

Algoritmo Genético para otimização de parâmetros de projeto de uma Fonte de Luz Multiespectral baseada em LEDs

Marcos Eduardo Gomes Borges¹,
Bráulio Fonseca Carneiro de Albuquerque²,
Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães³

¹Programa de Mestrado em Computação Aplicada – CAP
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

²Divisão de Eletrônica Aeroespacial – DEA
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

³Divisão de Energia Nuclear – ENU
Instituto de Estudos Avançados – IEAv

marcoseborges@dea.inpe.br¹, braulio@dea.inpe.br², guimarae@ieav.cta.br³

Resumo. *Um Sensor de Estrelas Autônomo (SEA) está sendo desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Para que possa testar, calibrar e caracterizar o SEA é necessário uma infra-estrutura de testes sofisticada, que inclui dentre vários instrumentos, um Simulador de Estrelas (SE) composto basicamente por uma fonte de luz baseada em LEDs (Light Emitting Diode), pinhole e colimador. O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia utilizando algoritmo genético para resolver o problema de otimização multiobjetivo que é a definição da quantidade e tipos de LEDs necessários para que a fonte de luz gere espectros de estrelas na faixa de operação do SEA.*

Palavras-chave: *Computação Evolutiva, Otimização Multiobjetivo, Sensor de Estrelas, LED, Fonte de luz Multiespectral*

1. Introdução

Um Sensor de Estrelas é um equipamento eletro-óptico utilizado para determinar a atitude de veículos espaciais ou suborbitais utilizando como fonte de referência as estrelas, cuja direção em relação a Terra é tida como constante (referencial inercial definido por Isaac Newton). A determinação de atitude corresponde a identificar a região do espaço para a qual o sensor está apontando, e para isso, o sensor adquire e processa imagens com o intuito de determinar as estrelas presentes no campo de visada e assim calcular a atitude [Bertolino 2004, Albuquerque 2005, Fialho 2007].

Para calibrar, testar e caracterizar o SEA, é necessário uma infraestrutura de testes sofisticada chamada GSE (*Ground Support Equipment*). Essa infraestrutura composta por diversos equipamentos, simula estrelas para calibração da óptica do SEA através do simulador de estrelas. O simulador em questão é formado por uma fonte de luz multiespectral, alvo (*pinhole*) e um colimador parabólico fora de eixo. A fonte de luz é responsável em gerar espectros semelhantes aos emitidos por estrelas. O *pinhole* é o orifício por onde os feixes de luz gerados incidirão e serão projetados no colimador. O colimador tem a função de tornar paralelo o feixe luminoso divergente recebido através do *pinhole* simulando uma fonte de luz no infinito.

Este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia utilizando algoritmo genético para resolver o problema de otimização multiobjetivo que é a definição da quantidade e tipos de LEDs que serão necessários para que a fonte de luz simule estrelas corretamente.

2. Fonte de Luz para o Simulador de Estrelas

A característica espectral da fonte de luz é muito importante para simular estrelas de maneira adequada. Estudos a cerca das características espectrais das estrelas no intervalo de magnitude que o sensor irá operar foram conduzidos por [Albuquerque 2005]. Mediante aos resultados obtidos, concluiu-se que a emitância espectral de uma estrela pode ser modelada por um corpo negro. O espectro de emissão de um corpo negro depende de sua temperatura. Para obter a faixa de temperatura das estrelas que o SEA identificará, foi realizada uma análise estatística das temperaturas das estrelas.

Para essa tarefa utilizou-se o Catálogo de Estrelas Hipparcos [ESA(1997)], selecionando-se apenas as estrelas na faixa de magnitude zero a cinco, num total de 1625 estrelas. Em virtude do catálogo não apresentar informações sobre as temperaturas das estrelas, calculou-se a temperatura efetiva aproximada utilizando equações apresentadas por [Reed 1998] utilizando o índice de cor Johnson B-V [ESA(1997)]:

$$B - V = 0,344[\log(T)]^2 - 3,402\log(T) + 8,037 \quad \text{para } \log(T) \geq 3,916 \quad (1)$$

$$B - V = -3,684\log(T) + 14,551 \quad \text{para } \log(T) < 3,916 \quad (2)$$

onde T é a temperatura em kelvin, (B) e (V) são filtros especiais utilizados na composição do índice de cor Johnson. Cada filtro está posicionado em uma banda específica do espectro eletromagnético: (B) na região do azul e (V) na região do visível. Das equações empíricas 1 e 2 da relação entre o índice de cor e a temperatura efetiva da estrela, tem-se:

$$T = 10^{(3,402 - \sqrt{0,515088 + 1,376(B-V)}) / 0,688} \quad \text{para } -0,375 < (B - V) < -0,0411324 \quad (3)$$

$$T = 10^{((B-V) - 14,551) / -3,684} \quad \text{para } (B - V) \geq -0,041324 \quad (4)$$

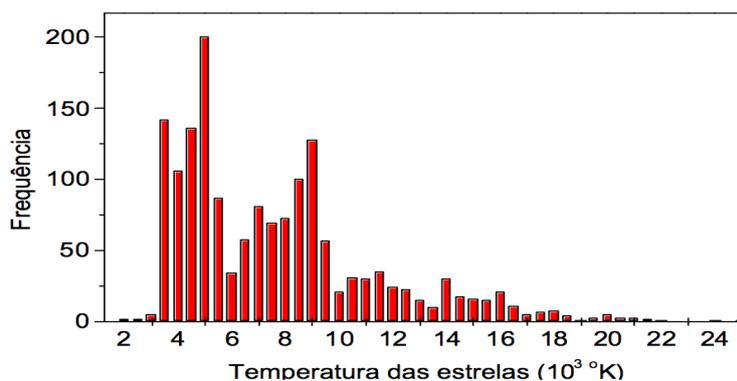


Figura 1. Histograma de temperatura das estrelas.

A Figura 1 apresenta o histograma com a distribuição das temperaturas das estrelas na faixa de magnitude zero a cinco. Diante dos resultados obtidos, percebeu-se que a temperatura média das estrelas que serão simuladas está próximo a 7500K e a maioria das

estrelas estão na faixa de temperatura entre 3000K e 20000K. A fonte de luz poderia ser desenvolvida utilizando lâmpadas de filamento, todavia estas não conseguiriam simular temperaturas acima de 3500K. Para simular temperaturas mais altas, uma das alternativas seria utilizar filtros espectrais projetados especificamente para esta tarefa. O problema com esta solução está na baixa eficiência luminosa e na dissipação de calor da lâmpada de filamento que pode deformar o colimador modificando assim a posição relativa da estrela durante os testes. Devido a esses fatores, foi decidido desenvolver uma fonte de luz multiespectral baseada em LEDs.

3. Escolha dos LEDs

O projeto da fonte de luz encontra-se na fase de definição da quantidade e tipo de LEDs. Foi selecionado e modelado 160 LEDs cobrindo a faixa espectral de 360 nm a 1000 nm baseando-se em modelos matemáticos apresentados em [Fryc et al. 2005a, Fryc et al. 2005b, CIE 2007]. A dificuldade neste processo foi em obter o fluxo espectral de cada LED, pois os manuais não trazem essa informação diretamente, e a informação de potência é fornecida em diferentes unidades, tais como: Candela, Watt, Watt/esferorradiano e Lumen. Usando todas as informações técnicas disponíveis, como curva espectral normalizada, diagrama de radiação, intensidade luminosa entre outros dados, foi estimada a potência espectral de cada um dos LEDs candidatos a serem usados no sistema.

A Figura 2 apresenta a distribuição espectral de potência SPD (de *Spectral Power Distribution*) dos 160 LEDs candidatos a serem utilizados na fonte de luz.

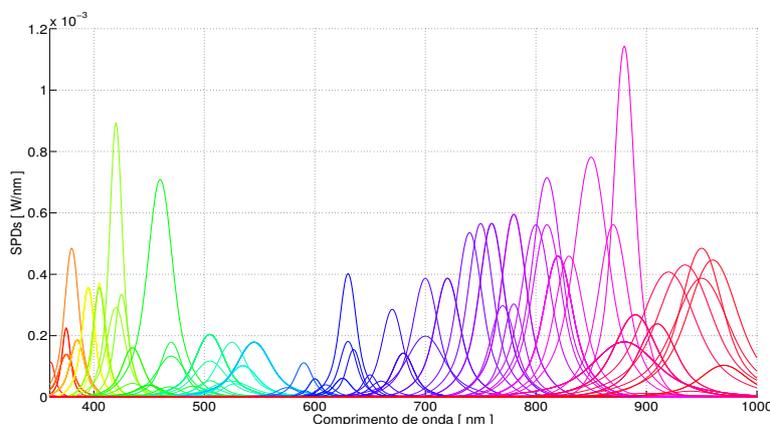


Figura 2. Distribuição espectral de potência de 160 LEDs candidatos.

O projeto deste sistema envolveu diversos cálculos radiométricos, sendo inicialmente definido as irradiâncias espectrais ($W/cm^2 nm$) desejadas na saída do colimador. Para essa tarefa, além da temperatura da estrela, também se fez necessário a utilização do conceito de magnitude de estrelas.

A magnitude de estrelas são quantidades comparativas, representadas por uma escala logarítmica. A magnitude visual pode ser representada pela Equação 5 [Allen 1973]:

$$m_{v1} - m_{v2} = 2,5 \log(p_2/p_1) \quad (5)$$

sendo

$$p = K_m \int V(\lambda) M(\lambda) d\lambda \quad \text{lumens}/m^2 \quad (6)$$

onde m_{v1} e m_{v2} são as magnitudes visuais de duas estrelas diferentes, e p_1 e p_2 suas respectivas intensidades de radiação. Sendo K_m igual a 683 lumens/W em 555 nm, $V(\lambda)$ a resposta do olho humano, e $M(\lambda)$ a irradiância espectral da estrela fora da atmosfera terrestre.

Segundo Allen (1973), a magnitude visual de uma estrela é igual a zero quando sua irradiância fora da atmosfera terrestre for de $4e^{-9} \text{ erg}/cm^2/s/\text{\AA}$. Com estas informações é possível obter a irradiância espectral de qualquer estrela sabendo sua magnitude e temperatura. A Figura 3 apresenta a irradiância espectral fora da atmosfera terrestre de uma estrela de magnitude zero e temperatura de 7500K utilizada nas simulações realizadas neste trabalho.

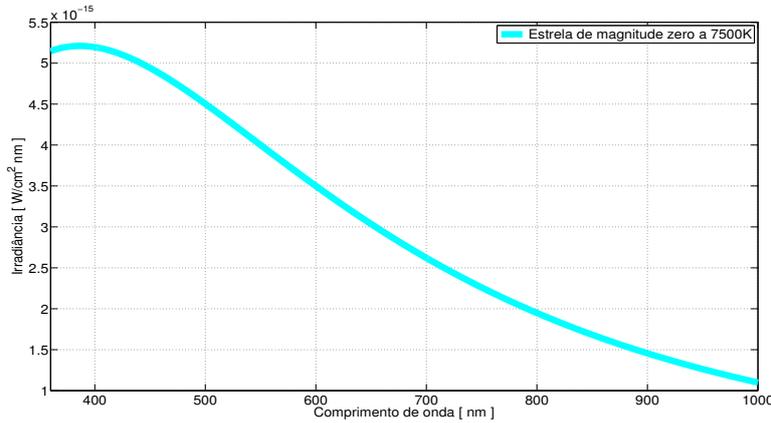


Figura 3. Irradiância espectral de uma estrela de magnitude zero a 7500K

O passo seguinte foi calcular a irradiância espectral na saída do colimador, dado o fluxo espectral de entrada na esfera integradora. As Equações 7 e 8 fornecem a radiância L ($W/cm^2 sr nm$) na saída da esfera integradora para um dado fluxo Φ_i e a irradiância na saída do colimador dado uma radiância em seu plano focal respectivamente:

$$L = \left(\frac{\phi_i}{\pi A_s} \right) \left(\frac{p}{(1-p) \left(1 - \left(\frac{A_i + A_e}{A_s} \right) \right)} \right) \quad (7)$$

onde A_s é área da casca da esfera integradora, A_i a área da porta de entrada da esfera integradora, A_e a área da porta de saída da esfera integradora e p o fator de reflectância interna da esfera.

$$E = 2 \pi L A_p \frac{1}{8 f^2 A_c} \quad (8)$$

onde A_p é a área do *pinhole*, A_c a área do feixe do colimador (porta de entrada da esfera integradora) e f : f do colimador.

Com isso, sabendo o fluxo espectral de cada LED acoplado à esfera integradora, é possível calcular a potência espectral na saída do colimador.

4. Algoritmo Genético e Otimização multiobjetivo

Problemas de otimização em engenharia normalmente são de natureza multiobjetivo, e muitas vezes com objetivos ou critérios conflitantes. A menos que haja uma função que defina a relação de importância entre os objetivos, eles devem ser tratados como igualmente valiosos. A maneira mais simples de se tratar diversos objetivos é o de transformar a função de adaptação em uma média ponderada dos vários objetivos $f = [f_1, \dots, f_k]$:

$$g(f) = \sum_{i=1}^k W_i x f_i \quad (9)$$

O conhecimento dos pesos w_i introduz, porém, uma nova questão: como quantificar a importância de cada objetivo em relação aos outros. O tratamento de alguns dos objetivos como restrições também é feito, todavia um dos perigos desta técnica é a de se restringir em excesso, ou de modo insuficiente, o espaço de soluções.

Foi testado o Algoritmo de Levenberg-Marquardt para o ajuste de curva, que é um dos objetivos do problema, e obteve-se um resultado excelente, porém com uma quantidade de 897 LEDs, que é uma solução inviável para o problema, uma vez que não haverá espaço para tal quantidade de LEDs na esfera integradora. Esse algoritmo é um método de otimização que procura o mínimo local em uma função, e em geral converge mais rapidamente que um algoritmo genético, todavia tendencioso a encontrar soluções sub-ótimas e em alguns casos não convergir.

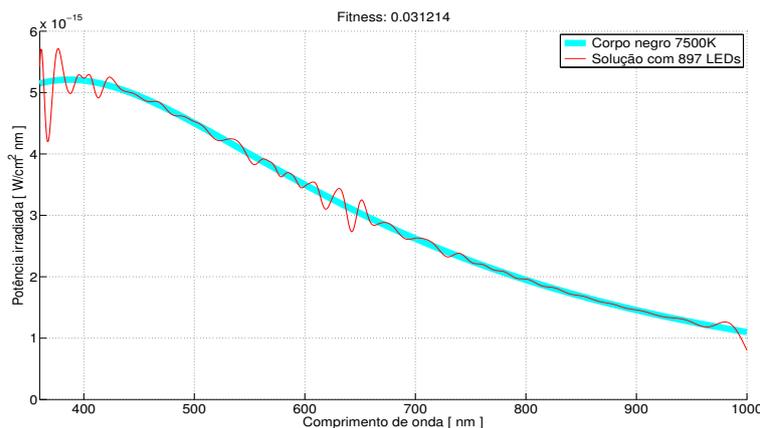


Figura 4. Ajuste de curva com Levenberg-Marquardt

Para viabilizar o projeto da fonte de luz é necessário minimizar o erro de ajuste de curva e o número de LEDs, e para essa tarefa de otimização multiobjetivo, optou-se em utilizar um Algoritmo Genético (AG), que constitui uma das mais conhecidas classes de algoritmos da Computação Evolutiva (CE).

5. Resultados e Discussões

Após o levantamento das informações técnicas e a modelagem dos LEDs, a definição da função de transferência do sistema esfera integradora, *pinhole* e colimador, e a modelagem da estrela a ser simulada, foi implementado a função objetivo e executado o NSGA-II no MATLAB. A Figura 6 apresenta a Fronteira de Pareto obtida através da execução do algoritmo, consumindo 50 horas e 43 minutos para o processamento. As configurações do algoritmo foram as padrões do MATLAB, alterando somente o tamanho da população inicial em 320 indivíduos e o número de gerações em 1000000 gerações.

Como esperado, o algoritmo gerou diferentes soluções viáveis, permitindo aos projetistas escolherem as melhores soluções de acordo com as limitações do projeto. Analisando a Fronteira de Pareto, é perceptível que a região de compromisso encontra-se entre 200 a 300 LEDs com ajuste de curva aceitável, apresentando erro quadrático menor que 0,05.

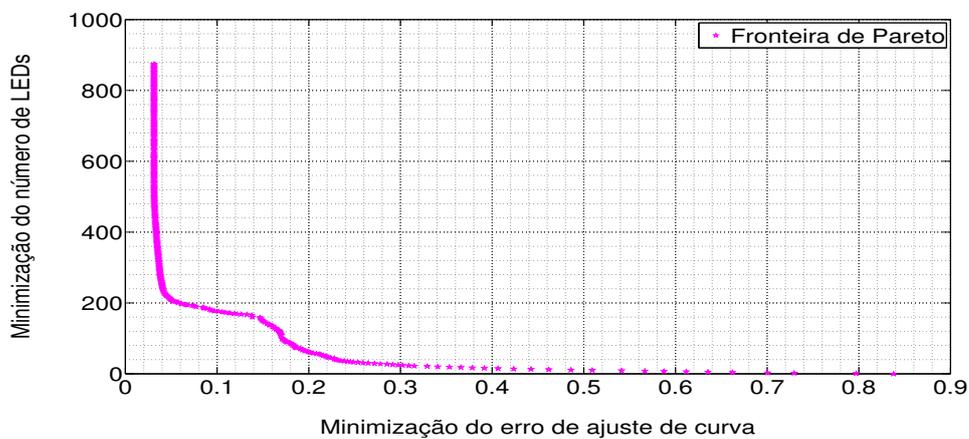


Figura 6. Fronteira de Pareto

A Figura 7 apresenta uma solução com 196 LEDs e um ajuste de curva razoável. Se comparado com a solução obtida com Levenberg-Marquardt (Figura 4), é evidente a diferença na quantidade de LEDs, pois com AG foi possível minimizar os dois objetivos.

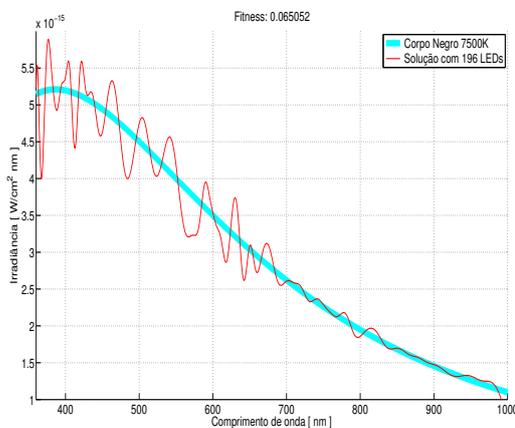


Figura 7. Sol. com 196 LEDs

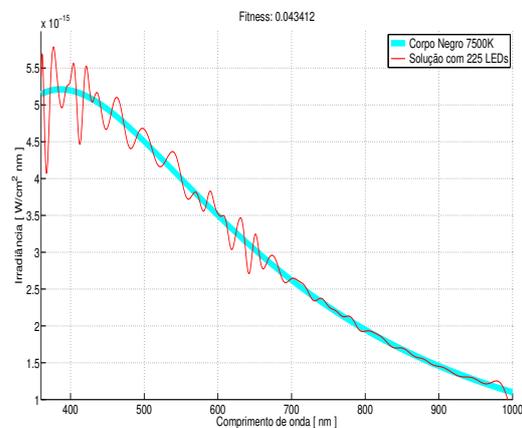


Figura 8. Sol. com 225 LEDs

6. Conclusão

Neste trabalho, foi proposto uma metodologia para otimização multiobjetivo que é a definição da quantidade e tipos de LEDs necessários para o simulador de estrelas. Procurou-se inicialmente resolver o problema utilizando métodos convencionais, todavia não se conseguiu resultados viáveis diante das dimensões e restrições de engenharia. Dessa forma, buscou-se uma solução com algoritmo genético, que apresentou resultados satisfatórios e aceitáveis, conforme apresentado ao longo desse artigo.

7. Agradecimentos

M. E. G. Borges agradece ao CNPq pelo auxílio financeiro e ao INPE por tornar este trabalho possível. Aos colegas da Divisão de Eletrônica Aeroespacial, e em especial aos amigos B. F. C. de Albuquerque e L. N. F. Guimarães por apoiarem este trabalho.

Referências

- Albuquerque, B. F. C. d. (2005). Estudo dos erros sistemáticos inerentes a um sensor de estrelas de cabeça fixa, quanto à localização relativa de estrelas. Master's thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Allen, C. W. (1973). Astrophysical quantities. *Great Britain: Willian Clowes*, 5941:310.
- Bertolino, M. A. (2004). Proposta de desenvolvimento de um sensor de estrelas autônomo. Technical report, São José dos Campos: INPE. (DEA-EO-005/2003).
- Bittencourt, G. (1998). *Inteligência Artificial*. Editora da UFSC, Florianópolis, 3 edition.
- CIE (2007). Measurement of leds. Technical report.
- Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA.
- ESA(1997). *The Hipparcos and Tycho catalogues*.
- Fialho, M. A. A. (2007). Estudo comparativo entre dois algoritmos de identificação de estrelas para um sensor de estrelas autônomo de campo largo. Master's thesis, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- Fryc, I., Brown, S. W., Eppeldauer, G. P., and Ohno, Y. (2005a). A spectrally tunable solid-state source for radiometric, photometric and colorimetric applications. *Optical Engineering*, 44(11).
- Fryc, I., Brown, S. W., and Ohno, Y. (2005b). Spectral matching with an led-based spectrally tunable light source. *Fifth International Conference on Solid State Lighting*, 5941:59411I-1 – 59411I-9. Proceedings of the SPIE.
- Lacerda, E. G. M. and Carvalho, A. C. P. L. (1999). Introdução aos algoritmos genéticos. In Galvão, C. and Valença, M. J. S., editors, *Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*, chapter 3, pages 99–150. Ed. Universidade/UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; 7.).
- Reed, B. C. (1998). The composite observational-theoretical HR diagram. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 1(92):36–37.