^2}$. Substituindo esse resultado na Equação (3.6) e considerando que a superfície i emite e reflete de forma difusa, chega-se a expressão indicada pela Equação (3.7).

$$dq_{i \rightarrow j} = J_i \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad (3.7)$$

onde J_i é a radiosidade, em W/m². A taxa total de radiação que deixa a superfície i e é interceptada por j pode então ser obtida pela integração ao longo das duas superfícies, como representado na Equação (3.8).

$$dq_{i \rightarrow j} = J_i \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad (3.8)$$

Levando em consideração que o fator de forma é a fração de radiação que deixa A_i e é interceptada por A_j , ou seja, $F_{ij} = q_{i \rightarrow j}/A_i J_i$ e considerando a radiosidade uniforme ao longo da superfície A_i , pode-se chegar a equação para o fator de forma, representada pela Equação (3.9).

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad (3.9)$$

A Equação (3.9) é válida desde que se considere que as superfícies emissoras e refletoras sejam difusas e possuam radiosidade uniforme.

4. METODOLOGIA

4.1. GENERALIDADES

A placa onde será incidida a iluminação é discretizada em quadrados, Figura 4.1, e, portanto, toma a forma de uma matriz. Para o centro de cada quadrado, cujas dimensões dependem do tamanho da matriz, é obtido um valor para a radiação que chega à superfície.

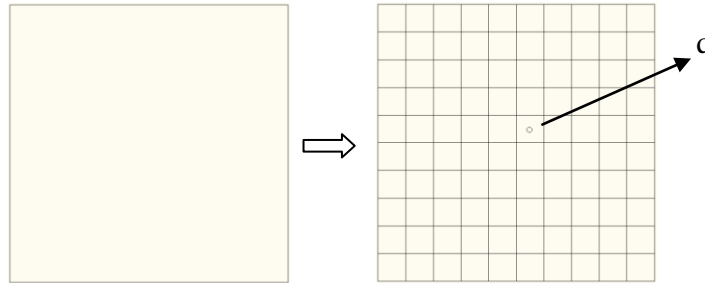


Figura 4.1 Discretização da superfície iluminada em quadrados

Cada elemento da matriz indica a existência de uma lâmpada, ou não, no ponto da placa representada pelo elemento. No caso da existência de uma lâmpada na posição do elemento, este tem seu valor atribuído como 1 (um). No caso de não existir uma lâmpada na posição do elemento, este tem seu valor atribuído como 0 (zero). Portanto, o indivíduo é representado por uma matriz composta de zeros e uns; e cada indivíduo da população é diferenciado um dos outros pelo posicionamento das lâmpadas na matriz, ou seja, pelo posicionamento sobre a superfície. Outro fator de diferenciação é a quantidade de lâmpadas que cada indivíduo é composto.

4.2. CÁLCULO DA RADIAÇÃO

Para analisar a população é preciso obter a radiação incidente na placa. Para isso, utiliza-se os conceitos de troca radiante a fim de obter a radiação que chega até uma superfície, ou seja, a placa, a partir de uma outra superfície, a lâmpada.

Ao colocar uma lâmpada próxima a uma superfície, verifica-se nesta que a iluminação incide em uma região circular principal concêntrica a superfície da lâmpada e, em torno desta, outra região anelar concêntrica a primeira sendo que, nessa região, a iluminação varia sua intensidade com máximo na periferia da região circular diminuindo a medida que se afasta. Essa diminuição de intensidade verifica a necessidade do uso de anéis a fim de obter um resultado mais próximo do real, como apresentado na Figura 4.2.

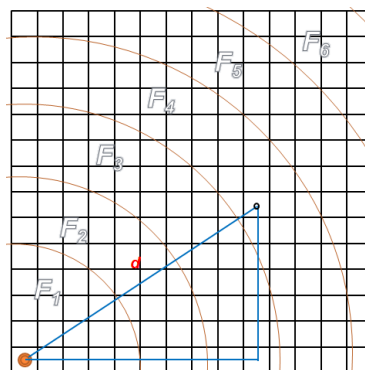


Figura 4.2 Região circular principal e anéis secundários

A área circular principal tem seu raio definido pelo usuário assim como a quantidade de anéis desejada. É calculada então a emissão radiante para cada elemento da matriz e, para tanto, é identificado em que anel o centro do elemento está localizado sendo aplicado o fator de forma do anel correspondente.

No caso estudado, é utilizada a Equação (4.1) para obter a emissão radiante da superfície da lâmpada e a superfície da placa.

$$q = \sigma \varepsilon A_1 F_i T^4 \quad (4.1)$$

onde q é radiação que incide sobre a superfície da placa, em W, σ a constante de Stefan-Boltzmann, ou seja, $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^2 \cdot \text{K}^{-4}$, ε é emissividade da superfície emissora, A_1 a área da superfície emissora (da lâmpada), em m^2 , F_i o fator de forma e T a temperatura da superfície emissora (da lâmpada), em Kelvin.

Após obter a radiação incidente sobre todos os elementos da matriz, é obtido o desvio padrão s da matriz de radiação, Equação (4.2), a fim de determinar a qualidade do resultado.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

onde n é o número de elementos da matriz, \bar{x} é a média dos elementos da matriz, em W e x_i é o valor de cada elemento, em W.

A incidência de radiação emitida de A_1 que atinge a superfície da placa difere somente quanto ao fator de forma, pois este muda para a superfície circular principal e para os demais anéis. A temperatura T varia de acordo com a potência da lâmpada e é gerada de forma aleatória na população inicial. Essa variável pode ter seu valor alterado através do processo de mutação.

4.2.1. Fator de forma

A área da superfície emissora será aproximada como sendo a área da seção do bojo na qual estão instaladas. Como essas são sempre circulares (devido à disponibilidade de mercado), serão utilizados dois fatores de forma diferentes: de uma área circular para outra área circular concêntrica e de uma área circular para um anel circular concêntrico.

Segundo HOWELL (2010), o fator de forma para a área circular é o representado pela Equação (4.3).

$$F_1 = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{\left(1 + \left(\frac{r_2}{a}\right)^2\right)}{\left(\frac{r_1}{a}\right)^2} - \left[\left(1 + \frac{\left(1 + \left(\frac{r_2}{a}\right)^2\right)}{\left(\frac{r_1}{a}\right)^2}\right)^2 - 4 \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (4.3)$$

onde F_1 é o fator de forma da área circular, r_1 é o raio da superfície emissora, em m , e r_2 é o raio da área circular principal, em m .

Segundo HOWELL (2010), o fator de forma para a área anelar é o representado pela Equação (4.4).

$$F_i = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{r_3}{r_1} \right)^2 - \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - \left[\left(1 + \left(\frac{r_3}{r_1} \right)^2 + \left(\frac{a}{r_1} \right)^2 \right)^2 - 4 \left(\frac{r_3}{r_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[\left(1 + \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 + \left(\frac{a}{r_1} \right)^2 \right)^2 - 4 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (4.4)$$

onde F_i é o fator de forma do anel i , r_1 é o raio da superfície emissora, em m , r_2 é o raio interno do anel, em m , e r_3 é o raio externo do anel, em m .

4.3. ALGORITMO DE FORÇA BRUTA

4.3.1. Visão geral

O método de força bruta inicia o processo com as lâmpadas alinhadas como indicado na Figura 4.3. Então, é feito o cálculo da radiação incidida na placa e a matriz de radiação é montada. Após isso, o desvio padrão da matriz é calculado a partir da Equação (4.2) e, seu valor, assim como a matriz, são guardados para futura análise.

Como mostra a Figura 4.3, uma lâmpada é selecionada e é posta no próximo elemento da matriz. Então, novamente calcula-se o desvio padrão. Feito isso, o desvio padrão da nova matriz é comparado com a da matriz guardada anteriormente. Se este for maior que o anterior, a matriz é eliminada continuando guardados o desvio padrão e a matriz anterior. Caso contrário, a matriz anterior é eliminada e a nova passa a ser armazenada.

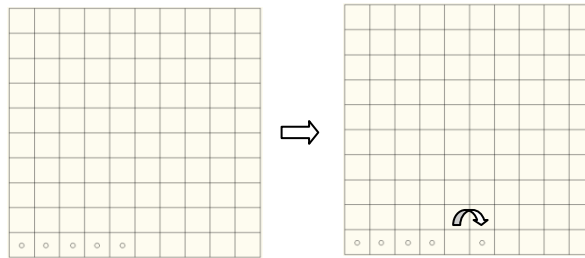


Figura 4.3 Procedimento de distribuição das lâmpadas

Dessa forma, a lâmpada continua a percorrer toda a matriz e, para cada nova posição, o desvio padrão é calculado e é comparado com a matriz guardada, ou seja, com a melhor solução encontrada até o momento.

O mesmo procedimento é feito até que todas as lâmpadas tenham ocupado todas as posições possíveis. Neste momento, é mostrada a última matriz de radiação armazenada, assim como a posição das lâmpadas na matriz e o desvio padrão da mesma.

4.4. ALGORITMO GENÉTICO

4.4.1. Generalidades

Colocando-se as linhas da matriz lado a lado tem-se um vetor de zeros e uns que, para este caso, representa o código genético do indivíduo. A geração da população de filhos será realizada através do processo de *crossover* utilizando os códigos genéticos dos indivíduos da população de pais.

4.4.2. O algoritmo genético

O algoritmo genético inicia o processo de obtenção de novas gerações através de uma população inicial, na qual o número de indivíduos é inserido pelo usuário. O posicionamento

das lâmpadas na matriz – o código genético de cada indivíduo – é gerado aleatoriamente através de funções randômicas.

Com a determinação da população inicial, os indivíduos são separados em grupos de dois e, através do processo de *crossover*, é gerado dois indivíduos filhos. Os novos indivíduos gerados passam pelo processo de mutação.

Os indivíduos gerados e os indivíduos pais são unidos em um único grupo, a nova população. As matrizes que indicam o posicionamento das lâmpadas passam a mostrar o valor da radiação calculado para o centro de cada quadrado, ou seja, indicam o valor da radiação em cada elemento da matriz. Então, a fim de verificar a qualidade da matriz, é calculado o desvio padrão dos elementos da matriz. Fazendo este procedimento para todos os indivíduos é possível classificá-los em ordem crescente de desvio padrão. A fim de evitar a geração de super indivíduos, o melhor indivíduo de cada geração é excluído.

O processo de seleção dos melhores ocorre simplesmente eliminando a metade dos últimos indivíduos menos um (a fim de compensar a eliminação do melhor resultado). Esse critério de seleção, conhecido como elitismo, elimina os indivíduos menos adaptados, ou seja, aqueles que apresentam a menor homogeneidade na incidência da radiação (maiores desvios padrão).

Após a eliminação dos indivíduos menos adaptados, encerra-se o processo de uma geração. A população restante é novamente reagrupada em grupos de dois (de forma aleatória) a fim de gerar nos indivíduos filhos pelo processo de *crossover*.

O processo de crossover de um ponto baseia-se na escolha aleatória de um ponto de corte do código genético. Então separa-se o código genético em duas partes. A primeira parte de um é combinada com a segunda parte do outro; a primeira parte do outro é combinada com a segunda parte do primeiro. Desta forma, tem-se outros dois indivíduos chamados filhos.

No caso estudado, o código genético é a própria matriz de posicionamento das lâmpadas. O código genético binário é obtido alinhando-se todas as linhas da matriz posicionamento lado a lado. Os indivíduos da população de pais são agrupados em duplas e cada dupla irá gerar outros dois indivíduos filhos através do processo de crossover. Um ponto de corte é escolhido aleatoriamente e, então, gera-se um filho juntando a segunda parte de um com a primeira parte do outro; o segundo filho é gerado juntando-se a primeira parte do primeiro com a segunda parte do outro. Assim, obtém-se outros dois indivíduos diferentes dos pais. A Figura 4.4 ilustra o processo de *crossover*.

É possível que filhos sejam cópias exatas dos pais se o ponto de corte acontecer no início da matriz, antes do primeiro elemento, ou no final da matriz, após o último elemento.

Através da geração dos indivíduos filhos tem-se uma população total de $2N$ indivíduos, ou seja, N pais e N filhos.



Figura 4.4 Processo de *crossover*

Os indivíduos filhos, após o procedimento de crossover, mas ainda durante a geração, podem sofrer mutação, um processo importante para a diversidade genética dentro da população. No caso, é aplicada a mutação de substituição. Outros processos de mutação como adição

e eliminação não são aplicáveis, pois o código genético não pode ter seu número de elementos alterado.

O processo substituição consiste em adicionar uma ou mais lâmpadas à matriz (substituir algum 0 por 1) ou eliminar uma ou mais lâmpadas da matriz (substituir algum 1 por 0). Cada elemento do código tem uma porcentagem determinada de chances de ser substituído. Através desse procedimento, espera-se uma resposta que forneça o menor desvio padrão na matriz considerando a possibilidade de haver mais ou menos lâmpadas.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

5.1. CASO 1 – VERIFICAÇÃO DA MATRIZ DE RADIAÇÃO

Apesar de ambos os métodos de solução utilizarem princípios diferentes ao localizar um resultado, ambos utilizam o mesmo procedimento de cálculo da radiação e do desvio padrão. Da mesma forma quanto à formação dos anéis na matriz resultante.

Neste caso, as lâmpadas são postas manualmente a fim de verificar a matriz de resultados. Através desse caso simples, procura-se erros no cálculo da radiação irradiante ou na formação dos anéis.

Primeiramente, uma lâmpada é posta no centro de uma matriz de cem colunas por cem linhas, ou seja, no elemento $(x=50, y=50)$. O resultado é mostrado na Figura 5.1.

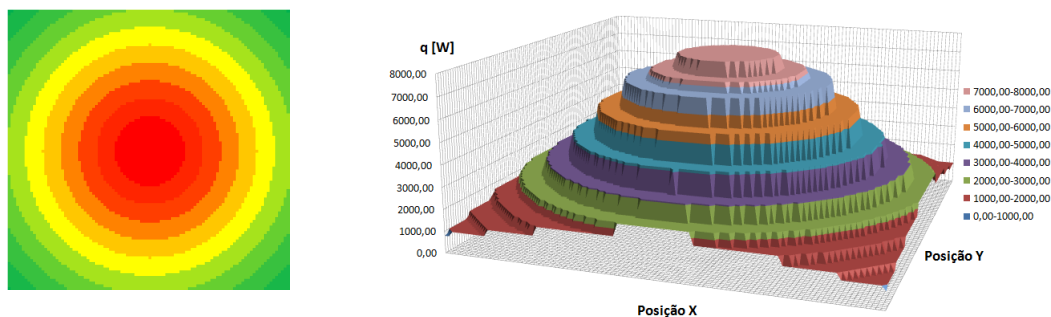


Figura 5.1 Matriz de radiação para uma lâmpada posicionada em seu centro

Como esperado, um círculo concêntrico a lâmpada de maior intensidade é formado e, concêntrico a este, são formados os anéis. A intensidade do anel mais interno é máxima, enquanto a intensidade do anel mais externo é mínima.

De forma similar, a lâmpada é reposicionada para a extremidade da matriz (no seu elemento $(x=0, y=0)$), Figura 5.2. Como esperado, é formado o círculo central e os vinte anéis. Os anéis são formados pela divisão do comprimento da diagonal subtraído do raio do círculo e dividido por vinte, como configurado inicialmente. Dessa forma, formam-se vinte anéis de igual espessura, cada um com seu fator de forma associado.

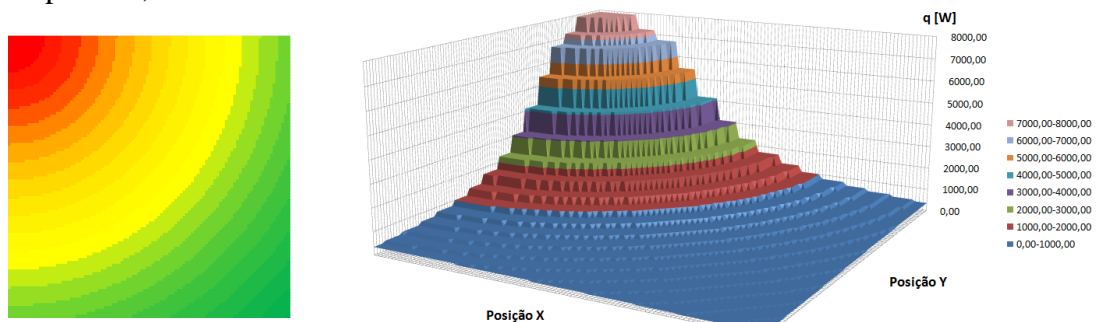


Figura 5.2 Matriz de radiação para uma lâmpada posicionada em uma extremidade

Com a formação dos anéis verificados, assim como o cálculo da radiação, é necessária a verificação da interação entre duas lâmpadas na mesma matriz. Para tanto, como mostra a Figura 5.3, duas lâmpadas são posicionadas na matriz de mesmo tamanho (cem colunas e cem linhas). A primeira lâmpada é posta no elemento ($x=50$, $y=30$) e a segunda lâmpada é posta no elemento ($x=50$, $y=60$).

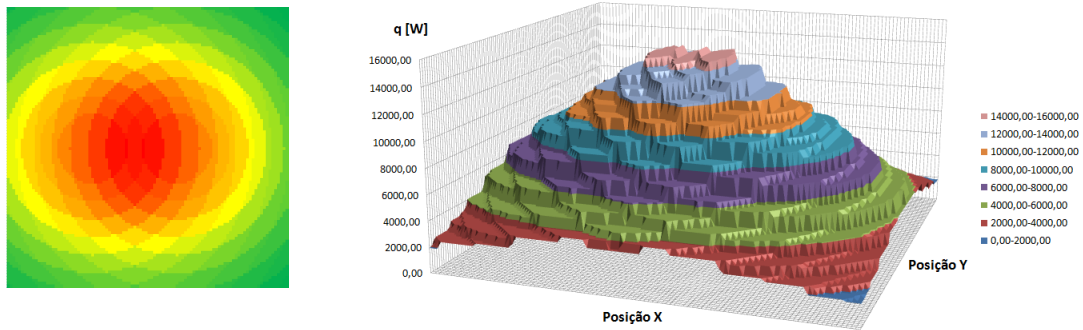


Figura 5.3 Matriz de radiação para duas lâmpadas

Como esperado, as duas lâmpadas tem suas contribuições somadas quando no mesmo elemento da matriz.

5.2. CASO 2 – VERIFICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO

Neste caso, o algoritmo genético é analisado através da qualidade dos dados fornecidos para um problema fazendo-se a variação de seus dados de entrada: a população inicial, o número de gerações e a taxa de mutação. A fim de realizar essa comparação nos resultados, primeiramente é considerada uma matriz de vinte linhas e vinte colunas com inicialmente 5 lâmpadas, uma população inicial de 100 indivíduos por 50 gerações com taxa de mutação de 1%. O resultado obtido está representado na Figura A.1 do Apêndice. É encontrado um desvio padrão de 1493,4 W e o resultado gerado posiciona as lâmpadas na matriz nas posições ($x=0$, $y=4$), ($x=0$, $y=17$), ($x=14$, $y=1$), ($x=14$, $y=18$) e ($x=17$, $y=19$). Graficando o desvio padrão encontrado do melhor indivíduo de cada geração pode-se observar a convergência do resultado. Isso é ilustrado na Figura 5.4.

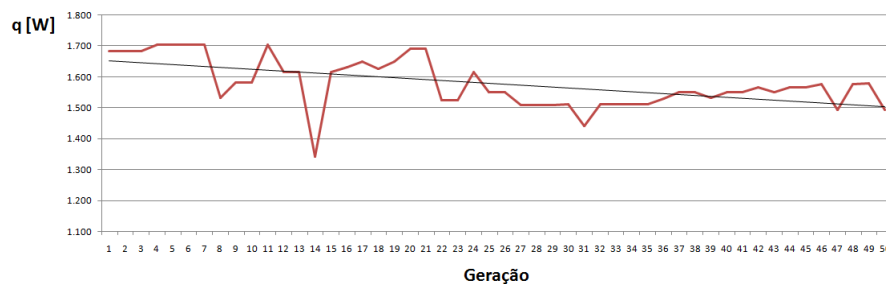


Figura 5.4 Desvio padrão da matriz de radiação através das gerações

Através da análise do gráfico apresentado na Figura 5.4, pode-se notar a convergência do desvio padrão a cada geração indicando que as características que minimizam o desvio padrão estão sendo passadas para os indivíduos das gerações seguintes. Obtido o resultado, o algoritmo tem seus dados de entrada alterados um por vez e, dessa forma é feita a comparação entre os novos resultados obtidos com o atual, tornando possível analisar a influência da alteração dos dados de entrada nos resultados obtidos.

5.2.1. Influência do número de indivíduos da população inicial

A fim de analisar a influência da variação do número de indivíduos da população inicial, os outros dados de entrada são mantidos iguais e a população inicial passa a ter 50 indivíduos. O resultado obtido está representado na Figura A.2 do Apêndice. O algoritmo gera a resposta posicionando as lâmpadas nas posições $(x=1, y=5)$, $(x=1, y=13)$, $(x=16, y=2)$, $(x=18, y=13)$ e $(x=18, y=18)$ apresentando um desvio padrão de 1578,9 W. A Figura 5.5 ilustra a convergência da matriz para um desvio padrão mínimo.

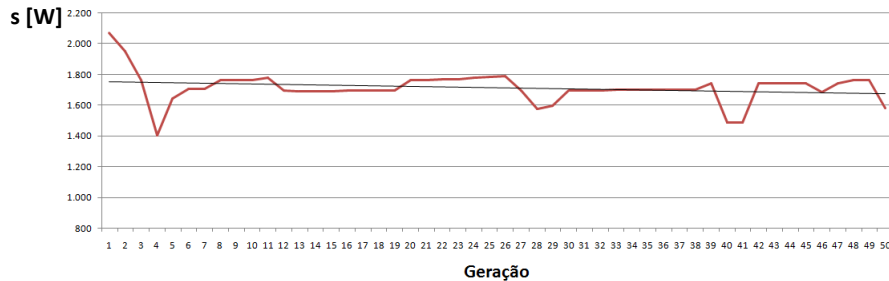


Figura 5.5 Desvio padrão da matriz de radiação aumentando a população

É gerado um resultado para uma população inicial de 200 indivíduos. O resultado é ilustrado na Figura A.3 do Apêndice. O algoritmo gera a resposta posicionando as lâmpadas nas posições $(x=1, y=19)$, $(x=2, y=6)$, $(x=12, y=4)$, $(x=17, y=19)$ e $(x=18, y=8)$ apresentando um desvio padrão de 1362,9 W. A Figura 5.6 ilustra a convergência da matriz para um desvio padrão mínimo.

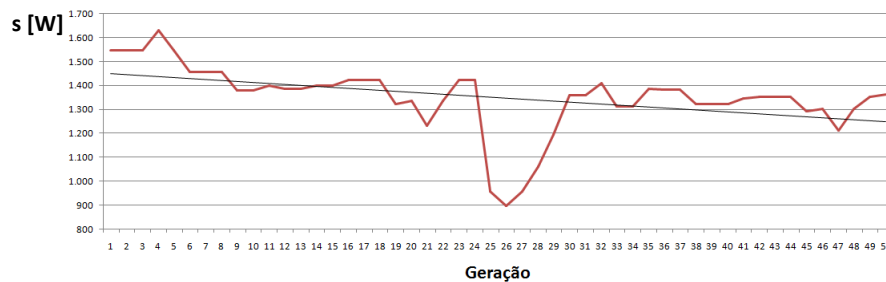


Figura 5.6 Desvio padrão através das gerações com população inicial de 200 indivíduos

Analisando os três resultados gerados, nota-se que se obteve um desvio padrão maior para a população inicial de 50 indivíduos e um resultado melhor para a população inicial de 200 indivíduos quando comparado com o caso da população inicial de 100 indivíduos. Desta forma, chega-se a conclusão de que a população inicial com mais indivíduos gera melhores resultados.

5.2.2. Influência do número de gerações

A fim de analisar a influência do número de gerações, é retornado o valor de 100 indivíduos para a população inicial e mantido as outras variáveis iguais; primeiramente é analisado o caso de 200 gerações. A Figura A.4 do Apêndice mostra o resultado obtido.

O algoritmo gera a resposta posicionando as lâmpadas nas posições $(x=3, y=6)$, $(x=8, y=19)$, $(x=16, y=4)$ e $(x=17, y=16)$ apresentando um desvio padrão de 1262,5 W. A Figura 5.7 ilustra a convergência da matriz para um desvio padrão mínimo.

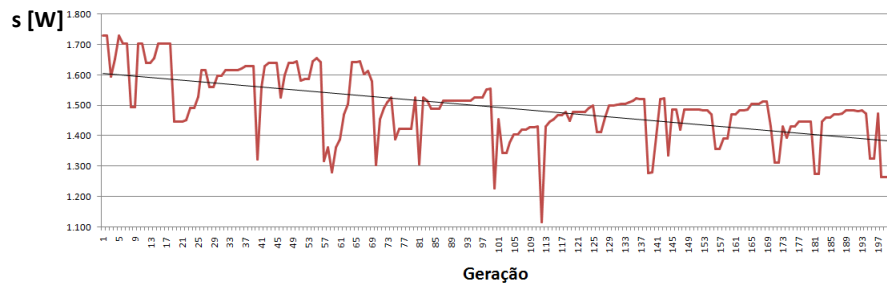


Figura 5.7 Desvio padrão através das gerações com 200 gerações

É gerado um resultado para 500 gerações. O resultado está ilustrado na Figura A.5 do Apêndice. O algoritmo gera a resposta posicionando as lâmpadas nas posições $(x=2, y=0)$, $(x=2, y=10)$, $(x=13, y=2)$, $(x=16, y=15)$ e $(x=6, y=19)$ apresentando um desvio padrão de 1246,7 W. A Figura 5.8 ilustra a convergência da matriz para um desvio padrão mínimo.

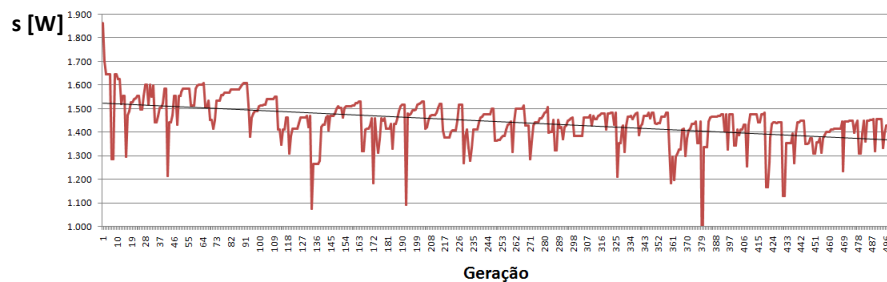


Figura 5.8 Desvio padrão através das gerações com 500 gerações

O desvio padrão obtido diminui à medida que é aumentado o número de gerações. Isso é esperado já que a cada geração são gerados indivíduos com melhores características e, portanto, um número maior de gerações implica em um melhor resultado. Através do resultado obtido também se chega à conclusão de que um número muito grande de gerações não melhora significativamente o resultado, ou seja, o resultado não compensa o esforço computacional associado.

5.2.3. Influência da taxa de mutação

A fim de analisar a influência da taxa de mutação, é retornado o valor de 50 gerações e mantido as outras variáveis iguais; primeiramente é analisado o caso de 5% de mutação. A Figura A.6 do Apêndice mostra o resultado obtido. O algoritmo gera a resposta posicionando as lâmpadas nas posições $(x=1, y=1)$, $(x=2, y=5)$, $(x=5, y=15)$, $(x=5, y=3)$ e $(x=16, y=14)$ apresentando um desvio padrão de 1652,5 W. A Figura 5.9 ilustra a divergência do resultado devido à alta taxa de mutação.

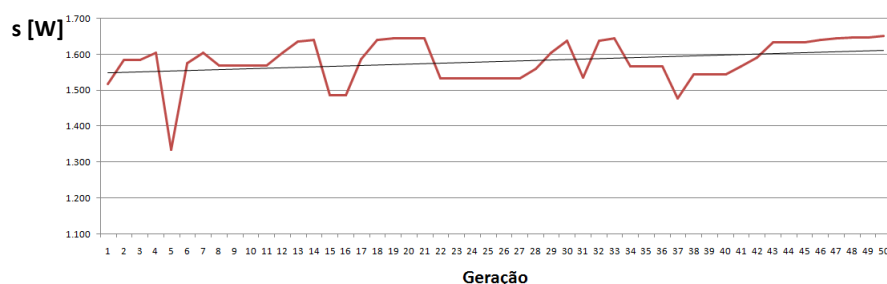


Figura 5.9 Desvio padrão através das gerações com 5% de taxa de mutação

É gerado um resultado para 0,5% de mutação. O resultado é ilustrado na Figura A.7. O algoritmo gera a resposta posicionando as lâmpadas nas posições $(x=1, y=2)$, $(x=1, y=13)$, $(x=7, y=18)$, $(x=14, y=9)$ e $(x=18, y=1)$ apresentando um desvio padrão de 1624,9 W. A Figura 5.10 ilustra a divergência do resultado devido a baixa taxa de mutação.

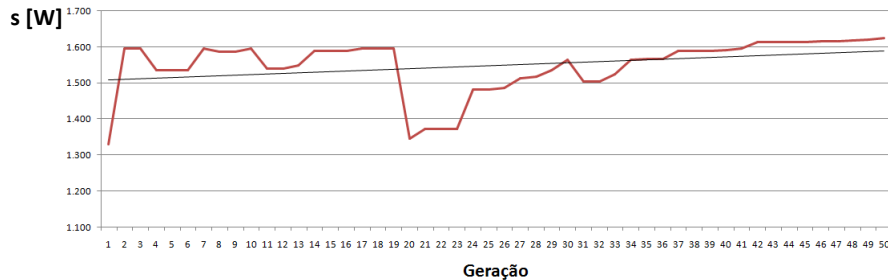


Figura 5.10 Desvio padrão através das gerações com 0,5% de mutação

É gerado um resultado para 2% de mutação. O resultado é ilustrado na Figura A.8 do Apêndice. O algoritmo gera a resposta posicionando as lâmpadas nas posições $(x=3, y=7)$, $(x=5, y=19)$, $(x=8, y=0)$, $(x=17, y=8)$ e $(x=19, y=13)$ apresentando um desvio padrão de 1507,8 W. A Figura 5.7 ilustra a convergência do resultado para um desvio padrão mínimo.

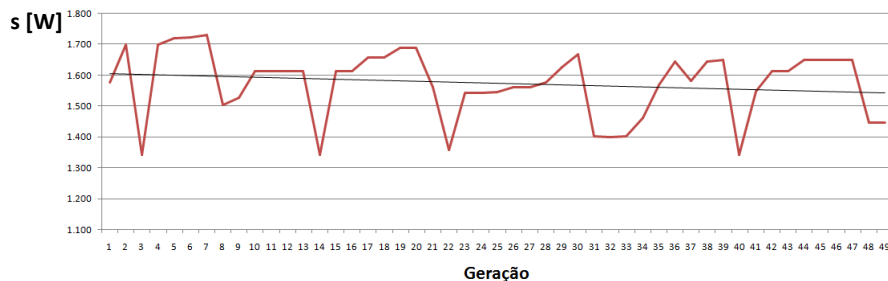


Figura 5.11 Desvio padrão através das gerações com 2% de mutação

Para taxas de mutação de 0,5% e de 5%, a análise da dos gráficos mostrados na Figura 5.9 e na Figura 5.10 mostram que o resultado diverge. Isso é esperado, pois uma taxa de mutação alta altera as boas características dos indivíduos ao transmitir aos seus descendentes; já uma taxa de mutação muito baixa não garante a diversidade na população. Para uma taxa de mutação de 2%, o resultado apresentou convergência, mas é obtido resultados piores do que 1% de taxa de mutação, o que pode ser explicado da mesma forma de quando é posto 5%. Conclui-se que a taxa de mutação de 1% é o valor que gera os melhores resultados.

5.3. CASO 3 – ALGORITMO GENÉTICO E FORÇA BRUTA

Este caso considera uma superfície quadrada de quatro metros quadrados discretizada em uma matriz de dez linhas e dez colunas com inicialmente cinco lâmpadas, é utilizado trinta anéis e um raio do círculo principal de 0,2 metros. O raio da superfície emissora é de 0,25 metros, a distância da superfície emissora até a superfície é de 0,5 metros, sua emissividade é de 0,25 (valor comum para a maioria das lâmpadas) e sua temperatura é de 2000 K.

5.3.1. Força bruta

O algoritmo de força bruta é configurado para os valores de entrada do problema e gera o resultado apresentado na Tabela 5.1 (os valores em vermelho indicam a posição das lâmpadas sobre a superfície).

Tabela 5.1 Matriz de radiação resultante pelo método de força bruta

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	6242,0	6833,2	7280,5	7899,4	8306,9	7848,3	7758,3	6971,8	5770,2	4708,5
1	7472,2	7531,8	8124,9	8240,1	8108,9	8408,3	7531,4	7587,7	6781,0	5770,2
2	7514,4	8473,4	8287,2	8169,1	8069,7	8215,3	8186,3	8275,0	7587,7	6971,8
3	7883,0	7482,9	7769,0	7624,6	7608,5	7586,3	7825,8	8186,3	7531,4	7758,3
4	7688,7	7796,9	7734,1	7401,1	6940,0	7062,4	7586,3	8215,3	8408,3	7848,3
5	7016,5	7459,9	7472,1	6853,5	6422,4	6940,0	7608,5	8069,7	8108,9	8306,9
6	7104,7	7884,4	7572,8	7251,1	6853,5	7401,1	7624,6	8169,1	8240,1	7899,4
7	6653,0	7902,0	7367,1	7572,8	7472,1	7734,1	7769,0	8287,2	8124,9	7280,5
8	7174,8	7324,4	7902,0	7884,4	7459,9	7796,9	7482,9	8473,4	7531,8	6833,2
9	5908,0	7174,8	6653,0	7104,7	7016,5	7688,7	7883,0	7514,4	7472,2	6242,0

A matriz resultante tem as lâmpadas posicionadas nas posições $(x=9, y=7)$, $(x=8, y=1)$, $(x=4, y=9)$, $(x=2, y=0)$ e $(x=0, y=5)$. Através do método de força bruta consegue-se um desvio padrão de 651,4 W. O desvio padrão encontrado é o melhor possível para a configuração fornecida, pois o algoritmo testa todas as possibilidades.

5.3.2. Algoritmo genético

Visto o estudo feito, é constatado que aumentar o número de indivíduos da população inicial, assim como o número de gerações, a fim de convergir o resultado é o adequado para se gerar um bom resultado. É concluído também que valores em torno de 1% para a taxa de mutação é adequado a fim de garantir a diversidade e evitar a divergência do resultado. Então, para este caso, é utilizado uma população inicial de 200 indivíduos por 200 gerações com taxa de mutação de 1%. São utilizados como quantidade inicial 5 lâmpadas (limitando a um número máximo de 5 lâmpadas e um número mínimo de 2 lâmpadas). O resultado obtido é mostrado na Tabela 5.2 (os valores em vermelho indicam a posição das lâmpadas sobre a superfície).

Tabela 5.2 Matriz de radiação resultante através do algoritmo genético

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	6288,7	5624,4	5611,5	5456,6	5487,1	5669,8	5721,6	6381,2	5353,5	4704,6
1	6398,3	6802,0	6125,3	5630,8	5630,8	6264,2	6887,0	6596,7	6447,8	5295,6
2	6596,7	5949,2	5982,8	5830,5	5959,8	6109,3	6202,5	6832,7	5868,9	5127,4
3	5769,3	5830,2	5565,6	5394,5	5479,1	5819,5	6074,1	6299,8	5737,9	5072,5
4	4846,2	5078,8	5006,3	4588,9	4713,5	5193,4	5770,4	5830,5	5588,9	4978,2
5	4739,8	5068,8	5066,5	4713,5	4540,4	5101,8	5738,9	5851,4	5595,1	5116,5
6	4773,4	4973,2	5172,7	5006,2	4949,3	5158,8	5877,5	6067,4	6233,7	5459,9
7	5398,2	5905,8	5796,9	5779,6	5636,4	5743,6	5982,7	6261,0	6713,5	5684,8
8	5606,6	6645,6	6069,6	5954,3	5781,0	5739,1	6304,1	6806,5	6577,1	6295,8
9	6269,1	6418,0	6654,0	6113,9	5553,2	5564,6	5689,0	5876,1	6366,2	5328,6

A matriz resultante tem as lâmpadas posicionadas nas posições $(x=1, y=0)$, $(x=1, y=7)$, $(x=8, y=8)$ e $(x=9, y=1)$. Através do algoritmo genético consegue-se um desvio padrão de 569,8 W. O algoritmo genético apresenta um resultado melhor que o de força bruta, mas para isso, uma das lâmpadas é eliminada nos processos de crossover e de mutação. Como esperado do algoritmo, um indivíduo com quatro lâmpadas mostra-se mais apto que os indivíduos de cinco lâmpadas e, portanto, essa característica é transmitida aos seus descendentes através das gerações, disseminando-a pela população.

A fim de verificar a qualidade do resultado obtido pelo algoritmo genético, é gerado um novo resultado para quatro lâmpadas utilizando o algoritmo de força bruta visando obter o melhor resultado possível para essa configuração. O algoritmo de força bruta obtém um resultado posicionando as lâmpadas em $(x=8, y=8)$, $(x=8, y=1)$, $(x=1, y=8)$, $(x=1, y=1)$ com desvio padrão de 464,5 W. Considerando esse o melhor resultado possível, o algoritmo genético obtém um resultado na mesma ordem apresentando uma diferença de apenas 105,3 W.

6. CONCLUSÕES

O emprego do método de força bruta apresentou um desempenho satisfatório apenas para casos mais simples: matrizes pequenas com poucas lâmpadas. Isso se deve ao fato deste método realizar todas as combinações possíveis a fim de obter a melhor. Já para matrizes maiores, o esforço computacional aumenta, assim como o tempo necessário para obter um resultado. O fator tamanho da matriz foi mais determinante no quesito tempo que o número de lâmpadas. Isso ocorre, pois quanto mais lâmpadas são postas, menos espaços na matriz estão disponíveis.

O emprego do algoritmo genético se mostrou bastante satisfatório apresentando bons resultados com um esforço computacional muito menor quando comparado ao método de força bruta. Esse método também apresenta a vantagem de não estar limitado a uma quantidade fixa de lâmpadas além de poder trabalhar com matrizes maiores sem aumentar significativamente o esforço computacional.

Conclui-se então que o algoritmo genético é mais adequado que o método de força bruta, pois esse torna inviável em casos reais onde é necessária a utilização de matrizes maiores. Como proposta de continuação no estudo, pode-se implementar ao código a possibilidade de variação da potência de cada lâmpada, ao invés de considerar todas iguais. Desta forma, apesar dos resultados encontrados serem considerados satisfatórios, uma superfície ainda mais homogênea pode ser obtida.

7. REFERÊNCIAS

CODD, D. S., **A low cost high flux solar simulator**. Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2010.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P., **Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa**. 4ed., Rio de Janeiro: LTC, 1998.

KILMER, L. C., **The Design of a More Accurate, Higher Fidelity Dual Source Air Mass Zero Solar Simulator**. Energy Technology Department, The Aerospace Corporation. Los Angeles, CA, 1994.

LABORATÓRIOS VIRTUAIS, **Transferência de Calor**, <http://labvirtual.eq.uc.pt> Acessado em 21/11/2010.

HOWELL, J. R., **A Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factors**, <http://www.engr.uky.edu> Acessado em 24/08/2010.

NAGAMINE F. **New Solar Simulator M R Multi-Junction Solar Cell**, Institute, Solar Cell Test Research Lab, 1990.

8. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

SAYRE, R. M.; DOWDY, J. C. **The FDA proposed solar simulator versus sunlight**. Photochemical & Photobiological Sciences, 2009.

APÊNDICE

A verificação do algoritmo genético é feita através da análise de um caso de placa de dois metros de comprimento por dois metros de largura, discretizada em uma matriz de vinte colunas e vinte linhas com inicialmente 5 lâmpadas, uma população inicial de 100 indivíduos por 50 gerações com taxa de mutação de 1%. O resultado é apresentado na Figura A.1.

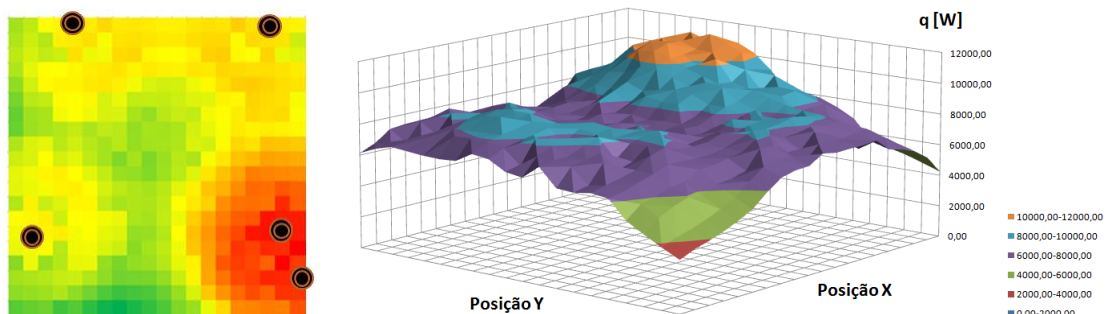


Figura A.1 Matriz de radiação gerada

A população inicial tem seu número de indivíduos diminuído para 50. O resultado é apresentado na Figura A.2.

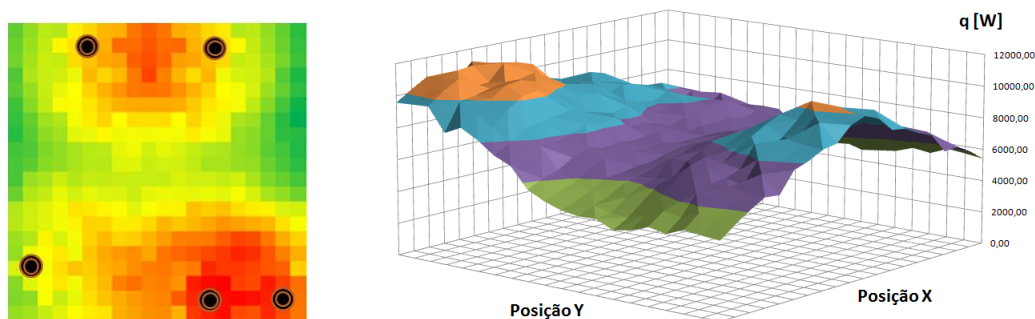


Figura A.2 Matriz de radiação com população inicial de 50 indivíduos

É gerado um resultado para uma população inicial de 200 indivíduos. O resultado é ilustrado na Figura A.3. Erro! Fonte de referência não encontrada..

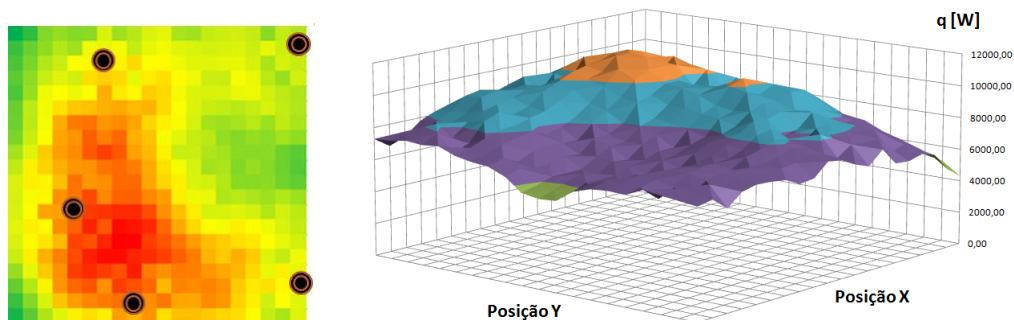


Figura A.3 Matriz de radiação com população inicial de 200 indivíduos

O número de gerações também é avaliado. Para tanto, é feita uma análise com 200 gerações. O resultado está ilustrado na Figura A.4.

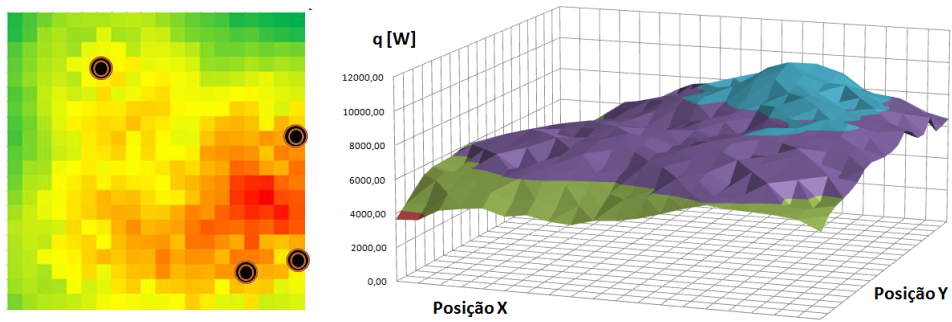


Figura A.4 Matriz de radiação com 200 gerações

É gerado um resultado para 500 gerações cujo resultado é ilustrado na Figura A.5.

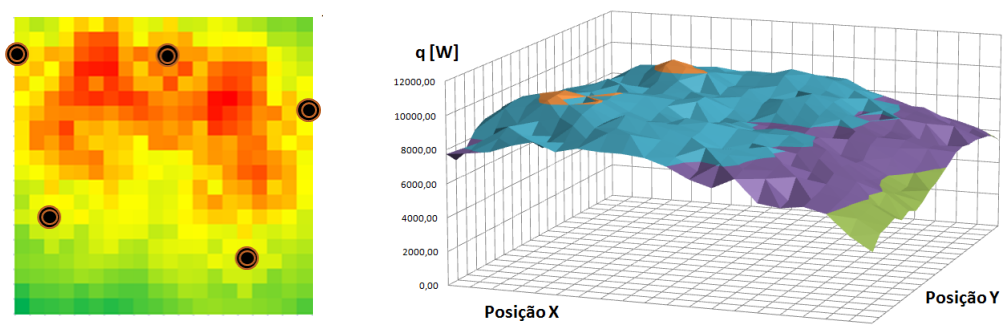


Figura A.5 Matriz de radiação com 500 gerações

A taxa de mutação é avaliada variando-se seu valor, primeiramente é configurado para 5%, que gera o resultado apresentado na Figura A.6.

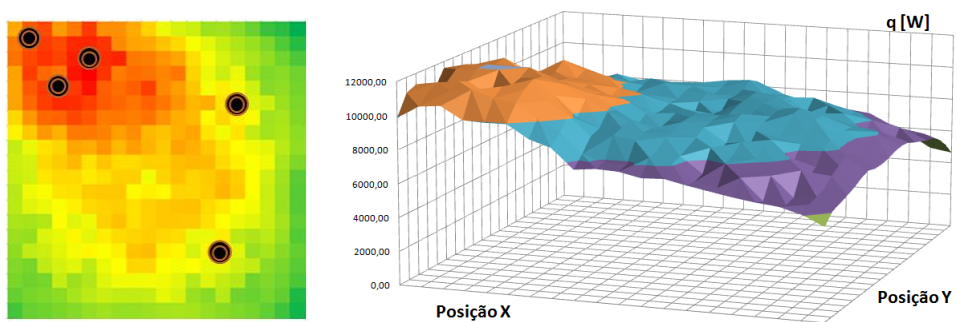


Figura A.6 Matriz de radiação com taxa de mutação de 5%

É gerado um resultado para 0,5% de mutação. O resultado é ilustrado na Figura A.7.

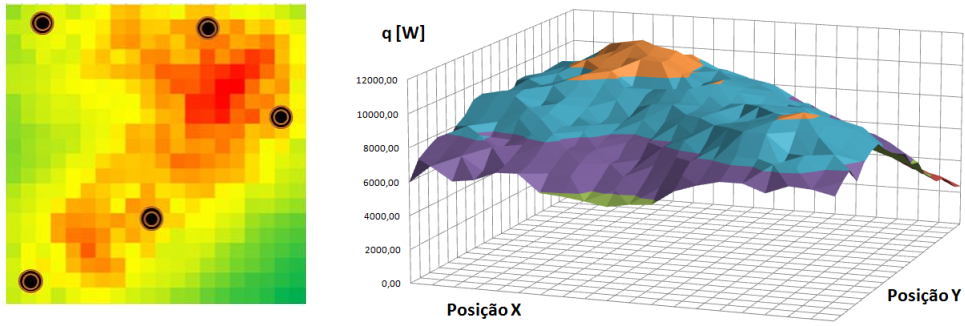


Figura A.7 Matriz de radiação com taxa de mutação de 0,5%

Também é gerado um resultado para uma taxa de mutação de 2% cujo resultado é apresentado na Figura A.8.

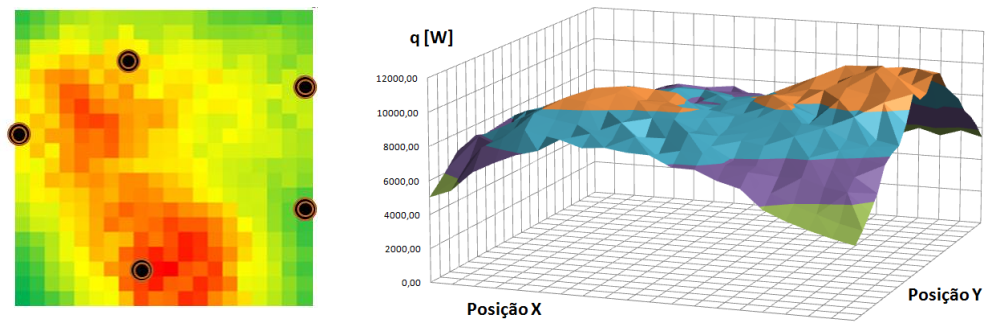


Figura A.8 Matriz de radiação com taxa de mutação de 2%