

Optimization of Street Lighting

Design following the Brazilian Standard using PSO

Lucas Eduardo Dorneles Antunes
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Pampa
Alegrete, Brasil
lucas.dornelesantunes@gmail.com

Eduardo Machado dos Santos
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Pampa
Alegrete, Brasil
eduardosantosufsm@gmail.com

Jefferson Oliveira dos Santos
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Pampa
Alegrete, Brasil
jeffersonoliveiradosantos@gmail.com

Vitor Cristiano Bender
Departamento de Eletrônica e
Computação
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
bender.vitor@gmail.com

João Plínio Juchem Neto
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Pampa
Alegrete, Brasil
plinio@unipampa.edu.br

Abstract- This paper presents the development of a script that uses the particle swarm optimization (PSO) in order to maximize the energy efficiency of a street lighting system. The proposed script is based on Brazilian standard NBR 5101-2012. The script validation is carried out with Dialux, a commercial software widely employed in street lighting projects. The implementation of PSO method is based on a lighting mathematical procedure. The calibration of some parameters of the method is also performed. The obtained results show that the proposed script was able to maximize the energy efficiency in agreement with the standard requirements. Additionally, an inverse relationship between uniformity and energy efficiency was observed.

Keywords—*design, street lighting, particle swarm optimization, NBR 5101 standard.*

I. INTRODUÇÃO

No Brasil, o consumo de energia elétrica passou de 38 GWh, em 1970, para a 465,2 GWh, em 2015, apresentando um crescimento de, aproximadamente, 3,5% ao ano durante a última década. O consumo com iluminação pública (IP) representa uma parcela significativa, correspondendo a, aproximadamente, 3% do total, sendo, em 2015, de 15,33 GWh [1].

Dessa forma, a otimização da infraestrutura da IP pode contribuir para a redução do consumo energético total. Para tanto, faz-se necessária a efficientização de tais sistemas, atendendo aos requisitos qualitativos e quantitativos mínimos especificados pelas normas regulamentadoras vigentes [2].

A iluminação pública tem carácter essencial na segurança dos usuários de uma via. Uma iluminação adequada é essencial para manter o desempenho visual do usuário em nível suficiente durante a noite. Muitos acidentes automobilísticos ocorrem em virtude da sonolência provocada pela IP deficiente. Assim, uma iluminação adequada pode contribuir para a manutenção da acuidade visual e atenção dos motoristas, dado que uma iluminação adequada influencia neurologicamente o condutor [2]. A iluminação adequada da via também pode reduzir o número de acidentes noturnos em mais de 30% [3], desse modo,

ressalta-se a importância dos projetos de IP atenderem às normas vigentes.

Existem diversos meios para alcançar uma melhora da eficiência energética do sistema de iluminação pública. O mais comumente utilizado é o projeto manual de IP, no qual são calculados os parâmetros necessários para iluminação de cada via, atendendo aos requisitos mínimos estabelecidos pelas normas, com diferentes configurações de seus componentes: potências, curvas fotométricas e inclinação de luminárias; distância entre postes; altura do poste; recuo em relação ao meio-fio. Porém, tais projetos manuais estão diretamente relacionados com a experiência do projetista, processo que não gerará, necessariamente, a configuração que se forneça a maior eficiência energética possível.

Atualmente, existem no mercado diversos *softwares* que calculam os parâmetros exigidos para um projeto de iluminação, como DiaLux®, AGI32®, Calculux®, Relux®. Entretanto, esses softwares têm como dados de entrada as configurações da via, de modo que não exigem a experiência do projetista.

A otimização de projetos de IP pelo uso de algoritmos genéticos (AG) foi proposta em [4], com o objetivo de minimizar o custo total do projeto, entretanto, sem considerar a eficiência energética, mas satisfazendo a norma brasileira ABNT NBR-5101/2012. Para avaliar os resultados do algoritmo proposto, os testes foram realizados com base nas características de algumas vias no estado do Sergipe, com a distribuição dos postes: unilateral, bilateral oposto e central. O AG implementado forneceu como solução a altura do poste, o número de luminárias por pétalas, a orientação, tamanho do braço, modelos da luminária e potência das lâmpadas usadas que geravam o investimento de menor custo

Em [5] foi utilizado AG para otimizar projetos de IP, objetivando maximizar, simultaneamente, a eficiência energética e a uniformidade global da iluminação, utilizando um algoritmo evolutivo multiobjetivo e seguindo a normativa espanhola *Royal Decree 1890/2008- Energy Efficiency for*

outdoor Lighting installations. Em [5] foi encontrada uma relação funcional inversa entre uniformidade global e eficiência energética.

A otimização por enxame de partículas (PSO), aplicada em projetos de iluminação pública, foi utilizada em [6], no qual o objetivo foi o de estudar os parâmetros do PSO para obter a configuração de via com a maior eficiência energética, seguindo o decreto espanhol *Royal Decree 1890/2008- Energy Efficiency for outdoor Lighting installations*.

O objetivo geral do presente trabalho consistiu em maximizar a eficiência energética de projetos de iluminação pública, utilizando o método de otimização por enxame de partículas (PSO) e respeitando as restrições da Norma Regulamentadora Brasileira de Iluminação Pública ABNT NBR-5101/2012.

Esse artigo está estruturado da seguinte forma: na segunda seção é abordada a iluminação, mostrando seus conceitos básicos, normas vigentes e validação do script; na terceira seção é apresentado o método de otimização por enxame de partículas e a calibração de seus parâmetros; na quarta seção são apresentados e analisados os resultados obtidos e, por fim, na quinta seção são apresentadas as conclusões do trabalho.

II. ANÁLISE TÉCNICA DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

O *script* de otimização de projetos de IP proposto foi primariamente baseado na luminotécnica, que é o estudo da aplicação de iluminação artificial em espaços interiores ou exteriores e posteriormente na otimização por exame de partículas, visando a simulação do comportamento de enxames encontrados na natureza em certos tipos de bandos de animais. Assim utilizando os dois conceitos anteriores com a finalidade de encontrar o resultado ótimo para um problema específico. A fim de facilitar o entendimento da metodologia empregada nessa seção são apresentados os conceitos de algumas grandezas da luminotécnica e normativas para iluminação pública.

A. Luminotécnica para Sistemas de Iluminação Pública

Como o objetivo do *script* foi a maximização da eficiência energética, foi necessário compreender detalhadamente a malha de medição, ilustrada na Fig. 1, pois com as coordenadas cartesianas contidas na malha calculou-se a iluminância, possibilitando, desse modo, o cálculo da eficiência energética. Tal procedimento será detalhado nessa seção.

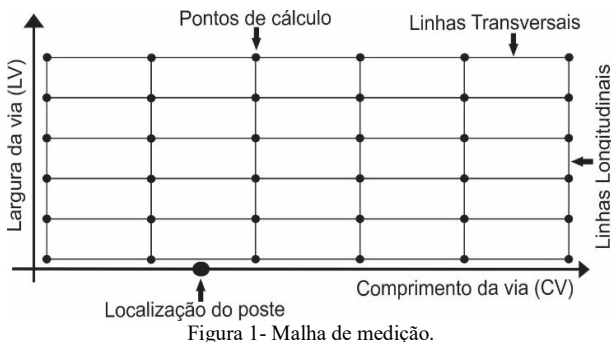


Figura 1- Malha de medição.

Na malha de medição, linhas transversais e longitudinais foram dispostas com espaçamentos de 1 metro e cada ponto de

intersecção foi o local de cálculo da iluminância, tendo uma coordenada (x, y).

Em cada coordenada (x, y), o eixo das abcissas foi o comprimento da via (CV) e o eixo das coordenadas foi a largura da via (LV). Para cada ponto foi calculada a iluminância dada por (1).

$$E = \frac{\Phi_L}{1000} * \sum \frac{I(C, \gamma)}{(H^2)} * \cos^3 \gamma * FM \quad (1)$$

Onde:

E : Iluminância (Lux);

Φ_L : Fluxo luminoso (Lúmens);

$I(C, \gamma)$: Intensidade luminosa (Candela).

FM : Fator de Manutenção (Adimensional);

h : Altura de Montagem da luminária (Metros).

O fluxo luminoso (Φ_L) e a intensidade luminosa $I(C, \gamma)$ para calcular a iluminância foram obtidos por meio de um arquivo fotométrico, em formato IES, que, geralmente, é cedido pela fabricante. A intensidade luminosa foi obtida através de uma tabela de intensidade luminosas ou diagrama polar.

Para encontrar o valor da intensidade luminosa $I(C, \gamma)$, na tabela cedida pelos fabricantes das luminárias, foi necessário substituir o sistema de coordenadas cartesianas para o sistema de coordenadas esféricas, como exemplificado na Fig.2

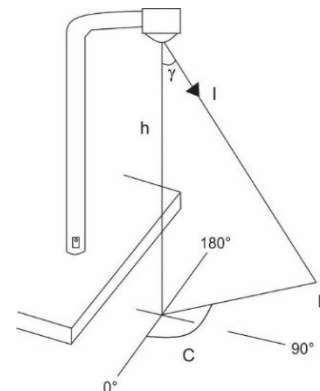


Figura 2- Sistema de coordenadas utilizado.

Essa conversão de sistemas de coordenadas foi realizada substituindo a coordenada x e y de cada ponto da malha de medição por um equivalente C , chamado de azimute fotométrico, representando ângulos sobre o plano horizontal e γ sendo os ângulos do plano vertical em relação ao eixo fotométrico da luminária, utilizando (2-3).

$$C = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \quad (2)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{H} \right) \quad (3)$$

Com os valores de C e γ calculados, o próximo passo foi buscar o valor de intensidade luminosa (I) na tabela que tem seu eixo das coordenadas em função de γ e o eixo das abcissas em função de C .

Por vezes os valores obtidos não estavam contidos na tabela, então utilizou-se interpolação para encontrar o valor de intensidade correto para o conjunto de C e γ .

Com a iluminância calculada pode-se encontrar a iluminância média simplesmente calculando a média aritmética entre os pontos da malha. A iluminância mínima foi o menor valor e a iluminância máxima foi o maior valor entre todos os pontos calculados na malha. Assim, chegou-se a outra característica importante, a uniformidade da iluminância da via.

A uniformidade da iluminância na via em um sistema de iluminação bem projetado deve proporcionar simetria, isto é, distribuição igualitária de luzes na superfície [7]. É definida como a razão entre a iluminância mínima e média da via e pode ser obtida por meio de (4).

$$U_0 = \frac{E_{min}}{E_{med}} \quad (4)$$

Finalmente, pode-se encontrar a eficiência energética. Nesse trabalho, foi utilizado a mesma definição citada em [5] e [6], visualizado em (5).

$$\varepsilon = \frac{S \cdot E_{med}}{Pot_Inst} \quad (5)$$

Onde:

ε : Eficiência Energética ($\frac{m^2 \times Lux}{W}$);

S : Área total da via (m^2);

E_{med} : Iluminância média (Lux);

Pot_Inst : Potência total instalada na via (W).

B. NBR 5101 - Iluminação Pública

A norma que rege a iluminação pública no Brasil é a ABNT NBR-5101/2012, definindo requisitos considerados como mínimos necessários à iluminação de vias públicas, os quais são destinados a proporcionar nível adequado de segurança aos pedestres e ao tráfego de veículos.

As classificações de iluminância estão divididas em classes de V1 a V5 para veículos, sendo V1 tráfego de veículos fraco e V5 tráfego de veículos intenso. A Tabela I mostra os níveis necessários para cada tipo de via.

Tabela I- Requisitos mínimos da norma para veículos [8].

Classe de Iluminação	Iluminância Média (Lux)	Uniformidade Mínima
V1	30	0,4
V2	20	0,3
V3	15	0,2
V4	10	0,2
V5	5	0,2

Esses requisitos qualitativos foram as restrições do problema de otimização que será apresentado na Seção IV.

Com os conceitos e critérios apresentados, pode-se projetar um sistema de iluminação que, tipicamente, é dimensionado pela experiência do projetista, utilizando os softwares supracitados e baseando-se na técnica de tentativa e erro. A vantagem de utilizar um método de otimização está em testar inúmeras configurações possíveis para a via desejada, procurando encontrar a configuração ótima, isto é, a que apresenta a melhor eficiência energética de forma automática a partir das iterações do algoritmo.

C. Validação

Após a implementação da parte de cálculos luminotécnicos do script, realizou-se uma validação. Tal validação foi realizada com auxílio de uma ferramenta amplamente utilizada e consolidada por engenheiros e projetistas de iluminação, sendo disponibilizada livremente no site do fabricante [9].

Foram comparados os resultados dos parâmetros de uniformidade, de iluminância máxima, de iluminância mínima e iluminância média para uma via específica, obtidos através do script de cálculos luminotécnicos e software Dialux®.

Realizou-se simulações para luminária da fabricante General Electric Lighting (GE). Os arquivos IES da GE estão disponibilizados no site da empresa na seção *road and street e outdoor lighting*. A configuração utilizada foi:

- Comprimento da via: 30 metros;
- Largura da Faixa de rolagem: 3 metros;
- Número de Faixas de rolagem: 2 faixas;
- Altura de montagem: 5 metros;
- Distância entre postes: 30 metros

Na Tabela II pode ser visualizado os dados fornecidos pela GE utilizados na validação. Na Fig. 3 visualiza-se a curva de distribuição luminosa da luminária, gerada a partir do software IES Viewer®.

Tabela II- Luminárias utilizadas na validação.

Fabricante	Luminária	Potência (W)	Fluxo Luminoso (lm)
GE	Euro 2	70	6600

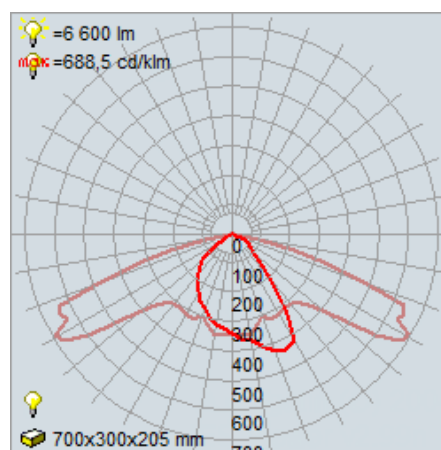


Figura 3- Curva de distribuição luminosa GE Euro 2.

Os valores de iluminância e uniformidade obtidos pelo script foram próximos aos valores simulados no Dialux®, como apresentado na Tabela III. Foi utilizado fator de manutenção unitário para todos os testes.

Tabela III- Comparação de resultados para luminária da GE.

Parâmetros	Script	Dialux®
Emax (Lux)	35,8976	38,0000
Emin (Lux)	1,1304	1,0600
Emed (Lux)	11,3556	11,0000
U0 (Lux)	0,0995	0,0930

O erro médio foi, aproximadamente, 8,5%, sendo obtido por meio da comparação da diferença entre o valor de cada ponto da malha calculada Fig. 1 pelo *script* com os valores obtidos pela grade do Dialux®. Na literatura, erros de até 10% são considerados aceitáveis [5].

As pequenas diferenças entre os parâmetros, resultando em um erro dentro da faixa desejada, mostraram a precisão do *script* proposto em relação a um software consolidado no mercado de projetos de IP.

III. MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO – PSO

O método de otimização escolhido para implementação foi a Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO). Trata-se de um método que vêm sendo utilizado para resolução de problemas de otimização em diversas áreas da engenharia. O PSO apresenta alta velocidade de convergência, além de simplicidade de implementação [10].

O PSO foi introduzido por [11] para resoluções de problemas no domínio contínuo. O algoritmo baseia-se no comportamento social de grupos, como um bando de pássaros ou um cardume de peixes ou até mesmo do comportamento social humano. A ideia básica do PSO é a troca de informações entre o local e o global, ou seja, considerar a perspectiva de cada partícula e a perspectiva social do enxame em busca de uma solução ótima.

No algoritmo, os indivíduos foram representados por partículas que se movem em um espaço de busca no R^n , as variações nas características de posição e velocidade dessas partículas levam às novas posições no espaço de busca, ou seja, representam a movimentação no espaço [12]. O algoritmo 1, descreve o pseudocódigo do método que foi a base para o *script* completo.

A atualização da velocidade de cada partícula foi obtida através de (6)

$$V_{k+1}^i = w \cdot V_k^i + \varphi_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot (p^i - x_k^i) + \varphi_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot (p_k^s - x_k^i) \quad (6)$$

Onde:

V_k^i = velocidade atual da partícula;

x_k^i = posição atual da partícula i na iteração k;

p^i = é a melhor posição encontrada pela partícula i;

p_k^s = é a melhor posição de todas as partículas na iteração k;

w = representa a inércia da partícula;

φ_1 = fator cognitivo;

φ_2 = fator social;

ε_1 e ε_2 = números aleatórios com distribuição uniforme no intervalo [0,1].

E a atualização da posição foi realizada por (7)

$$x_{k+1}^i = x_k^i + V_{k+1}^i \quad (7)$$

Onde:

x_{k+1}^i = é a posição de cada partícula i na iteração k+1;

V_{k+1}^i = vetor de velocidade da partícula.

```

1 início
2   Inicializa o enxame aleatoriamente
3   Avaliação da função custo
4   Armazena  $P_{best}$  e  $G_{best}$ 
5   t=0
6   para t < iterações máximas faça
7     Atualiza Velocidade
8     Atualiza Posição
9     Avalia a função custo novamente
10  fim
11  Armazena  $P_{best}$  e  $G_{best}$ 
12 fim

```

Figura 4- Algoritmo do PSO.

A. Calibração das variáveis do PSO

Após a implementação do método de otimização, utilizando o *script* de cálculos luminotécnicos como função *fitness*, procedeu-se a calibração de alguns parâmetros do PSO, maximizando a iluminância média e utilizando as variáveis de controle: altura de montagem, inclinação da luminária, espaçamento entre poste e recuo em relação ao meio fio.

Para cada parâmetro calibrado foram executados 20 experimentos, pelo motivo de não ser um método determinístico, assim, não garantiria o melhor resultado em apenas uma execução. Para o número de partículas e gerações foram realizados testes com valores de 10 a 100, em intervalos de 10. Para o fator de inércia foram testados valores de 0,7 a 1,2, em intervalos de 0,1.

O primeiro parâmetro a ser calibrado foi o número de partículas. Os resultados de iluminância média foram analisados e para escolha do melhor valor foi implementado por (9).

$$Eficiência\ Eméd = \frac{Eméd}{Tempo} \quad (8)$$

Por fim, concluiu-se que utilizando o número de partículas igual a 20 obteve-se maior eficiência.

O segundo parâmetro a ser calibrado foi o de gerações. O método do PSO geralmente é utilizado com critério de parada configurado pelo máximo de iterações. Após a escolha do número de partículas, foi implementado um critério de parada para o *script*. Esse critério verificava se o erro nas últimas n gerações era menor que a tolerância definida. Após a avaliação dos valores obtidos, concluiu-se que a maior eficiência foi atingida utilizando o valor de 50 gerações.

Realizada a mesma análise anterior para o fator de inércia, sendo que a definição do fator de inércia é o peso dado a velocidade anterior. A melhor eficiência foi encontrada utilizando o valor de 1, assim, ficou configurado para tal valor.

IV. RESULTADOS

Todas as simulações computacionais foram realizadas utilizando o Matlab R2015a® executado em um computador com processador Intel® Core™ i7-5500U, de 2.4Ghz e 8GB de RAM.

Realizou-se a maximização da eficiência energética, utilizando as variáveis de controle: altura de montagem (h), distanciamento entre postes (s), recuo (recuo) e inclinação da luminária (delta), como ilustrado na Fig.5.

As simulações foram realizadas utilizando as seguintes configurações de via:

- Comprimento da via: 500 metros;
- Largura da Faixa de rolagem: 3 metros;
- Número de Faixas de rolagem: 2 faixas.

Também foram fixados alguns parâmetros do PSO:

- Número de partículas: 20 partículas;
- Critério de parada: 50 gerações;
- Fator Cognitivo e Social: 2;
- Fator de Inércia: 1;
- Velocidade Máxima: 5.

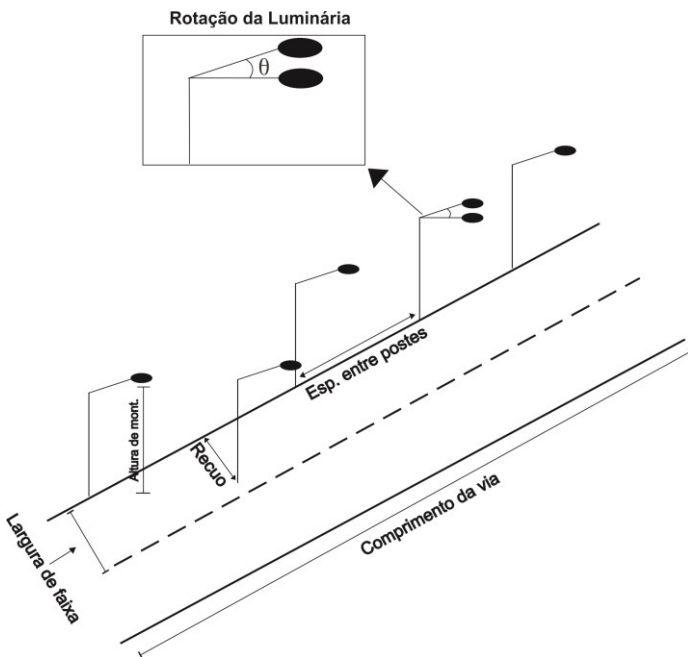


Figura 5- Variáveis de Controle.

Primeiramente, maximizou-se a eficiência para uma via de classe V5, considerando os valores mínimos exigidos, em todas as classes, de iluminância média, iluminância mínima e uniformidade e utilizando de uma luminária da GE Euro 2 70W. Visualizou-se o problema de otimização em (9).

$$\begin{aligned} & \underset{h,s,\theta,recuo}{Max.} \quad \varepsilon_2(h,s,\theta,recuo) \\ & s.a \quad \begin{cases} 5 \leq h \leq 15; 5 \leq s \leq 30; \\ 0 \leq \theta \leq 60; 0 \leq recuo \leq 3 \\ Eméd \geq 5; Emin \geq 1; U0 \geq 0,2 \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

Posteriormente, realizou-se a execução do problema de otimização, considerando as restrições da via de classe V1, pois essa via é a mais criteriosa, assim, sujeitando o *script* a maximizar a eficiência energética com as piores restrições possíveis, como exemplificado em (10).

$$\begin{aligned} & \underset{h,s,\theta,recuo}{Max.} \quad \varepsilon_2(h,s,\theta,recuo) \\ & s.a \quad \begin{cases} 5 \leq h \leq 15; \\ 5 \leq s \leq 30; \\ 0 \leq \theta \leq 60; \\ 0 \leq recuo \leq 3; \\ Eméd \geq 30; \\ Emin \geq 1; \\ U0 \geq 0,4. \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

Os resultados para os dois casos encontram-se na Tabela IV. Nota-se que nos dois casos foram respeitados os requisitos mínimos exigidos por norma.

Tabela IV- Resultados Eficiência Energética.

	Efi V5	Efi V1
Número de Postes (Unid.)	25,00	42,00
Posição Inicial (m)	9,97	5,52
Altura de Montagem (m)	5,00	5,00
Inclinação (°)	5,11	0,36
Distância entre postes (m)	20,00	11,93
Recuo do poste (m)	0,92	1,81
Iluminância mínima (Lux)	10,66	21,05
Iluminância média (Lux)	31,14	52,07
Iluminância máxima (Lux)	58,34	81,85
Uniformidade	0,34	0,40
Eficiência Energética	53,38	53,13
Iterações	401,00	340,00
Tempo (s)	958,67	4257,83
Total de iterações	7068,00	5846,00

O número de postes, em relação ao primeiro, foi maior para o segundo caso, pois para proporcionar uma maior uniformidade na via precisava-se ajustar a proporção entre iluminância mínima e média. Consequentemente, com o maior número de poste e o comprimento da via sendo fixo, o espaçamento entre os postes iria diminuir na mesma proporção

Na Fig. 6 (b) visualiza-se uma melhor uniformidade em relação a Fig. 6 (a), devido ao resultado do segundo caso ter sido maior. Além disso, percebe-se que o nível de iluminância mínima aumentou consideravelmente no segundo caso, desse modo, minimizou-se a área de menor incidência de iluminância.

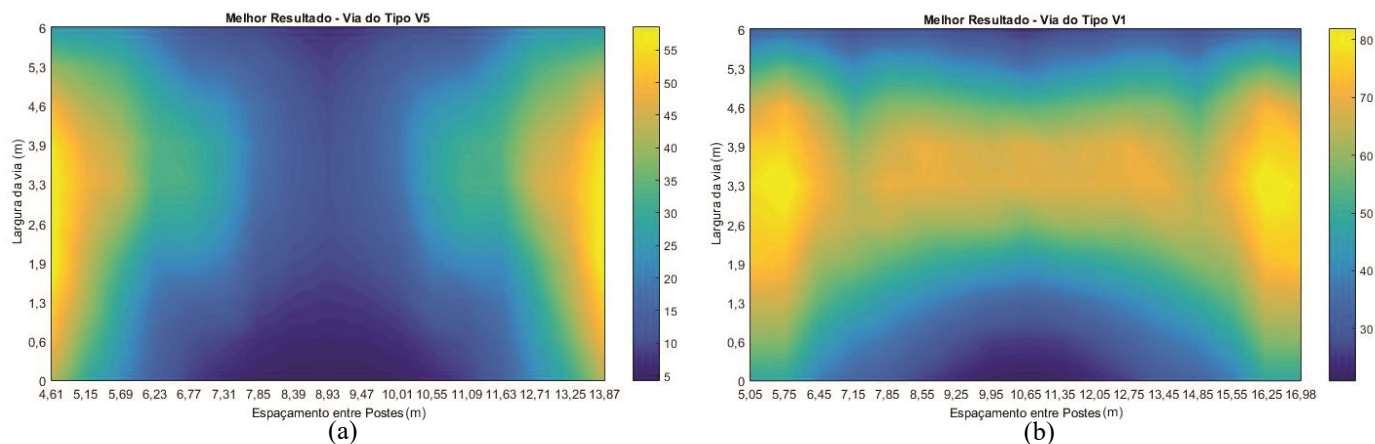


Figura 6- (a) Diagrama de Intensidade Luminosa Via do Tipo V5 e (b) Diagrama de Intensidade Luminosa Via do Tipo V1.

Percebe-se que nos dois casos os valores de eficiência energética foram semelhantes, mesmo a uniformidade sendo maior no segundo caso, isso deve-se ao fato do segundo caso levar 4,4 vezes mais tempo para encontrar uma configuração que atendesse a norma e encontrasse um valor de eficiência energética próxima ao primeiro caso.

V. CONCLUSÃO

Primeiramente, implementou-se um *script* para calcular iluminância média, uniformidade e eficiência energética, considerando a norma vigente no Brasil NBR 5101 (2012). Posteriormente a essa implementação, foi realizada uma comparação de resultados em um caso com via e luminária específica, com resultados obtidos por meio do software Dialux, validando o *script* de cálculos luminotécnicos.

Após a validação, aplicou-se o método de otimização por enxame de partículas, utilizando o *script* de cálculos luminotécnicos como função custo, com a finalidade de maximizar a eficiência energética. Então, procedeu-se a calibração de alguns parâmetros do método e concluiu-se que os melhores valores para serem utilizados eram de 20 partículas, 50 gerações e fator de inércia configurado em 1.

O próximo passo foi maximizar a eficiência energética, utilizando um problema de otimização com restrições com as variáveis de controle, sendo elas: altura de montagem, inclinação, recuo da luminária e espaçamento entre postes. Portanto, foram realizadas simulações para as duas classes de iluminação - V1 a mais criteriosa e V5 a menos criteriosa da norma.

Encontrou-se uma clara relação inversa entre eficiência energética e uniformidade, pois quando se necessitou de uma maior uniformidade a eficiência energética diminuiu. Entretanto, mesmo com a diminuição da eficiência energética, observou-se um ganho significativo na iluminância média e mínima da via, como notado em [5].

Contatou-se que nos dois casos foram testados mais de doze mil casos diferentes para uma via e luminária específicas. Desse modo, encontrou-se a melhor configuração possível para maximizar a eficiência energética. Tal fato evidenciou a importância do uso do método de otimização em um projeto de iluminação pública, podendo suprir a carência por softwares

otimizadores de projetos e auxiliando o projetista a encontrar, dentro de inúmeras configurações, a que melhor se adapte ao problema e que respeite a norma vigente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UNIPAMPA e à CAPES pelo apoio financeiro concedido a essa pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] EPE, "Anuário Estatístico de Energia Elétrica", Empresa de Planejamento Energético, 2016.
- [2] R. Elvik, The handbook of road safety measures. Bingley: Emerald, 2014.
- [3] W. van Bommel, *Road Lighting*. Cham: Springer International Publishing, 2015..
- [4] R. de Oliveira, M. de Medeiros Júnior and R. Menezes, "Application of genetic algorithm for optimization on projects of public illumination", *Electric Power Systems Research*, vol. 117, pp. 84-93, 2014.
- [5] D. Gómez-Lorente, O. Rabaza, A. Espín Estrella and A. Peña-García, "A new methodology for calculating roadway lighting design based on a multi-objective evolutionary algorithm", *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 6, pp. 2156-2164, 2013.
- [6] A. Castillo-Martínez, J. Ramon Almagro, A. Gutierrez-Escolar, A. del Corte, J. Castillo-Sequera, J. Gómez-Pulido and J. Gutiérrez-Martínez, "Particle Swarm Optimization for Outdoor Lighting Design", *Energies*, vol. 10, no. 12, p. 141, 2017.
- [7] CIE 140, "Technical Report: Road lighting calculations", ed. 2000.
- [8] ABNT-NBR-5101:2012, "Iluminação Pública – Procedimento", ed. 2012.
- [9] D. GmbH, "DIALux Download - DIAL", 2018. [Online]. Available: <https://www.dial.de/en/software/dialux/download>. [Accessed: 22- Aug-2017].
- [10] A. Siciliano, "Algoritmos Genéticos e Particle Swarm Optimization e suas aplicações problemas de Guerra Eletrônica", presented at *IX SIGE - Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa*, São José dos Campos, 2007.
- [11] R. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory", *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*.
- [12] A. Serapião, "Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral", *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, vol. 20, no. 3, pp. 271-304, 2009.