

# RESULTADOS PRELIMINARES DO USO DO ALGORITMO EVOLUTIVO GEO NA OTIMIZAÇÃO DE PROJETOS DE SISTEMAS ÓPTICOS

**Bráulio Fonseca Carneiro de Albuquerque**

**Fabiano Luis de Sousa**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais –Engenharia e Tecnologias espaciais (INPE/ETE)  
São José dos Campos-SP, Brasil.

braulio@dea.inpe.br

fabiano@dir.inpe.br

***Resumo.** O objetivo do presente artigo é apresentar alguns resultados preliminares da aplicação do algoritmo de otimização evolutiva “Generalized Extremal Optimization” (GEO), no problema de projeto de sistemas ópticos. Duas versões do GEO foram usadas para o projeto de um triplete de Cooke e os resultados comparados aos obtidos por um Algoritmo Genético híbrido.*

***Keywords:** Optical Systems, Evolutionary Optimization, Generalized Extremal Optimization*

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas ópticos são artefatos formados por um conjunto de diferentes elementos ópticos que juntos são capazes de manipular a luz (ou energia eletromagnética em uma certa faixa de comprimento de onda) de forma a realizar uma tarefa desejada. Neste trabalho nos limitaremos a discutir sistemas ópticos de formação de imagem, nos quais os elementos ópticos em sua grande maioria são lentes e espelhos, que são capazes de desviar a luz através dos fenômenos da refração e reflexão, respectivamente.

Em um sistema óptico de formação de imagem, dado as características desejadas de distância focal efetiva,  $F/\#$ , campo de visada e um intervalo de comprimento de onda, o objetivo do projetista é conseguir a melhor qualidade de imagem (ou minimizar as aberrações ópticas), respeitando alguns vínculos físicos.

A disciplina de projeto de sistemas ópticos existe a mais de 3 séculos. Para que se possa projetar de fato um sistema óptico, é necessário que se consiga calcular o traçado de raios através das superfícies ópticas do sistema. Os conhecimentos matemáticos e físicos necessários para se traçar o caminho de um raio através de um sistema óptico só se tornaram disponíveis em meados do século XVII. (Hecht, 1987; Vasiljevic, 2002). Apesar disto, até o início do século XX, na sua grande parte, os sistemas ópticos eram feitos na base da tentativa e erro, pois as dificuldades e morosidade nos cálculos, agravadas pelas imprecisões na medida de curvatura e índices de refração dos materiais, tornavam esta técnica mais vantajosa.

No início do século XX, o traçado de raios se tornou cada vez mais usado devido ao aparecimento das máquinas de calcular mecânicas. O tempo típico para uma pessoa experiente traçar um raio por uma única superfície óptica usando uma máquina mecânica de calcular era de 10 minutos. Um sistema óptico razoável possui por volta de 6 lentes, o que levaria 2 horas para traçar um raio por todo o sistema, e uma semana de trabalho (40 horas) para traçar 20 raios pelo sistema, o que é o número mínimo necessário para se diagnosticar a qualidade de imagem do sistema (Vasiljevic, 2002). Com isso, podemos ver claramente que não fazia sentido em se falar em otimização naquela época.

Com o advento do computador na década de 40 houve uma incrível mudança na ciência e em especial para óptica. O tempo típico para traçar um raio por uma superfície passou rapidamente a

ser de um segundo, só então é que se começou a pensar em otimização de sistemas ópticos (Vasiljevic, 2002; Malacara e Malacara, 2003).

Talvez o primeiro método de otimização a ser usado no problema de projeto de sistemas ópticos foi o Método dos Mínimos Quadrados, proposto por Rosen e Eldert (1954). Este método foi rapidamente abandonado devido a instabilidades decorrentes da inversão de uma matriz que é próxima de singular para todos os casos práticos. Alguns anos mais tarde, Girard (1958) foi o primeiro a propor o Método dos Mínimos Quadrados Amortecido para o problema, sendo este talvez até hoje o método mais usado (Rayces e Aguilar 2004; Malacara e Malacara, 2003; Vasiljevic, 2002). Outros métodos, como Método de Spencer (Spencer, 1963; Rayces e Aguilar, 2004), Método de Otimização Ortornormal de Grey (Vasiljevic, 2002) e Método de Otimização Adaptativa de Glatzel (Glatzel, 1968, Rayces e Aguilar, 2002 e 2004), foram usados na solução do problema. Estes são todos métodos considerados, que apesar de serem de enorme ajuda para o projetista óptico e continuarem sendo amplamente usados a mais de meio século no problema de otimização de sistemas ópticos, possuem algumas limitações e pontos negativos que limitam a sua performance, como: i) A otimização só é capaz de achar um mínimo local; ii) As aberrações não são funções lineares com respeito aos parâmetros construtivos do sistema; As aberrações, em geral, não são ortogonais entre si ; iii) Complexidade do espaço de projeto; iv) É necessário um projeto inicial razoável para uma boa convergência; v) Existem variáveis não contínuas no sistema, que são os tipos de vidro usados nas lentes e;vi) A função objetivo é extremamente complexa e só pode ser estimada numericamente.

Hoje um computador pessoal é capaz de traçar de ordem de milhões de raios por uma superfície em 1 segundo, um processador Intel core 2 Quad660 por exemplo, permite traçar por volta de 30 milhões de raios por uma superfície em 1 segundo. Com esse avanço considerável, não apenas mais algoritmos de otimização clássicos são utilizados em óptica, mas também algoritmos evolutivos, que são considerados custosos computacionalmente, vêm sendo aplicados ao problema desde a década de 1990 com a proposta de contornar algumas limitações dos métodos clássicos. Dentre os diferentes tipos de algoritmos evolutivos, podemos encontrar aplicados ao problema de otimização de sistemas ópticos, Algoritmos Genéticos (Leijenhorst *et al.*, 1996; Ono *et al.*, 1998; Moore, 1999; Chen e Yamamoto, 2000; Vasiljevic, 2002), Estratégias Evolutivas (Vasiljevic, 2002; Thibault *et al.*, 2005) e também Programação Genética (Koza *et al.*, 2005). Segundo a literatura estes métodos de otimização têm apresentado bons resultados no problema. No presente trabalho são apresentados os primeiros resultados de um estudo sobre a eficiência da aplicação do algoritmo evolutivo GEO no projeto de sistemas ópticos. O GEO é um novo algoritmo evolutivo de fácil implementação que tem sido usado com sucesso em problemas de otimização em engenharia de diferentes naturezas. Este trabalho trata-se de uma contribuição inédita, visto que este tipo de algoritmo evolutivo nunca foi testado antes neste problema.

## 2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Como mencionamos anteriormente, o que se deseja no projeto de um sistema óptico de formação de imagem é minimizar as aberrações ópticas para que a imagem seja a melhor possível. As aberrações ópticas podem ser definidas como um defeito ou erro na posição de interceptação de um raio no plano imagem referente a uma coordenada específica de referência (Shannon, 1980).

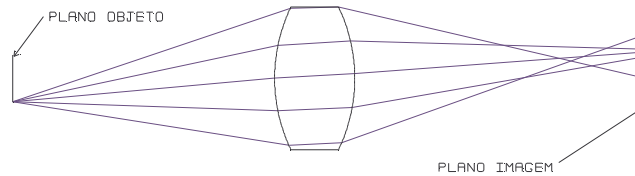
Na Fig.1 podemos ver uma representação das aberrações ópticas se manifestando em um sistema formado por uma única lente. Repare que os raios provenientes de um único ponto objeto não colapsam em um ponto na imagem. Sendo o desvio de cada raio com relação, por exemplo, ao raio central, chamado de aberração.

Dado um sistema óptico formado por  $N$  parâmetros construtivos, qualquer raio que atravessa o sistema pode ser especificado através de 6 números, 3 especificando suas coordenadas  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  e 3 especificando seus co-senos diretores  $L$ ,  $K$ ,  $M$ .

Entretanto, os raios devem satisfazer as seguintes condições:

$$1) L^2 + K^2 + M^2 = 1$$

2) As coordenadas  $X, Y$  e  $Z$ , devem satisfazer a equação da superfície a qual ela pertence. Com isso, pode-se reduzir a representação dos raios para 4 números ( $X, Y, L, K$ ).



**Figura 1-Representação das aberrações ópticas se manifestando.**

Se as coordenadas  $(X_0, Y_0)$  representarem as coordenadas de um ponto objeto e tivermos um sistema óptico perfeito formando a imagem deste ponto, as coordenadas de todos os raios que saem deste ponto serão levados a  $(X'_F, Y'_F)$ .

Onde :

$$X'_F = M \cdot X_0 \quad (1)$$

$$Y'_F = M \cdot Y_0 \quad (2)$$

Onde  $M$  é a magnificação do sistema

Todavia, como sistemas ópticos perfeitos não existem, isso implica em um deslocamento da intercessão de cada raio em relação a posição nominal esperada no plano focal, o que pode ser representada matematicamente da seguinte forma:

$$X'_F = M \cdot X_0 + G(X_0, Y_0, L_0, K_0, x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3)$$

$$Y'_F = M \cdot Y_0 + H(X_0, Y_0, L_0, K_0, x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4)$$

Onde  $x_1, x_2, \dots, x_n$  são os parâmetros construtivos do sistema e  $G$  e  $H$  são as funções aberrações.

Através das Eqs (3) e (4) fica evidente que a condição para um sistema óptico ser perfeito se dá quando as funções aberrações satisfazerem a condição  $G \equiv H \equiv 0$  para todo e qualquer raio possam ser traçado do objeto através do sistema, ou seja para quaisquer valores de  $(X_0, Y_0, L_0, K_0)$ . Com isso, se torna intuitivo que uma forma de se avaliar a qualidade de um sistema óptico pode ser dado pela soma do valor quadrático da contribuição das aberrações introduzidas no sistema por cada raio possível de ser traçada do objeto. O que pode ser escrito na forma da equação seguinte (Vasiljevic, 2002):

$$\Psi = \iiint \int (G^2 + H^2) dX_0 dY_0 dL_0 dK_0 = \Psi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (5)$$

A Eq (5) implica que o problema de otimização em sistemas ópticos é um problema de minimização da função  $\Psi$ .

A função  $\Psi$  não pode ser calculada de forma analítica, podendo apenas ser computada através do traçado de um conjunto de raios. Na prática, o que se faz geralmente é escolher alguns pontos do objeto  $(X_0, Y_0)$ , de onde serão traçados um certo número de raios. Portanto, na prática a Função Objetivo se reduz a:

$$\Psi = \sum_{i=1}^m G_i^2 + H_i^2 \quad (6)$$

Onde “i” representa um raio específico  $(X_0^i, Y_0^i, L_0^i, K_0^i)$ . A discriminação entre as funções G e H não é importante, isso nos permite escrever:

$$\Psi = \sum_{i=1}^m f_i^2(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (7)$$

Onde  $f_i$  representa uma das funções  $G_i$  ou  $H_i$

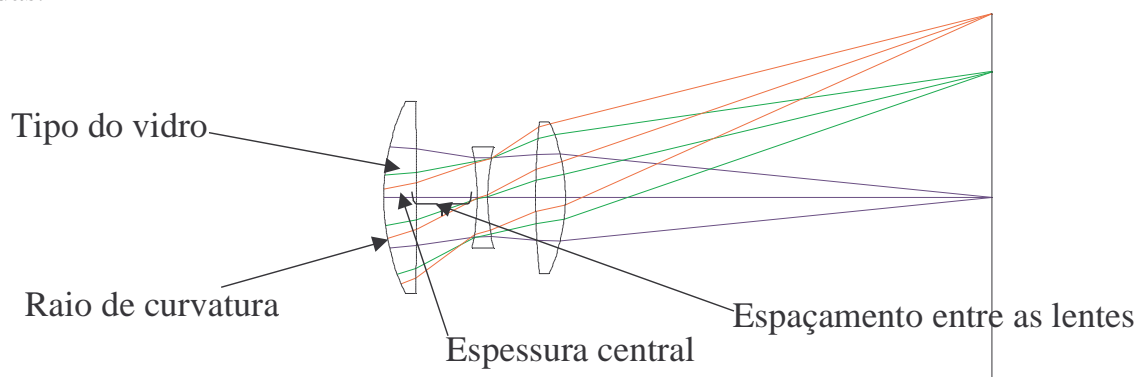
O problema ainda não está completo. Além da Função Objetivo existem ainda vínculos em alguns parâmetros construtivos do sistema que são dados na forma de inequações como segue:

$$\begin{aligned} b_1(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) &\geq 0 \\ b_2(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) &\geq 0 \\ &\vdots \\ b_n(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) &\geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Estes vínculos e/ou condições de contorno garantem que todos os elementos ópticos sejam fabricáveis, que a distância entre os elementos ópticos seja positiva e maiores que dado valor, que o valor da focal efetiva do sistema e de outras quantidades paraxiais sejam atendidas, entre outros.

Os parâmetros construtivos de um sistema óptico de formação de imagem ou variáveis do problema  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , em geral, são: as curvaturas das superfícies ópticas (lentes ou espelhos), espessura de vidro central de uma lente, distância entre os elementos ópticos (lentes e espelhos) e tipo de vidro óptico usado na fabricação da lente, conforme ilustra a Fig.2.

As variáveis em geral, com exceção dos vidros, são números reais, que a princípio podem variar de mais ou menos infinito. Os vidros por outro lado, são variáveis discretas, pois o projeto deve-se limitar a vidros disponíveis comercialmente os quais possuem características fixas e muitas bem definidas.



**Figura 2-Esquema de um sistema óptico refrativo mostrando as principais variáveis de projeto.**

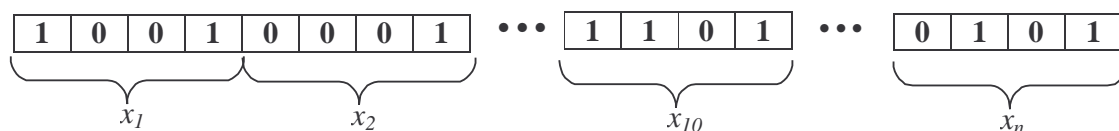
### 3 O ALGORITMO GEO

Utilizaremos o GEO em duas versões, na sua versão original e na versão  $GEO_{real2}$ . A primeira versão foi escolhida por se tratar da forma canônica, enquanto que a segunda foi escolhida, pois, baseado na literatura disponível, foi a versão que, de uma forma geral, apresenta os melhores resultados para problemas onde as variáveis de projeto são contínuas no espaço de projeto.

O algoritmo GEO na sua forma canônica foi proposto por De Sousa *et al.* (2003) como uma forma de generalizar o algoritmo Extremal Optimiation (EO). Ambos são baseados no modelo evolucionário simplificado de Bak-Sneppen, o qual foi desenvolvido para mostrar o aparecimento da criticalidade auto-organizada em ecossistemas.

O algoritmo GEO representa as variáveis de projeto como uma única “string” de bits, como mostra a Fig.3, similarmente como feito no GA.

Todavia, diferente do GA, a string de bits não representa o cromossomo de um indivíduo, mas cada bit é interpretado como uma espécie diferente.



**Figura 3-Representação binária das variáveis de projeto no GEO. Cada bit pode ser interpretado como sendo uma espécie.**

Cada uma destas espécies possui uma adaptabilidade, a qual é proporcional ao ganho ou perda que a mudança do bit que a representa proporciona na função objetivo. Os bits são organizados do mais adaptado para o menos adaptado. Em seguida um bit com ranking “k” é sorteado aleatoriamente com distribuição uniforme, sendo a sua probabilidade de ser modificado (mutado ou flipado) igual a  $P(k)=k^{-\tau}$ , onde  $\tau$  é um parâmetro real não negativo ajustável. Se ele for flipado, um novo conjunto de espécies da próxima geração é gerado, se não um novo bit é sorteado até que haja uma mutação. Este processo é repetido até que um critério de parada seja satisfeito. A melhor configuração de bits durante a busca é guardada e retorna como solução no final.

O  $GEO_{real2}$ , proposto por Lopes *et al.* (2008), possui o mesmo funcionamento básico do GEO. A principal mudança esta na forma de se representar as variáveis, que deixam de ser representadas pelo vetor de bits e passam a ser representadas diretamente pelos seus valores reais. Conseqüentemente, a forma de alterar os seus valores muda totalmente, passando a ser feita através de perturbações, muito similar como é feito nas EE. Além disto, o  $GEO_{real2}$  trata cada uma das variáveis separadamente, fazendo com que a cada iteração todas as espécies sofram modificações.

Nesta versão do algoritmo, cada espécie (ou variável) sofre não uma, mais sim várias (j) perturbações conforme a equação abaixo:

$$x'_{ij} = x_i + x_i \cdot N(0, \sigma_j) \quad (9)$$

Onde, o índice  $i$  identifica a espécie ( $i \in 1, \dots, n$ ), e o índice  $j$  identifica a perturbação ( $j \in 1, \dots, P$ ).

Sendo o passo da perturbação dado por:

$$\sigma_{j+1} = \frac{\sigma_j}{2 \cdot j} ; j \in 1, \dots, P \quad (10)$$

Desta forma, apenas  $\sigma_1$  deve ser especificado.

O novo valor  $x'_{ij}$  da  $i$ -ésima variável com a  $j$ -ésima perturbação é então substituído no conjunto de espécies original e o valor da Função Objetivo  $V_{ij}$  é, então, recalculada. A adaptabilidade atribuída a esta  $i$ -ésima variável para a  $j$ -ésima perturbação é igual a  $\Delta V_{ij} = (V_{ij} - V)$ .

Este processo é repetido para cada uma das  $n$  espécies modificadas para cada uma das  $P$  perturbações.

Para cada variável  $i$  uma tabela é criada onde os valores  $x'_{ij}$  são organizados de acordo com as adaptabilidades  $\Delta V_{ij}$ . Sendo que o menos adaptado ocupa a posição 1 da tabela e o mais adaptado ocupa a posição  $P$ . Isso é feito para cada uma das  $n$  variáveis.

Um sorteio aleatório com destruição uniforme é realizado para cada uma das variáveis com a finalidade de se selecionar uma das  $P$  perturbações por elas sofridas. A verificação se tal perturbação ocorrerá ou não é feita exatamente como no GEO. Após uma perturbação ser escolhida para cada variável, um novo conjunto de espécie é criado, a qual dará seqüência na iteração do algoritmo.

#### **4 PROBLEMA TESTE PROPOSTO**

Neste trabalho nos limitamos a aplicar o GEO em um problema teste de otimização de um sistema óptico simples. No experimento realizado tentaremos projetar um sistema que consiste de três lentes separadas por ar com o objeto localizado no infinito. A distância focal efetiva do sistema (efl) deve ser de 100mm e a sua abertura F/5, com campo de visada de  $\pm 20^\circ$ . O sistema deve ser projetado para os comprimentos de onda F (486,13nm), d (587,56nm) e C (656,27nm), respectivamente azul verde e vermelho. O sistema não deve ter “vignetting”, todas as lentes devem ser esféricas e devem satisfazer os seguintes vínculos: espessura central das lentes, distância mínima entre as lentes e borda mínima das lentes, o qual deve ser igual ou maior que 4mm, sendo que a espessura das lentes não deve ser maior que 15mm. O diafragma do sistema foi definido como sendo a primeira face da segunda lente.

Os vidros das lentes serão mantidos fixos sendo respectivamente SK16, F2 e SK16, os quais são vidros do catálogo do fabricante Schott. Todos os raios de curvatura das lentes serão variáveis de projeto assim como as espessuras de ar e das lentes. Com isso, teremos um total de 12 variáveis.

Este problema é exatamente o mesmo proposto por Moore (1999) em seu trabalho. A solução deste problema tende a ser um sistema com o formato do tripleto de Cooke. Vasiljevic (2002) também apresenta em seu trabalho o problema do tripleto de Cooke como um teste dos algoritmos por ele implementados.

#### **5 IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA**

Para a implementação das duas versões do GEO, que propomos para a otimização de um sistema óptico, utilizamos o software MATLAB. Este software foi escolhido devido à experiência do autor com este programa e pelo fato do MATLAB permitir a comunicação com o programa ZEMAX através de um aplicativo (toolbox) gratuito chamado de ZMat. O ZEMAX é um software de projeto de sistemas ópticos e foi usado neste trabalho para simular um sistema óptico (traçar os raios) e calcular o valor da função objetivo.



A Função Objetivo foi definida no ZEMAX usando uma de suas Funções “default” chamada “RMS spot size”. Nesta função, vários raios, com diferentes valores de  $L, K$ , de alguns diferentes pontos do objeto,  $X_0, Y_0$ , são traçados para cada comprimento de onda. O erro de cada raio é tomado como a diferença de sua interseção no plano focal e a posição da interseção do raio principal, proveniente do mesmo ponto objeto  $X, Y$ , do comprimento de onda  $d$  (587.56nm) tomado como primário.

Além dos erros de interseção dos raios no plano focal, a Função Objetivo ainda incorpora os vínculos e restrições do sistema, que são: a focal efetiva do sistema, espessura central das lentes, distância mínima entre as lentes, borda mínima das lentes e espessura máxima das lentes. Ou seja, o controle das restrições e vínculos é feito, de uma forma geral, através de uma função penalidade exterior estática proporcional à distância da região viável.

Para incluir os vínculos na Função Objetivo, uma ligeira modificação na definição da Função Objetivo é feita pelo ZEMAX com relação ao que mostramos na Eq (7). Para incorporar as inequações de vínculos na Função Objetivo, elas são transformadas em equações que se tornam ativas quando as restrições são violadas e assumem valores zero quando as restrições são respeitadas. Estas modificações, incluem um fator de peso  $w_i$ , e uma constante  $t_i$  que representa o valor desejável da função  $f_i$ , que neste caso passa a representar tanto as aberrações como os vínculos. Para as funções de aberração, os valores desejáveis  $t_i$  geralmente são iguais a zero.

Com isso, o valor numérico da Função Objetivo do ZEMAX é dado por:

$$\Psi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m w_i (f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) - t_i)^2}{\sum_{i=1}^m w_i}} \quad (11)$$

No caso do GEO canônico, devido a sua codificação binária, algumas restrições como: espessura máxima e mínima das lentes e distância mínima entre as lentes, são controladas através da função decodificadora, ou seja, quando o número binário é transformado para real, o intervalo de interesse permitido faz com que sempre o valor destas variáveis caiam em regiões viáveis. Apesar disto, a Função Objetiva foi mantida a mesma para o GEO e para o GEO<sub>real2</sub> para que os valores numéricos possam ser comparados diretamente.

Para os sistemas onde os raios não podem ser traçados, a Função Objetivo assume um valor muito grande como penalidade.

O peso fornecido para as restrições foi de 100, sendo bem mais alto que qualquer outro peso presente. A idéia é evitar que a solução caminhasse para regiões inviáveis.

O GEO foi implementado exatamente da forma apresentada por Sousa *et al.* (2003). A. O único parâmetro de ajuste deste algoritmo é o  $\tau$ , sendo que diferentes valores deste parâmetro foram testados entre 0.25 e 2 com um passo de 0,25.

Para os diferentes tipos de variáveis de projeto foram definidos valores máximos e mínimos.

O número de bits usado para codificar uma variável deve ser definido em função da resolução que se deseja para ela.

Temos no problema 3 variáveis, a saber: raio de curvatura, espessura de ar e espessura dos vidros. Para algumas delas os valores máximos e ou mínimos vem diretamente das restrições, por exemplo,

a espessura máxima e mínima de vidro deve ser respectivamente 15mm e 4mm. Para a espessura mínima de ar também temos as restrições que deve ser de 4mm, entretanto, as restrições não dizem nada a respeito do valor máximo para esta variável, a qual, foi definida como sendo 100mm com base no bom senso. Para o raio de curvatura acreditamos que  $\pm 900$ mm seria um intervalo muito bom, visto que uma superfície com raio de 900mm com o diâmetro esperado das lentes, mal se conseguiria identificar a curvatura.

A resolução desejada para cada variável foi definida com base nas precisões que se consegue atingir na fabricação precisa de um sistema óptico. Para a espessura de lente definimos 0,025mm, para a espessura de ar definimos 0,01mm e para a o raio de curvatura também 0,01mm. Com isso, ficamos com 14 bits para as espessuras de ar, 18 bits para os raios de curvatura, e 11 bits para as espessuras de vidro.

O  $GEO_{real2}$  também foi implementado da mesma forma que apresentada por Lopes *et al.* (2008). Diferente do GEO, o  $GEO_{real2}$  tem 3 parâmetros de ajuste, sendo:  $\tau$ ,  $P$  e  $\sigma_1$ . Neste trabalho não fizemos um estudo exaustivo do comportamento do algoritmo com relação a estes parâmetros de ajuste. Nos limitamos a testar no problema as combinações ótimas destes parâmetros para funções testes apresentados no trabalho de Lopes *et al.* (2008). Com isso, acreditamos que podemos ter uma idéia em que regiões se encontram os melhores valores dos parâmetros de ajuste para o problema específico de otimização de sistemas ópticos sem a necessidade de realizar inúmeras combinações dos mesmos. Além disso, acreditamos que podemos ter um “insight” da topografia da Função Objetivo do problema, com base na melhor combinação resultante.

Além de controlar as restrições através da Função Objetivo, também incorporamos no algoritmo  $GEO_{real2}$  limites nas variáveis. Os limites usados são, na verdade, maiores que o range das restrições. Isso foi feito para que as soluções não se distanciassem muito durante a busca da região viável. Devido à natureza deste método algumas variáveis de projeto podem crescer significativamente o seu valor absoluto. Percebemos que de fato isso ocorre, levando a solução para regiões inviáveis do espaço de projeto tornando a volta para região viável muito difícil, comprometendo muito a performance do método. O limite mínimo que usamos para as distâncias entre lentes e espessuras centrais de lentes foi zero, e o limite máximo foi igual a duas vezes os valores das restrições. Quanto aos raios de curvatura mantivemos os limites em  $\pm 900$ , pois esta variável não é controlada pela Função objetivo. O controle dos limites foi feito reparando-se as soluções fora do limite, fazendo com que a variável assumisse o valor de seu limite, superior ou inferior, caso o tivesse violado.

## 6 RESULTADOS

Aqui apresentaremos os resultados obtidos para o GEO e o  $GEO_{real2}$ , para o problema proposto. Iremos comparar os resultados com os resultados apresentados no trabalho de Moore (1999).

As Figs.4 e 5 mostram respectivamente os resultados dos melhores sistemas ópticos encontrados pelo GEO e  $GEO_{real2}$  em todas as execuções dos algoritmos. A Fig.6 mostra o sistema óptico atingido no trabalho do Moore (1999) o qual será usado para fins de comparação. As mencionadas figuras mostram no seu lado esquerdo o layout do sistema resultante, e no seu lado direito uma análise da qualidade da imagem, dada pelo tamanho RMS do raio do borrão da imagem de um ponto objeto, chamado de “spot diagram”, podemos ver os tamanhos dos “spots” para os 3 pontos objetos usados na otimização.



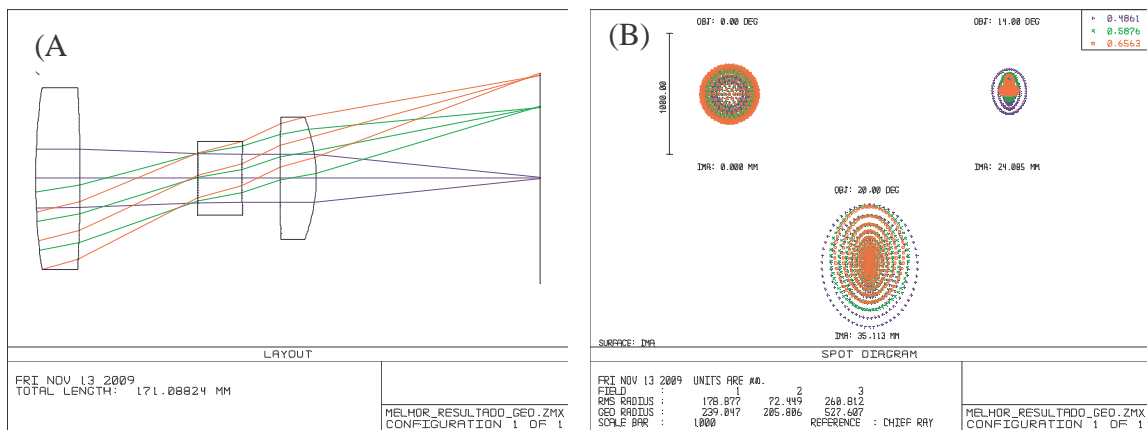


Figura 4-(A)-Layout do melhor sistema óptico encontrado pelo otimizador GEO. (B)-“spots” do sistema referentes à imagem dos pontos objetos usados na otimização.

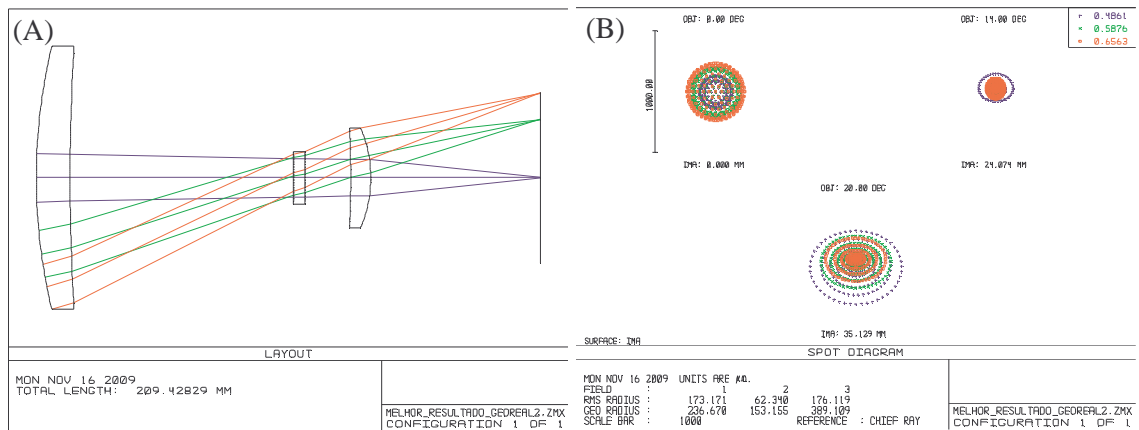


Figura 5-(A)-Layout do melhor sistema óptico encontrado pelo otimizador GEO<sub>real2</sub>. (B)-“spots” do sistema referentes à imagem dos pontos objetos usados na otimização.

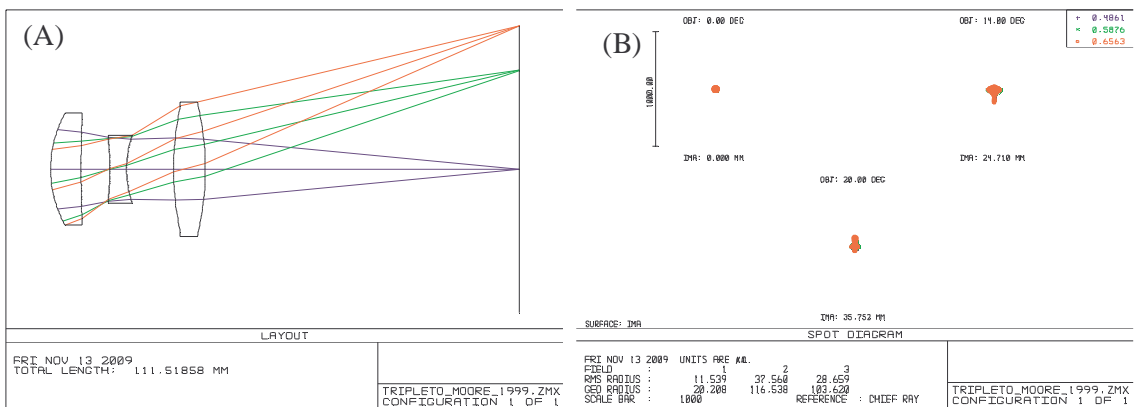


Figura 6- Layout do sistema óptico encontrado por Moore, 1999. (B)-“spots” do sistema referentes à imagem dos pontos objetos usados na otimização.

O valor da função objetivo do melhor sistema óptico encontrado com o GEO foi de 0.4234, o qual ocorreu com  $\tau = 1.75$ . Conforme esperado, esta solução tende a ser um tripleto de Cooke, pois a primeira e terceira lentes são positivas e a segunda negativa, têm uma distância focal traseira grande e a distância entre as lentes é razoável. Já para o GEO<sub>real2</sub>, o melhor sistema óptico encontrado

possui o valor da função objetivo ligeiramente melhor que o resultado do GEO, sendo de 0.3442, o qual ocorreu com os seguintes parâmetros  $\tau = 1.75, \sigma_1 = 8, P = 16$ . Diferente que ocorreu para o GEO, a melhor solução encontrada no GEO<sub>real2</sub> não tende a ser um triplete de Cooke como esperado, pois, todas as lentes são positivas.

Apesar do melhor resultado do GEO e do GEO<sub>real2</sub> não terem apresentado uma diferença muito grande no valor da Função Objetivo, o que se observa é uma incrível melhora nos valores médios de 20 execuções independentes do GEO<sub>real2</sub> com relação ao GEO. O melhor resultado médio do GEO foi de 9.194 que ocorreu com  $\tau = 1$ , enquanto para o GEO<sub>real2</sub> este valor foi de 0.736 com os parâmetros  $\tau = 1.75, \sigma_1 = 8, P = 16$ .

Embora a aplicação do GEO e o GEO<sub>real2</sub> ter funcionado para o problema proposto, os resultados ainda são muito inferiores se comparado ao resultado atingido por Moore (1999), o qual proporciona um valor da Função Objetivo de 0.0628. Podemos ver claramente que a qualidade de imagem do sistema do Moore (1999) é muito superior que a do sistema que conseguimos tanto com o GEO como com o GEO<sub>real2</sub>. Os valores RMS dos “spots” do sistema do Moore (1999) variam de aproximadamente de 11.54 $\mu\text{m}$  a 37.56 $\mu\text{m}$ , enquanto que para o sistema encontrado pelo GEO ficamos com valores entre 72.45 $\mu\text{m}$  a 268.812 $\mu\text{m}$  e do GEO<sub>real2</sub> entre 62.340 $\mu\text{m}$  e 176.119 $\mu\text{m}$ .

Uma possível explicação para a grande diferença na performance encontrada entre os otimizadores usados neste trabalho e o otimizador usado por Moore (1999), pode ser devido ao fato do último não ter usado um algoritmo evolutivo puro, mas sim uma versão híbrida do AG, onde um refinamento da busca pelo ótimo é feito usando um método de busca local (Mínimos Quadrados Amortecido), após a região onde o mesmo se encontrava no espaço de projeto ter sido identificada pelo AG.

## 7–CONCLUSÕES

Métodos de otimização evolutivos têm sido nos últimos anos usados no projeto de sistemas ópticos. Neste trabalho propomos o uso do GEO ao problema, algo nunca antes testado. Contudo, infelizmente até o momento as duas versões do GEO implementadas (GEO<sub>real2</sub> e o GEO canônico), não apresentaram performances comparáveis aos resultados atingidos em outros trabalhos. Apesar disso, o assunto está longe de ser esgotado, outras investigações a respeito da performance podem ser conduzidas de forma a entender melhor quais são os pontos fracos do método aplicado ao projeto óptico. Outras formas do GEO podem ser também testadas ao problema, como o GEO-var e o GEO<sub>real1</sub>. Entendendo-se melhor o comportamento destes métodos de otimização ao problema específico de otimização de sistemas ópticos, propostas de Taylorizações do GEO para o problema podem ser feitas, ou mesmo, outros métodos de otimização evolutiva podem ser testados.

## 8 REFERÊNCIAS

- Chen, X., Yamamoto, K. Genetic algorithm and its application in lens design. In: Fischer, R. E., Smith W. J. eds. **Current Developments in Optical Design and Engineering VI**. Bellingham, WA: SPIE, 1996, v. 2863, 216-221p. (Proceedings of SPIE).
- De Sousa, F.L., Ramos, F.M., P. Paglione, R.M. Girardi, New Stochastic Algorithm for Design. Optimization. **AIAA Journal**, v. 41, n. 9, 1808-1818p., 2003 (ISSN 0001-1452).
- Glatzel E., Wilson R. Adaptive Automatic Correction in Optical Design. **Applied Optics**, v.7, n.2, 265 –276, 1968.
- Hecht E. **Optics**. 2<sup>o</sup> edition. Massachusetts: Addison-Wesley publishing company, 1987. 676p. 0-201-11609-X.

- Koza, J. R. Al-sakran, S. H. Jones, L. W. Automated re-invention of six patented optical lens systems using genetic programming. In: Genetic And Evolutionary Computation Conference, 2005, Washington, DC, US. **Proceedings of the 2005 conference on Genetic and evolutionary computation**. New York: ACM, 2005. p.1953-1960. 1-59593-010-8.
- Leijenhorst, D. C., Lucasius, C. B., Thijssen, J. M. Optical design with the aid of genetic algorithm. **Biosystems**, v. 37, n. 3, 177-187p., 1996. DOI:10.1016/0303-2647(95)01556-6.
- Lopes, I. M., Sousa, F. L., Souza, L. C. G., 2008, The Generalized Extremal Optimization with Real Codification, In: International Conference on Engineering Optimization, 2008, Rio de Janeiro. **Proceedings of the International Conference on Engineering Optimization**, 2008.
- Malacara, D.; Malacara, Z. **Handbook of Optical Design 2<sup>nd</sup> Edition**. New York: Marcel Dekker, 2003. 552p. 978-0824746131.
- Moore K. E. Algorithm for global optimization of optical systems based on genetic competition. In: Juergens, R. C. eds. **Optical Design and Analysis Software**. Bellingham, WA: SPIE, 1999, v. 3780, 40-47p. (Proceedings of SPIE).
- Ono, I. Kobayashi, S. Yoshida, K. Global and Multi-objective Optimization for Lens Design by Real-coded Genetic Algorithms. In: Gardner, L. R., Thompson, K. P. eds. **International Optical Design Conference 1998**. Bellingham, WA: SPIE, 1998, v. 3482, 110-121p. (Proceedings of SPIE).
- Rayces, J., Lebich, L. Experiments on constrained optimization with Spencer's method. **Optical Engineering**, v.27, n.12, 1031-1034p.,1988.
- Rayces, J.L., Aguilar M. R. A discontinuity in the constrained damped least squares (DLS) method of optimization. In: Sásian J. M., Koshel, R. J., Manhart, P. K., Juergens, R. C. eds. **Novel Optical Systems Design and Optimization VII**, Bellingham, WA: SPIE, 2004, v. 5524, p. 250-260 (Proceedings of SPIE). DOI: 10.1117/12.560958
- Rayces, J.L., Aguilar M. R. Critical view of three lens design methods: damped least squares, Spencer's and Glatzel's. In: Weng, S., Sasián, J.M., Wang, Y. eds. **Optical Design and Testing**, Bellingham, WA: SPIE, 2002, v. 4927, p. 77-89 (Proceedings of SPIE). DOI: 10.1117/12.472494.
- Rosen, S., Eldert, C. Least-Squares Method for Optical Correction. **Journal of the Optical Society of America**, v. 44, n. 3, 250-252p. , 1954.
- Shannon, R. R., Wyant, J. C. **Applied optics and optical engineering volume III**. New York: ACADEMIC PRESS INC, 1980. 407p.
- Spencer, G. H. A Flexible Automatic Lens Correction Procedure. **Applied Optics**, v.2, n.12, 1257-1264p., 1963.
- Thibault, S., Gagné, C., Beaulieu, J., Parizeau, M. Evolutionary Algorithms Applied to Lens Design: Case Study and Analysis. In: Mazuray, L., Wartmann, R. eds. **Optical Design and Engineering II**. Bellingham, WA: SPIE, 2005, v. 5962, 66-76 p. (Proceedings of SPIE). DOI: 10.1117/12.625161.
- Vasiljevic, D. **Classical and Evolutionary Algorithms in the Optimization of Optical systems: (Genetic Algorithms and Evolutionary Computation, 9)**. 1<sup>o</sup> edition. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. 296p. 140207140X.