

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

Lucas Eduardo Dorneles Antunes

**Projetos de Iluminação Pública utilizando
Otimização por Enxame de Partículas**

Alegrete

Abril, 2018

Lucas Eduardo Dorneles Antunes

Projetos de Iluminação Pública utilizando Otimização por Enxame de Partículas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: João Plínio Juchem Neto

Coorientador: Vitor Cristiano Bender

Alegrete

Abril, 2018

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

A363p Antunes, Lucas Eduardo Dorneles
Projetos de Iluminação Pública utilizando Otimização por
Enxame de Partículas / Lucas Eduardo Dorneles Antunes.
96 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 2018.

"Orientação: João Plínio Juchem Neto".

1. Iluminação Pública. 2. Otimização por Enxame de
Partículas. 3. Projetos de Iluminação Pública. I. Título.

LUCAS EDUARDO DORNELES ANTUNES

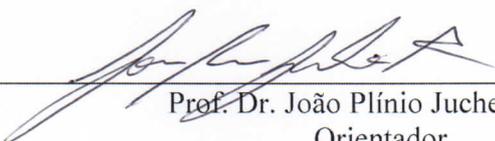
PROJETOS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA UTILIZANDO
OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
Stricto Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

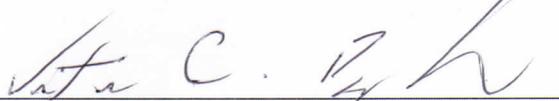
Área de concentração: Sistema de Energia

Dissertação defendida e aprovada em: 27, Abril de 2018.

Banca examinadora:



Prof. Dr. João Plínio Juchem Neto
Orientador
(UFRGS)



Prof. Dr. Vitor Cristiano Bender
Co-orientador
(UFSM)



Prof. Dr. Rafael Adaime Pinto
(UFSM)



Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos
(UNIPAMPA)

*Dedico este trabalho à minha família,
por todo apoio, força e paciência.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por toda a força e fé nas horas necessárias.

Aos meus pais, pelo esforço em proporcionar-me a oportunidade de cursar a pós-graduação, que por várias vezes se mostra muito complicada e inóspita. Por todas as palavras de conforto e ajuda nas horas difíceis. Tenham certeza que só estou nessa etapa da vida por causa do amor de vocês.

Aos meus orientadores, João Plínio Juchem Neto e Vitor Cristiano Bender por toda ajuda durante esses dois anos de muito trabalho. Grande parte do trabalho só foi possível através dos conhecimentos, ensinamentos e paciência que tiveram comigo.

Também aos meus colegas, pela amizade e parceira nas várias e intermináveis horas de estudos. E toda vez que me sentia triste ou desmotivado, era só observá-los que logo esse sentimento passava.

A minha companheira e namorada, por me dar força e ajuda com palavras sábias e de experiência. Por ter compreensão em todas as horas que não pude estar presente.

A todos que, diretamente ou indiretamente, me ajudaram a passar mais essa etapa da vida, porque o que seria de nós se não houvesse amor ao próximo.

*Uma pessoa que nunca cometeu um erro
nunca tentou algo diferente.*

Albert Einstein

Resumo

O objetivo deste trabalho é maximizar a eficiência energética de projetos de iluminação pública, considerando os parâmetros e requisitos mínimos exigidos na norma brasileira NBR 5101 (2012), através do método de otimização por enxame de partículas (PSO). Em seu desenvolvimento, apresenta-se a metodologia de construção de um script para cálculos luminotécnicos em ambiente Matlab® e, posteriormente, é apresentada uma comparação dos seus resultados com os obtidos através do software comercial Dialux®. A partir dessa comparação se mostram que os erros médios entre os resultados obtidos foram menores que 10%, validando assim o script. Após esta validação, foi implementado o método de otimização por enxame de partículas com critério de parada, utilizando o script de cálculos luminotécnicos como função custo. Para tal, realizou-se a calibração dos parâmetros do PSO, sendo que os melhores resultados foram obtidos utilizando-se um enxame com 20 partículas, fator de inércia unitário e 50 iterações para a estimação do erro relativo a ser utilizado no critério de parada. Os resultados de maximização da eficiência energética, utilizando uma configuração de via fixa, duas luminárias diferentes e o domínio contínuo e discreto para as variáveis de controle foram apresentados em dois casos: sem considerar e considerando a norma brasileira. Por um lado, quando a norma não é considerada, os resultados apresentaram níveis maiores de eficiência energética, embora geralmente não satisfazendo os valores mínimos de uniformidade exigidos pela norma brasileira. Por outro lado, quando foi considerada a norma, obtiveram-se níveis de eficiência menores, mas respeitando-se os valores mínimos exigidos para cada classe de iluminação. De fato, se constatou uma relação inversa entre eficiência energética e uniformidade, com maiores níveis de eficiência implicando em menores valores de uniformidade. Além disso, o script convergiu mais rápido para o resultado quando se considerou o domínio discreto das variáveis de controle. Após a obtenção e análise dos resultados, concluiu-se que é viável a utilização do método de otimização por enxame de partículas na otimização da eficiência energética de projetos de iluminação pública. A configuração final obtida, resultado da análise de milhares de alternativas possíveis, apresentará eficiência energética máxima, respeitando a norma brasileira vigente. Desta forma, tal metodologia se constitui em ferramenta útil no auxílio ao projetista de projetos de iluminação pública.

Palavras-chaves: Projetos de iluminação pública, Otimização, PSO, NBR 5101

Abstract

The objective of this work is to maximize the energetic efficiency of public lighting projects through the particle swarm optimization method (PSO), and considering the Brazilian standard NBR 5101 (2012). It is presented the development of a MATLAB script in order to carry out lighting calculations, whose results were validated with those obtained on the commercial software Dialux. The mean difference between both results were below 10%. Then the particle swarm optimization with stopping criterion was implemented, using the lighting calculation script as the cost function. After calibration, best results were obtained using 20 particles, unitary inertial factor, and 50 iterations for the relative error estimation in the stopping criterion. The results of the maximization of the energetic efficiency, using a fixed length street, two distinct luminaries, and continuous and discrete domains for the control variables, were presented in two cases: considering, and not considering the Brazilian standard. On the one hand, when the standard is not considered, the results presented higher levels of energetic efficiency, although not satisfying the minimum values for the uniformity required by the standard. On the other hand, when the standard is considered, the results presented lower levels of energetic efficiency, but satisfying the minimum uniformity values required by each lighting class in the standard. In fact, it was found an inverse relation between energetic efficiency and uniformity, with higher levels of efficiency implying in lower levels of uniformity. Moreover, the script converged faster to the results when was considered the discrete domain for the control variables. After the analysis of the results, the conclusion is that is viable the use of the particle swarm optimization method in the optimization of the energetic efficiency of public lighting projects. The final configuration obtained, result of the analysis of thousands of possible alternatives, shows maximum energetic efficiency, satisfying the actual Brazilian standard. Therefore, this methodology is an useful tool that can be used to help the designer of public lighting projects in his task.

Key-words: Street Lightning Design, Optimization, PSO, NBR 5101.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação do Fluxo Luminoso.	20
Figura 2 – Intensidade Luminosa.	20
Figura 3 – CDL Luminária PHILIPS SON-T 70W.	21
Figura 4 – Representação da iluminância.	21
Figura 5 – Ângulos utilizados para o cálculo da Iluminância vertical.	22
Figura 6 – Leis Fotométricas	24
Figura 7 – Sistemas de Coordenadas utilizado.	28
Figura 8 – Ângulos Requisitados para Interpolação Linear.	29
Figura 9 – Sistemas de Coordenadas para alocação da luminária no plano.	31
Figura 10 – Eixos para rotação da luminária.	31
Figura 11 – Malha de medição com pontos de cálculo - Norma CIE 140.	34
Figura 12 – Malha de medição com pontos de cálculo - Norma NBR 5101.	37
Figura 13 – Metodologia do Script de Cálculos luminotécnicos.	39
Figura 14 – Curva das distribuições Luminosas para Luminárias utilizadas.	42
Figura 15 – Distribuição Luminosa e Isolux para Luminárias da GE 70W.	43
Figura 16 – Distribuição Luminosa e Isolux para Luminária Philips 150W.	45
Figura 17 – Metodologia do Script de Cálculos luminotécnicos.	48
Figura 18 – Erros para as gerações	50
Figura 19 – Variáveis de controle do problema de otimização.	55
Figura 20 – Melhores resultados para luminária GE Euro 2 70W	57
Figura 21 – Convergência para luminária GE Euro 2 70W	58
Figura 22 – Melhores resultados para luminária Philips SGS102 150W	60
Figura 23 – Convergência para luminária Philips SGS102 150W	61
Figura 24 – Gráficos de Dispersão da Luminária GE Euro 2 70W	64
Figura 25 – Gráficos de Dispersão da Luminária Philips SGS102 150 W.	69
Figura 26 – Curva de Convergência para a Classe V1 - 70W - Domínio Contínuo.	77
Figura 27 – Curva de Convergência para a Classe V2 - 70W - Domínio Contínuo.	78
Figura 28 – Curva de Convergência para a Classe V3 - 70W - Domínio Contínuo.	79
Figura 29 – Curva de Convergência para a Classe V4 - 70W - Domínio Contínuo.	80
Figura 30 – Curva de Convergência para a Classe V5 - 70W - Domínio Contínuo.	81
Figura 31 – Curva de Convergência para a Classe V1 - 150W - Domínio Contínuo.	82
Figura 32 – Curva de Convergência para a Classe V2 - 150W - Domínio Contínuo.	83
Figura 33 – Curva de Convergência para a Classe V3 - 150W - Domínio Contínuo.	84
Figura 34 – Curva de Convergência para a Classe V4 - 150W - Domínio Contínuo.	85
Figura 35 – Curva de Convergência para a Classe V5 - 150W - Domínio Contínuo.	86
Figura 36 – Curva de Convergência para a Classe V1 - 70W - Domínio Discreto.	87

Figura 37 – Curva de Convergência para a Classe V2 - 70W - Domínio Discreto. . .	88
Figura 38 – Curva de Convergência para a Classe V3 - 70W - Domínio Discreto. . .	89
Figura 39 – Curva de Convergência para a Classe V4 - 70W - Domínio Discreto. . .	90
Figura 40 – Curva de Convergência para a Classe V5 - 70W - Domínio Discreto. . .	91
Figura 41 – Curva de Convergência para a Classe V1 - 150W - Domínio Discreto. . .	92
Figura 42 – Curva de Convergência para a Classe V2 - 150W - Domínio Discreto. . .	93
Figura 43 – Curva de Convergência para a Classe V3 - 150W - Domínio Discreto. . .	94
Figura 44 – Curva de Convergência para a Classe V4 - 150W - Domínio Discreto. . .	95
Figura 45 – Curva de Convergência para a Classe V5 - 150W - Domínio Discreto. . .	96

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação dos trabalhos realizados na área	17
Tabela 2 – Requisitos mínimos exigidos para as classes de iluminação de veículos .	35
Tabela 3 – Classes de Iluminação para Veículos	36
Tabela 4 – Luminárias utilizadas na validação	41
Tabela 5 – Comparação de resultados para luminária da GE 70W.	42
Tabela 6 – Erros relativos da luminária GE 70W.	43
Tabela 7 – Comparação de resultados para luminária Philips 150W.	44
Tabela 8 – Erros relativos da luminária Philips 150W	44
Tabela 9 – Resultado dos parâmetros - Número de Partículas	51
Tabela 10 – Eficiência da Iluminância - Número de Partículas	51
Tabela 11 – Resultado dos parâmetros - Gerações	52
Tabela 12 – Eficiência da Iluminância- Gerações	52
Tabela 13 – Resultado dos parâmetros - Fator de Inércia	53
Tabela 14 – Eficiência da Iluminância - Fator de Inércia	53
Tabela 15 – Luminárias utilizadas no trabalho	56
Tabela 16 – Resultados para Luminária GE Euro 2 70W	58
Tabela 17 – Resultados para Luminária Philips SGS102 150W	59
Tabela 18 – Melhores Resultados para cada Classe utilizando Luminária GE 70 W .	63
Tabela 19 – Médias e Desvios Padrões para cada Classe utilizando Luminária GE 70 W- Domínio Contínuo	65
Tabela 20 – Médias e Desvios Padrões para cada Classe utilizando Luminária GE 70 W - Domínio Discreto	66
Tabela 21 – Melhores Resultados para cada Classe utilizando Luminária Philips 150W	68
Tabela 22 – Médias e Desvios Padrões para cada Classe utilizando Luminária Phi- lips 150 W - Domínio Contínuo	70
Tabela 23 – Médias e Desvios Padrões para cada Classe utilizando Luminária Phi- lips 150 W - Domínio Discreto	71

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
1.2	Justificativa	17
1.3	Organização do Trabalho	18
2	ILUMINAÇÃO	19
2.1	Conceitos de Iluminação	19
2.1.1	Fluxo Luminoso - Φ	19
2.1.2	Intensidade Luminosa - I	20
2.1.3	Iluminância - E	21
2.2	Leis Fotométricas	23
2.2.1	Lei de Bouguer	23
2.2.2	Lei de Lambert	23
2.3	Arquivos Fotométricos	24
3	NORMAS TÉCNICAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA	27
3.1	CIE 140-2000 - Cálculos de Iluminação de Rodovias	27
3.1.1	Convenções Matemáticas	27
3.1.2	Dados Fotométricos	28
3.1.3	Interpolação nos dados de Intensidade Luminosa	29
3.1.4	Cálculo do $I(C, \gamma)$	30
3.1.5	Cálculo do C e γ	32
3.1.6	Cálculos das Quantidades Fotométricas	33
3.1.6.1	Iluminância	33
3.1.6.2	Pontos de Cálculos	33
3.2	NBR 5101 -2012 - Iluminação Pública	35
3.2.1	Termos e definições	35
3.2.2	Requisitos de Iluminância e uniformidade	35
3.2.2.1	Vias para tráfego	35
3.2.3	Malha de Medição	36
3.3	CIE 140 versus NBR 5101	38
4	CÁLCULOS DOS PARÂMETROS LUMINOTÉCNICOS	39
4.1	Validação do script proposto	41
4.1.1	Luminária da GE 70 W	42
4.1.2	Luminária da Philips	44

5	OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULA	46
5.1	Implementação do PSO	47
5.1.1	Critério de Parada	50
5.2	Calibração das Variáveis do PSO	50
5.2.1	Número de Partículas	51
5.2.2	Gerações	52
5.2.3	Fator de Inércia	53
6	RESULTADOS	54
6.1	Luminárias utilizadas	55
6.2	Sem considerar a Norma Brasileira	56
6.2.1	Luminária GE 70W	56
6.2.2	Luminária Philips 150W	59
6.3	Considerando a Norma Brasileira	61
6.3.0.1	Luminária GE 70W	62
6.3.1	Luminária Philips 150W	67
	Considerações Finais	72
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICES	76
	APÊNDICE A – DOMÍNIO CONTÍNUO	77
A.1	Luminária GE 70W	77
A.2	Luminária Philips 150W	82
	APÊNDICE B – DOMÍNIO DISCRETO	87
B.1	Luminária GE 70W	87
B.2	Luminária Philips 150W	92

1 Introdução

Devido à crescente preocupação com a demanda por energia elétrica e a preservação do meio ambiente, a busca por alternativas em economia de energia tem gerado muitas discussões. Segundo ENERGY (2017), cerca de 20% do consumo de energia elétrica é proveniente da iluminação, inclusive a iluminação pública (IP), sendo este um tema relevante para maximizar a eficiência energética.

O consumo de energia elétrica mundial vem crescendo de forma acelerada nas últimas décadas. No Brasil, passou de 38 GWh em 1970 para a 460,8 GWh em 2016, apresentando um crescimento de aproximadamente 3,5 % ao ano durante a última década (EPE, 2015). O consumo nacional com iluminação pública representa uma parcela significativa, correspondendo a aproximadamente 3 % do total, sendo de 15,03 GWh em 2016.

Desta forma, a otimização da infraestrutura de iluminação pública pode proporcionar uma redução significativa do consumo energético total. Para tanto, se faz necessária a efficientização destes sistemas, uma vez que os mesmos devem atender a requisitos qualitativos e quantitativos mínimos, especificados por normas regulamentadoras vigentes como a norma europeia CIE 140, brasileira NBR 5101, entre outras. Assim, quando tais requisitos são respeitados é proporcionado uma quantia uniforme de iluminação operando com um menor consumo de energia elétrica.

Existem diversos meios para se alcançar uma melhora no desempenho do sistema de iluminação pública. O mais comumente utilizado é o de estudos de casos, em que são calculados os parâmetros necessários para iluminação pública em dada via, atendendo aos requisitos mínimos estabelecidos pelas normas, com diferentes disposições de seus componentes: potências de luminárias, curvas fotométricas, distribuição de iluminância, alturas e distâncias entre postes. Porém, esse projeto é realizado levando demasiadamente em consideração a experiência do projetista (COSTA, 2006). Além disso, tendo como limitação o tempo hábil de projeto, muitas vezes a configuração escolhida pode não ser a melhor possível.

Atualmente, existem no mercado diversos softwares que calculam os parâmetros exigidos para um projeto de iluminação, sendo alguns deles: DiaLux[®], AGI32[®], Calculux[®], Relux[®]. Entretanto, estes softwares não otimizam as configurações para obter melhores resultados, tendo como dados de entrada as configurações da via não eximindo a experiência do projetista. Desta forma, seria interessante a utilização de métodos de otimização para resolução desse problema.

A otimização pelo uso de algoritmos genéticos (AG) já foi utilizada para melhorar

projetos de IP. Em Oliveira, Júnior e Menezes (2014) apresenta-se uma proposta de minimização de custos os projetos de iluminação pública. A solução foi encontrada a partir das características da via (parâmetros de entrada), utilizando a norma NBR 5101 (2012): Iluminação Pública, que estabelece os parâmetros para avaliação de cada projeto, garantindo os requisitos mínimos. 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 de forma 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. Os resultados mostraram uma boa performance da metodologia proposta.

Ainda, em Gómez-Lorente et al. (2013) foi utilizado um AG para melhorar projetos de IP considerando a norma CIE 115 (2010): *Lighting of roads for motor and pedestrian traffic*, tendo como objetivo apresentar um novo método para calcular o projeto de iluminação de estradas. O método é baseado em um algoritmo evolutivo multiobjetivo que tem a vantagem de aumentar a eficiência energética das instalações de iluminação. Na primeira fase, um processo de calibração exaustivo foi utilizado para melhorar a precisão do novo método apresentado e os resultados obtidos foram comparados com os do Dialux®. Na segunda fase, foi utilizado o algoritmo evolutivo para maximizar eficiência energética e uniformidade ao mesmo tempo. Os resultados demonstraram uma relação clara entre uniformidade e eficiência energética.

A otimização por enxame de partículas aplicada em projetos de iluminação pública foi utilizada em Castillo-Martinez et al. (2017) respeitando a norma *Royal Decree* (1890/2008): *Energy Efficiency for Outdoor lighting installations*, no qual foram estudados os parâmetros do PSO para obter a configuração de via com a maior eficiência energética. Dois experimentos foram testados, sendo que o primeiro experimento considerou não conhecer a maior parte dos parâmetros da via, usando apenas a largura da estrada e a distância entre postes. Já no segundo experimento, buscou-se encontrar a melhor configuração no caso em que o usuário conhece a maior parte dos parâmetros, de modo que além dos já conhecidos no experimento anterior, também era conhecido o tipo de via e luminária utilizada. Concluiu-se que o fator de inércia foi o parâmetro que mais influenciou na obtenção de uma configuração ótima, em conjunto com o número de partículas que deveria ser no mínimo de sessenta.

Na tabela 1 é apresentada uma comparação dos trabalhos existentes na área, em que são apresentados os autores, o ano de publicação, a norma respeitada e, por fim, o método de otimização utilizado.

Tabela 1 – Comparação dos trabalhos realizados na área

Autor	Ano de Publicação	Norma Utilizada	Método
Gómez-Lorente	2013	CIE 115: 2010	AG
Oliveira	2014	NBR 5101: 2012	GA
Castillo-Martinez	2017	Royal Decree: 1890/2008	PSO
Trabalho Atual	2018	NBR 5101: 2012	PSO

1.1 Objetivos

O objetivo geral da presente dissertação consiste em otimizar projetos de IP utilizando o método de otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization-PSO*), considerando a Norma Regulamentadora Brasileira de Iluminação Pública NBR 5101 (2012) atendendo apenas os requisitos mínimos exigidos para o tráfego de veículos e com o intuito de maximizar a eficiência energética. Por objetivos específicos, citam-se:

- Realizar uma revisão bibliográfica a fim de comparar este trabalho com os demais encontrados na literatura e determinar suas vantagens e aplicabilidade em diversos casos;
- Implementar um script em ambiente Matlab[®] para o cálculo dos parâmetros de iluminação;
- Validar esse script com o software DiaLux[®];
- Implementar e aplicar o método de otimização por enxame de partículas no script proposto;
- Calibrar o método de otimização PSO em relação ao número de partículas, critério de parada e fator de inércia;
- Implementar as restrições no problema de otimização.

1.2 Justificativa

A iluminação pública tem caráter essencial na segurança dos usuários de uma via. Uma boa iluminação é essencial para manter o desempenho visual do usuário em nível suficiente durante a noite. Muitos acidentes ocorrem porque o motorista dorme enquanto dirige. Assim, uma iluminação adequada pode contribuir para o motorista manter-se alerta. Isto se deve ao fato de que uma iluminação adequada influencia neurologicamente o condutor (BOMMEL, 2014). Estudos em várias instituições e vários países demonstraram que a iluminação adequada da via pode reduzir o número de acidentes noturnos em mais de 30% (ELVIK et al., 2009).

Atualmente, os projetos de IP são elaborados utilizando softwares comerciais e levando em consideração apenas a experiência do projetista. Em virtude disto, a configu-

ração escolhida pode não ser a mais adequada para a via, devido ao número limitado de cenários que podem ser produzidos em um tempo hábil de projeto.

Neste contexto, o script proposto testa milhares de configurações possíveis para a via e leva em consideração as restrições da norma brasileira. Ao final, o usuário encontrará uma configuração normatizada e ótima em relação à eficiência energética.

1.3 Organização do Trabalho

O segundo capítulo apresenta uma breve descrição sobre os conceitos de iluminação, leis fotométricas e iluminação pública; no terceiro capítulo as normas de IP NBR 5101-2012 e CIE 140-2000 são apresentadas e comparadas; no quarto capítulo é descrita a metodologia dos cálculos dos parâmetros luminotécnicos e validação do script proposto através do software comercial Dialux[®]; no quinto capítulo é realizada uma apresentação do método de otimização por enxame de partículas, como se descreve sua implementação e a calibração dos parâmetros de entrada do método; no sexto capítulo, os resultados para a otimização com e sem restrições são apresentados e discutidos.

2 Iluminação

O presente Capítulo tem por objetivo apresentar, de maneira sucinta, conceitos teóricos necessários à execução do presente trabalho. Descreve-se brevemente os principais conceitos luminotécnicos necessários na construção da ferramenta computacional aqui desenvolvida.

2.1 Conceitos de Iluminação

De acordo com Costa (2006), o conhecimento das grandezas e unidades utilizadas em iluminação, como em qualquer outra área da ciência, é de suma importância para os engenheiros e projetistas de iluminação.

2.1.1 Fluxo Luminoso - Φ

O conceito de fluxo luminoso baseia-se, primeiramente, na compreensão e representação conceitual do ângulo sólido. Assim como o ângulo plano α é definido em termos do quociente entre o comprimento do arco e o raio da circunferência e sua unidade é radianos(rad). De forma análoga, o ângulo sólido tem definição voltada para a tridimensionalidade de uma esfera de raio R e uma área A qualquer em sua superfície. Assim, o ângulo sólido será definido como o quociente entre a área e o quadrado do raio, e sua unidade é esterradiano (sr) como apresentado na Eq. (2.1).

$$\omega = \frac{A}{R^2} \quad (2.1)$$

A partir disto, o fluxo luminoso é definido como a quantidade de energia radiante, emitida ou refletida, por segundo, em todas as direções sob a forma de luz, obtido pela Eq.(2.2), sua unidade é o Lúmen (Lm) apresentado na Fig. 1. Fazendo uma analogia com hidráulica, o fluxo luminoso seria o esguicho de água saindo de uma esfera com vários orifícios (COSTA, 2006).

$$\Phi = k_n \pi \int_0^\infty V_n(\lambda) \cdot J(\lambda) \partial \lambda \quad (2.2)$$

Em 2.2:

- k_n : Constante dependente da condição visual escolhida (fotópica, escotópica ou mesópica);
- $V_n(\lambda)$: Curva normalizada de sensibilidade da condição visual escolhida;

- $J(\lambda)$: Distribuição espectral de potências da fonte.

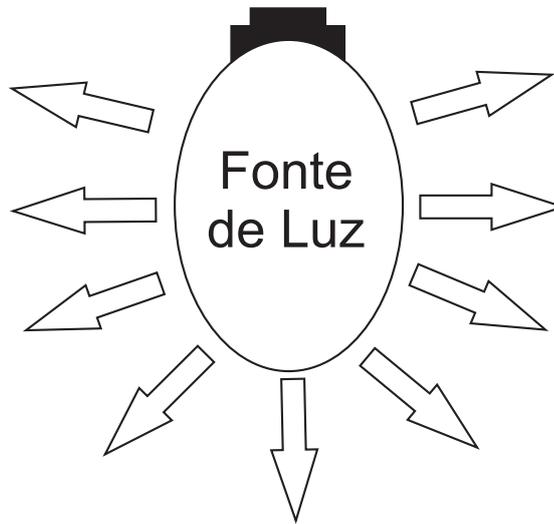


Figura 1 – Representação do Fluxo Luminoso.

Fonte – Elaborado pelo Autor

2.1.2 Intensidade Luminosa - I

A luz que se propaga, em certa direção, dentro de um ângulo sólido unitário é definida como intensidade luminosa (I), sua unidade é Lúmen/esterradiano ou candela (cd), ilustrada na Fig. 2.

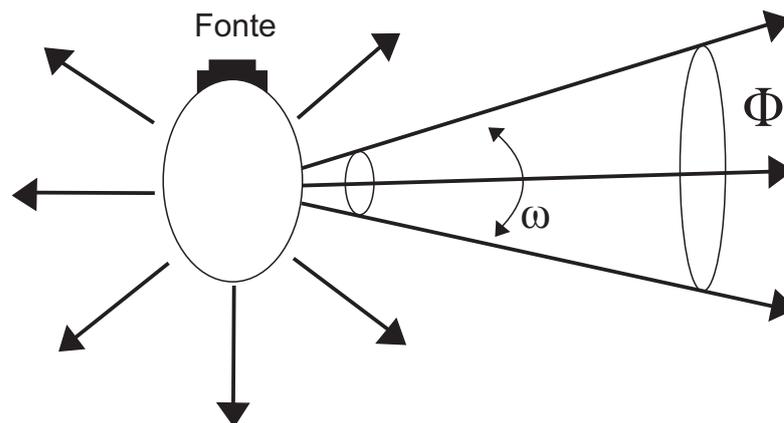


Figura 2 – Intensidade Luminosa.

Fonte – Elaborado pelo autor

Porém, comumente na prática, quando se trabalha com uma luminária, é utilizada a distribuição de intensidade luminosa como um diagrama polar ilustrado na Fig. 3, chamado de Curva de Distribuição Luminosa (CDL).

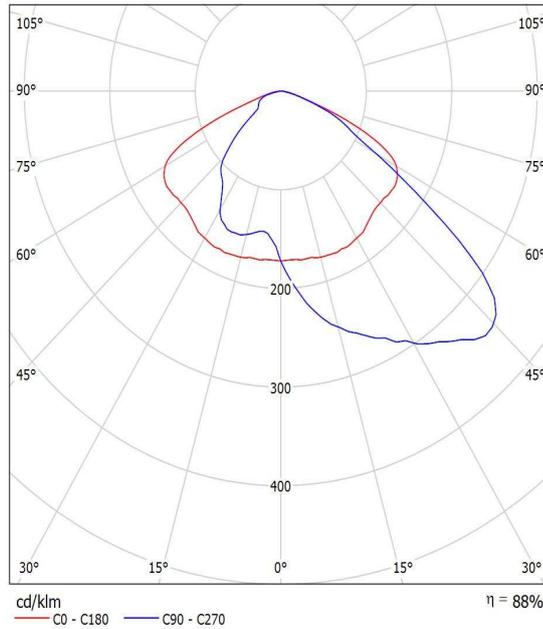


Figura 3 – CDL Luminária PHILIPS SON-T 70W.

Fonte – Elaborado pelo autor

2.1.3 Iluminância - E

Define-se que a iluminância é o fluxo luminoso de uma fonte de 1 cd, a 1 metro de altura, que incide em uma superfície de área $1m^2$ como demonstrado na Fig.4.

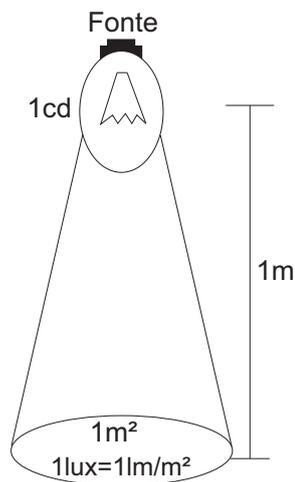


Figura 4 – Representação da iluminância.

Fonte – Elaborado pelo autor

Assim, a iluminância é dada pela Eq. (2.3), e sua unidade é o Lux.

$$E = \frac{\Phi}{S} \tag{2.3}$$

Em que:

Φ = Fluxo luminoso(Lúmens);

E = Iluminância (Lux);

S = Área de superfície iluminada (m^2).

Conforme Sousa (2012), existem quatro principais medidas de iluminância, sendo que as mais utilizadas em IP são: a horizontal e a vertical.

- Iluminância horizontal: Os pontos de cálculo são localizados no nível da via, para cada ponto utiliza-se a Eq. (2.4).

$$E = \frac{I \times \cos^3(\gamma) \times \Phi \times MF}{h^2} \quad (2.4)$$

Em que:

- E : Iluminância horizontal no ponto em lux;
 - I : Intensidade luminosa na direção do ponto em cd;
 - Φ : Fluxo luminoso inicial das lâmpadas em lúmens;
 - γ : Ângulo de incidência da luz no ponto em graus;
 - h : Altura de montagem da luminária;
 - MF : Fator de manutenção do fluxo da lâmpada.
- Iluminância vertical: Os pontos de cálculo estão localizados em um plano a 1,5 metros acima da superfície desejada, sendo regida pela Eq.(2.5).

$$E = \frac{I \times \cos(\alpha) \times \cos^2(\gamma) \times \text{sen}(\gamma) \times \Phi \times MF}{(h - 1,5)^2} \quad (2.5)$$

Os ângulos utilizados para o cálculo da Eq.2.5 são visualizados na Fig.5.

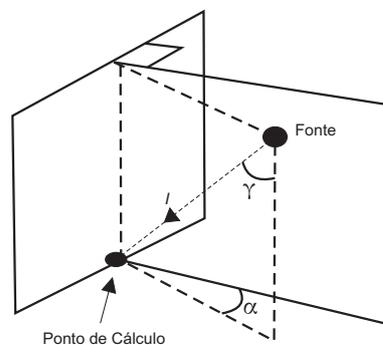


Figura 5 – Ângulos utilizados para o cálculo da Iluminância vertical.

Fonte – Adaptado de Sousa (2012).

2.2 Leis Fotométricas

As leis fotométricas estão fundamentadas nos trabalhos desenvolvidos por Bouguer e Lambert (COSTA, 2006).

2.2.1 Lei de Bouguer

Também é conhecida como Lei do Inverso do Quadrado das Distâncias e pode ser visualizada na Fig. 6a. Essa lei afirma que a iluminância (E) em um ponto na superfície varia diretamente com a intensidade luminosa (I) da fonte, e inversamente com o quadrado da distância (d) entre a fonte e o ponto. Se a superfície no ponto for normal na direção da luz incidente, a lei pode ser expressa pela Eq.(2.6) (REA, 2000).

Então verifica-se pela Lei de Bourguer que a iluminância será reduzida de 1/4 quando a distância dobrar e reduzida para 1/9 quando a distância triplicar e assim por diante (COSTA, 2006).

$$E = \frac{I}{d^2} \quad (2.6)$$

2.2.2 Lei de Lambert

Também conhecida por Lei dos cossenos pode ser visualizada na Fig. 6b. A lei de Lambert afirma que a iluminância, em qualquer superfície, varia como o cosseno do ângulo de incidência. O ângulo de incidência, θ , é o ângulo entre a normal à superfície e a direção da luz incidente. A lei do inverso do quadrado e a lei do cosseno podem ser combinadas e resultam na Eq.(2.7).

$$E = \frac{I}{d^2} \times \cos(\theta) \quad (2.7)$$

A extensão útil da lei do cosseno é a equação do cosseno-cúbico visto na Fig.6c. Substitui-se a distância (d) por $h/\cos(\theta)$, em que h é a altura em que se encontra a fonte luminosa, resultando na Eq. (2.8).

$$E = \frac{I \times \cos^3\theta}{h^2} \quad (2.8)$$

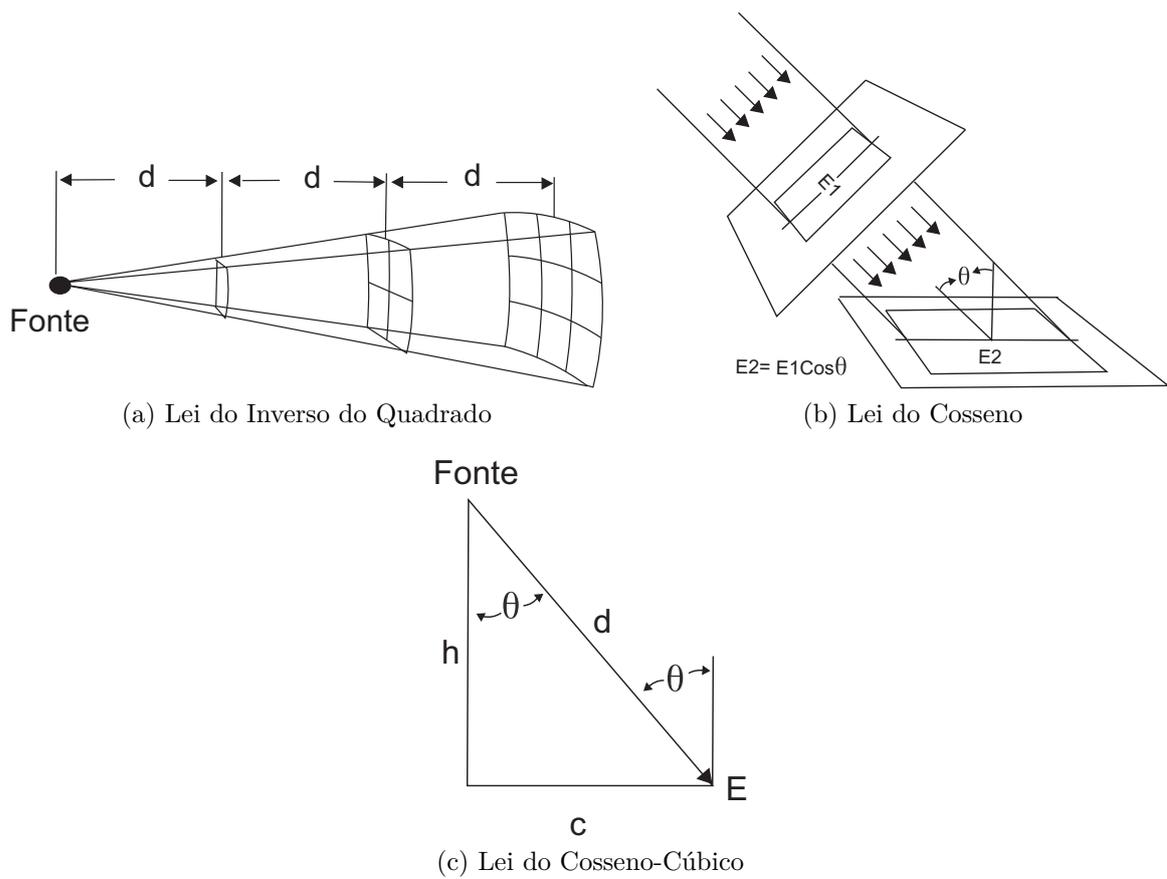


Figura 6 – Leis Fotométricas

Fonte – Adaptado de Rea (2000).

2.3 Arquivos Fotométricos

Com a diversidade de softwares com a finalidade de cálculo e simulações lumino-técnicas, os parâmetros de compatibilidade dos dados são assuntos indispensáveis.

Tradicionalmente, os resultados de ensaios fotométricos das luminárias são apresentados na forma de relatório, contendo dados tabulados representando a distribuição espacial das suas intensidades luminosas. Os relatórios de dados fotométricos são obtidos a partir de ensaio com lâmpadas e luminárias em laboratórios, que contam com aparelhos específicos para essa finalidade como: o goniofotômetro e a esfera de Ulbricht.

Existem vários padrões de arquivos utilizados, por exemplo, IES, EULUMDAT, CIBSE, UNI, entre outros. Na presente dissertação utiliza-se o IES, o qual segue a normativa IES LM-63-95 *Photometric Data File Format*, na qual se encontra o método de construção e interpretação do formato. O mesmo foi escolhido por ser mais facilmente encontrado nos sites dos fabricantes utilizados nesse trabalho.

Os dados fotométricos são armazenados em um arquivo ASCII. Cada linha tem um significado que será exemplificado a seguir e deve aparecer exatamente na seguinte

sequência (AUTODESK, 2016).

IESNA 95

[TEST]: O número do teste que está sendo realizado;

[MANUFAC]: Fabricante(GE, Philips, Osram, entre outras);

[LUMINAIRE]: Modelo da luminária;

[DESCRIPTION]: Descrição da luminária(Chapa metálica, cor azul, etc.);

[LAMP]: Tipo da lâmpada utilizada;

[BALLAST]: Especificação do reator ou driver utilizado;

[DATE]: Data em que o arquivo foi elaborado;

[ENVIROMENT CONDITIONS]: condições ambientais para operação;

[EXECUTOR]: Quem gerou o arquivo;

TILT NONE: Sem inclinação

[B1][B2][B3][B4][B5][B6][B7][B8][B9][B10]

1 1 [1]

[V1][V2][V3]...[Vn]

[H1][H2][H3]...[Hn]

[H1V1]...[HnVn]

Para um melhor entendimento de como é a estrutura dos arquivos algumas especificações foram mencionadas por códigos que serão brevemente explicadas a seguir:

- B1: Quantidade de Lâmpadas;
- B2: Quantidade de Lúmens de cada Lâmpada;
- B3: Valor para multiplicar os valores em candela do arquivo;
- B4: Número de ângulos verticais;
- B5: Número de ângulos horizontais;
- B6: Tipo de curva fotométrica: tipo C(1), tipo B(2), tipo A(3);
- B7: Tipo de unidade: pés(1) e metros(2);
- B8, B9 e B10: Largura, comprimento e altura, respectivamente da luminária;
- V1...Vn: Configura os valores dos ângulos verticais;

- $H_1...H_n$: Configura os valores dos ângulos horizontais;
- $H_1V_1...H_nV_n$: Configura os valores em candela para as intersecções entre os ângulos verticais e horizontais.

3 Normas Técnicas de Iluminação Pública

O propósito deste Capítulo é apresentar as normas técnicas de iluminação pública utilizadas neste trabalho. São abordadas as normas europeia CIE (140) e brasileira NBR (5101) com o intuito de compreender os conceitos utilizados na construção do script de cálculos luminotécnicos e, posteriormente, na implementação do método de otimização utilizado.

A Comissão Internacional de Iluminação (*Commission International de l'Éclairage-CIE*) surgiu por volta de 1900 como consequência dos trabalhos realizados principalmente na Europa, possuindo como objetivo o estudo dos problemas técnicos e científicos da iluminação. No presente, essa Comissão representa trinta países, em que cada país indica seus especialistas que irão trabalhar no desenvolvimento dos relatórios técnicos ou recomendações. Além desta associação com cunho internacional, cada país conta com sociedades como: *Illuminating Engineering Society of North America*, nos EUA; *British Illuminating Engineering Society*, na Inglaterra; *Association Française de l'Éclairage*, na França. No Brasil, o especialista é a Associação de Normas Técnicas (ABNT), entretanto também existe a Associação Brasileira das Indústrias de Iluminação (ABILUX) (COSTA, 2006).

3.1 CIE 140-2000 - *Cálculos de Iluminação de Rodovias*

A norma CIE140-2000 é uma revisão da CIE 30.2-1982- Cálculo e medição de luminância e iluminância em rodovias. Essa norma apresenta os métodos de cálculo dos requisitos de iluminação, que são recomendados na CIE 115-1995 e CIE 136-2000.

A norma CIE 140 inclui o cálculo de luminância e iluminância e apresenta as convenções atualizadas para a localização dos pontos da grade de cálculo e a posição do observador. O cálculo de iluminância é descrito com maior detalhe do que na norma anterior.

3.1.1 Convenções Matemáticas

Nos processos matemáticos da norma CIE 140 são adotadas as seguintes convenções básicas:

- A luminária é considerada como uma fonte pontual;
- A luz refletida aos arredores da via é desconsiderada;
- A absorção atmosférica é zero;

- A superfície da via é plana, nivelada e tem propriedades refletivas uniformes.

3.1.2 Dados Fotométricos

Os dados fotométricos obtidos através da distribuição luminosa das luminárias são necessários para calcular os parâmetros de qualidade da iluminação. Estes dados são obtidos por uma tabela de intensidade luminosa chamada *I-table*, que contém as intensidades luminosas emitidas pela luminária para os pontos pertinentes. Em alguns casos é utilizada interpolação para encontrar valores intermediários na tabela.

A *I-table* é preparada de acordo com a norma CIE 121-1996. O sistema de coordenadas usualmente utilizados em IP é o sistema de coordenadas esféricas denominado sistema (C, γ) e ilustrado na Fig. 7.

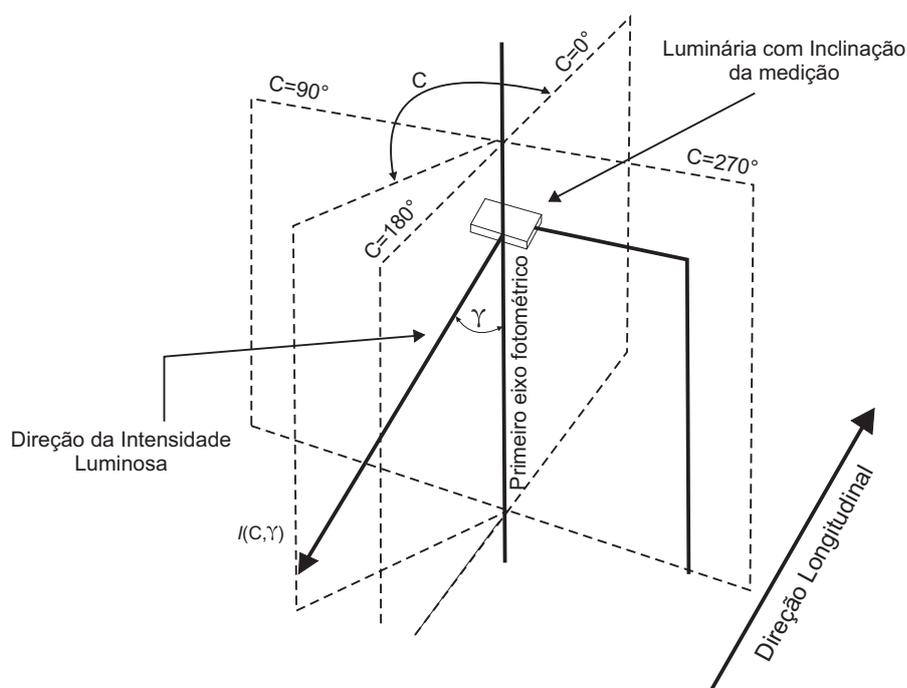


Figura 7 – Sistemas de Coordenadas utilizado.

Fonte – Adaptado de CIE (2000).

Para obter níveis aceitáveis na precisão da interpolação, que será explicada posteriormente, foram selecionados alguns intervalos máximos angulares. Nos planos verticais (γ), os ângulos devem ser espaçados no máximo em $2,5^\circ$ de 0° a 180° . Para os ângulos no azimute (C), os intervalos máximos entre ângulos são variados de acordo com a simetria da distribuição luminosa, sendo elas:

- $C = 0^\circ$, intervalos máximos de 5° , de 0° a 355° ;
- $C = 270^\circ-90^\circ$, intervalos máximos de 5° , de 270° até 90° ;

- $C = 270^\circ-90^\circ$ e $C = 0^\circ-180^\circ$, intervalos máximos de 5° , de 0° até 90° ;
- Para as luminárias com simetria na distribuição em todos os planos, apenas um conjunto de medições no plano vertical é necessário.

3.1.3 Interpolação nos dados de Intensidade Luminosa

Deve-se utilizar interpolação onde se necessita da intensidade na qual a direção não está nas medições registradas. A interpolação linear é mais simples e pode ser utilizada de acordo com os intervalos angulares citados anteriormente. Será abordada detalhadamente a interpolação linear, sendo que a obtenção matemática da interpolação quadrática é semelhante, porém utilizando um maior número de pontos na malha.

Para estimar valores de intensidade luminosa $I(C, \gamma)$, na direção (C, γ) , é necessário interpolar entre quatro valores mais próximos de intensidade luminosa, como mostrado na Fig. 8.

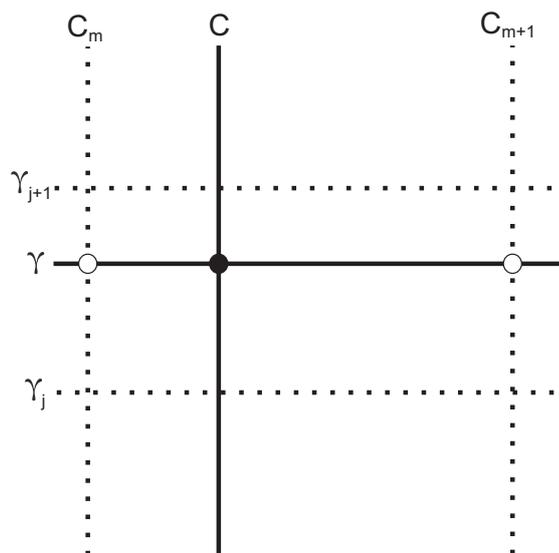


Figura 8 – Ângulos Requisitados para Interpolação Linear.

Fonte – Adaptado de CIE (2000).

Para calcular a interpolação, primeiramente, são calculados os parâmetros K_1 e K_2 obtidos pelas Eqs.(3.1) e (3.2).

$$K_1 = \frac{C_m - C}{C_m - C_{m+1}} \quad (3.1)$$

$$K_2 = \frac{\gamma_j - \gamma}{\gamma_j - \gamma_{j+1}} \quad (3.2)$$

Em que:

- K_1 e K_2 : São as constantes determinadas pelas equações;
- C e γ : São os valores do azimute e do ângulo vertical, medidos no primeiro eixo fotométrico;
- $j, j + 1, m, m + 1$: Indicam os valores inteiros nas colunas e linhas da *I-table*.

Com o valor de K_1 pode-se calcular as intensidades luminosas nas linhas acima e abaixo do valor intermediário pelas Eqs. (3.3) e (3.4).

$$I(C, \gamma_j) = I(C_m, \gamma_j) - K_1 [I(C_m, \gamma_j) - I(C_{m+1}, \gamma_j)] \quad (3.3)$$

$$I(C, \gamma_{j+1}) = I(C_m, \gamma_{j+1}) - K_1 [I(C_m, \gamma_{j+1}) - I(C_{m+1}, \gamma_{j+1})] \quad (3.4)$$

Com as intensidades calculadas e o valor de K_2 , finalmente calcula-se a intensidade luminosa no ponto intermediário da tabela utilizando a Eq. (3.5).

$$I(C, \gamma) = I(C, \gamma_j) - K_2 [I(C, \gamma_j) - I(C, \gamma_{j+1})] \quad (3.5)$$

3.1.4 Cálculo do $I(C, \gamma)$

É necessário encontrar o ângulo fotométrico vertical (γ) e o azimute fotométrico (C) para determinar a intensidade luminosa em uma certa direção. Para tais cálculos deve-se levar em consideração a orientação, a inclinação e a rotação da luminária na aplicação e convencionar os sinais para medir as distâncias na via e para os movimentos de rotação da luminária. O sistema de coordenadas cartesiano direito é utilizado. A correção nos movimentos de rotação da luminária não afetam o seu fluxo luminoso.

Um sistema de coordenadas retangulares (x,y) é utilizado, no qual o eixo da abcissa representa a direção longitudinal da via como visto na Fig. 9. Então, as Eqs.(3.6) e (3.7) regem as convenções para medidas na via, em que x_i e y_i representam os pontos de cálculo e x_p e y_p representam a localização da luminária.

$$x = x_p - x_i \quad (3.6)$$

$$y = y_p - y_i \quad (3.7)$$

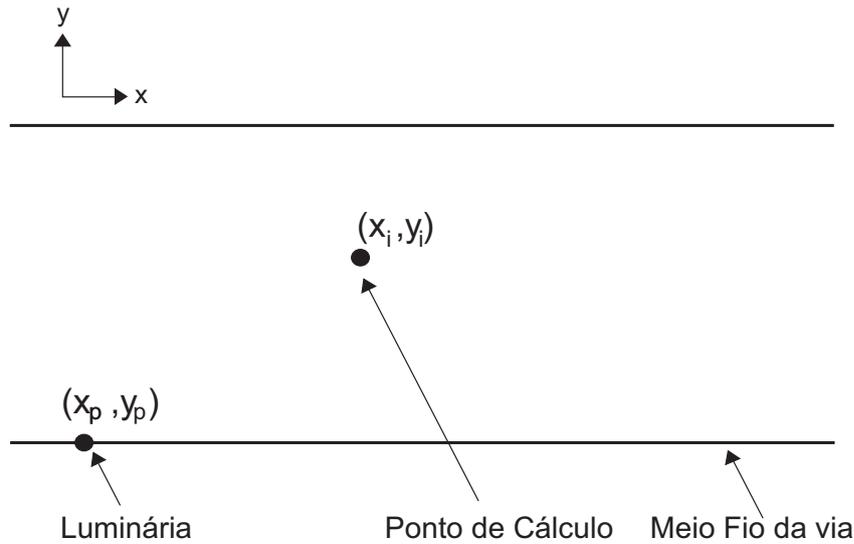


Figura 9 – Sistemas de Coordenadas para alocação da luminária no plano.

Fonte – Adaptado de CIE (2000).

Na Fig. 10 visualizam-se as convenções para rotação dos eixos da luminária em relação aos sistemas de coordenadas (x,y). O primeiro eixo da luminária é fixado no espaço, o segundo e terceiro eixos são mutuamente perpendiculares e podem ser rotacionados sobre o primeiro eixo.

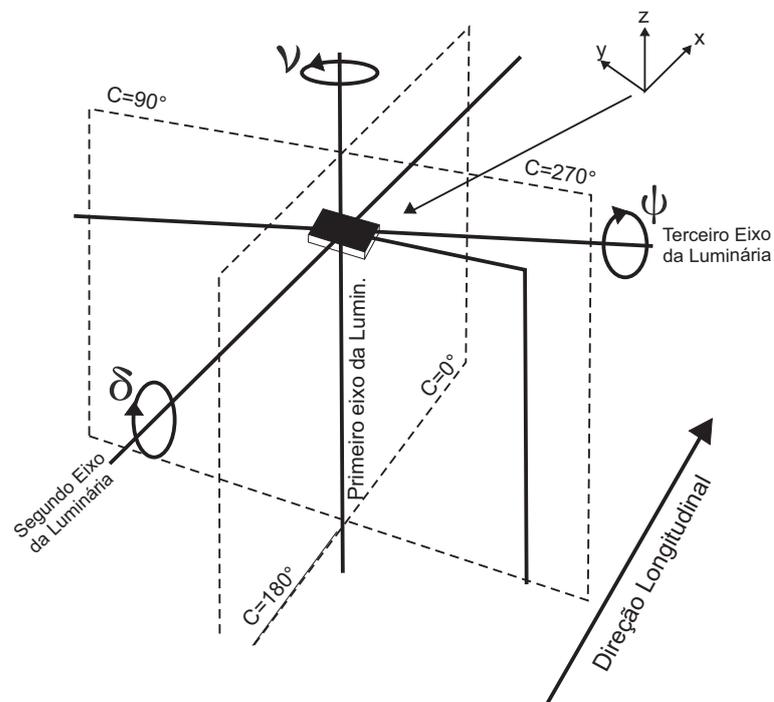


Figura 10 – Eixos para rotação da luminária.

Fonte – Adaptado de CIE (2000).

A inclinação (δ) utilizada para os cálculos em relação à inclinação de aplicação (θ_f) e de medição (θ_m) pode ser obtida pela Eq. (3.8).

$$\delta = \theta_f - \theta_m \quad (3.8)$$

3.1.5 Cálculo do C e γ

Para determinar essas variáveis, devem-se cumprir quatro estágios: o primeiro passo é fazer uma conversão do sistema de coordenadas cartesianas para o esférico, substituindo v , ψ , δ , x e y nas equações abaixo:

$$x' = x(\cos v \times \cos \psi - \sin v \times \sin \delta \times \sin \psi) + y(\sin v \times \cos \psi + \cos v \times \sin \delta \times \sin \psi) + h(\cos \delta \times \sin \psi) \quad (3.9)$$

$$y' = -x(\sin v \times \cos \delta) + y(\cos v \times \cos \delta) - h(\sin \delta) \quad (3.10)$$

$$h' = -x(\sin v \times \sin \delta \times \cos \psi + \cos v \times \sin \psi) - y(\sin v \times \sin \psi - \cos v \times \sin \delta \times \cos \psi) + h(\cos \delta \times \sin \psi) \quad (3.11)$$

Em que:

- x e y : São as distâncias longitudinais entre o ponto de cálculo e o nadir da luminária;
- h : Altura da montagem da luminária;
- x', y' e h' : São as novas distâncias calculadas com a luminária rotacionada;
- v , ψ e δ : São a orientação, a inclinação de cálculo e a rotação, respectivamente.

O segundo passo é a avaliação da instalação do azimute φ . Assim, realizando o cálculo da avaliação do $\text{atan}(y/x)$, o resultado será um valor entre -90° e 90° , devendo-se realizar uma adequação de quadrante dependendo dos valores de distância da via, como demonstrado nas Eqs. (3.12), (3.13), (3.14) e (3.15).

Para $x > 0$ e $y > 0$:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (3.12)$$

Para $x < 0$ e $y > 0$:

$$\varphi = 180^\circ + \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (3.13)$$

Para $x < 0$ e $y < 0$:

$$\varphi = 180^\circ + \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (3.14)$$

Para $x > 0$ e $y < 0$:

$$\varphi = 360^\circ + \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (3.15)$$

O terceiro e o quarto passo são, respectivamente, o cálculo do azimute fotométrico (C), dado pela Eq.(3.16), e do ângulo fotométrico vertical (γ), utilizando a Eq.(3.17).

$$C = \varphi - v \quad (3.16)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\sqrt{(x')^2 + (y')^2}}{h'}\right) \quad (3.17)$$

3.1.6 Cálculos das Quantidades Fotométricas

3.1.6.1 Iluminância

A Iluminância horizontal em cada ponto pode ser obtida através da Eq.(3.18).

$$E_H = \frac{I(C, \gamma) \times \cos^3 \gamma \times \Phi \times FM}{h^2} \quad (3.18)$$

Em que:

- E_H : Iluminância horizontal no ponto em Lux.
- $I(C, \gamma)$: É a intensidade em cd/klm na direção do ponto;
- γ : Ângulo fotométrico vertical em graus;
- h : Altura de montagem da luminária em metros;
- Φ : Fluxo luminoso da lâmpada ou das lâmpadas de uma luminária;
- FM : Fator de manutenção da luminária.

3.1.6.2 Pontos de Cálculos

Os pontos de cálculos devem estar uniformemente espaçados na malha de cálculo como mostrado na Fig. 11.

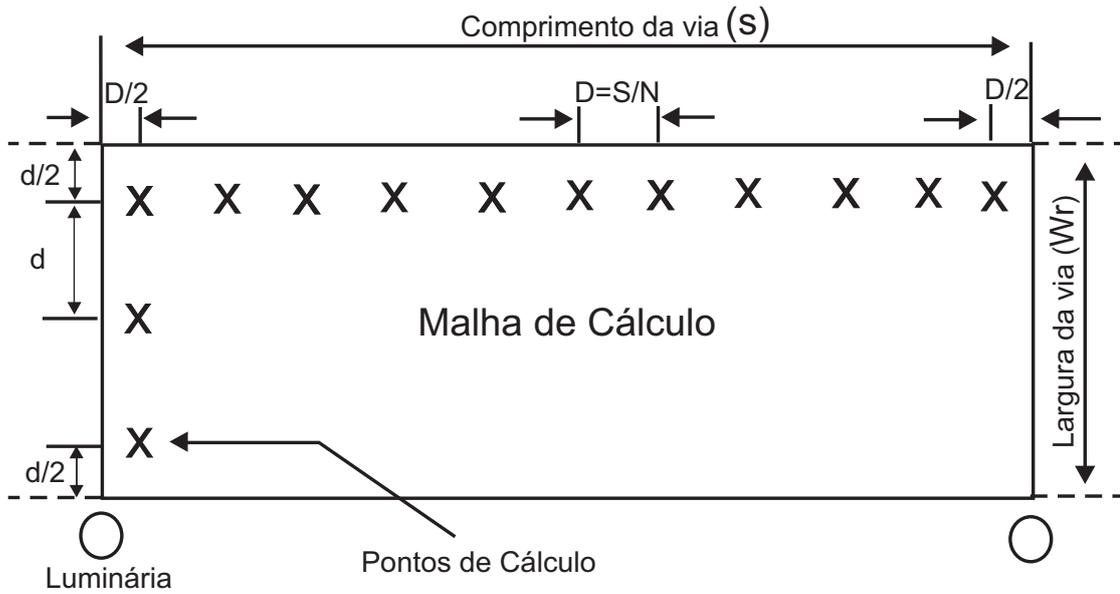


Figura 11 – Malha de medição com pontos de cálculo - Norma CIE 140.

Fonte – Adaptado de CIE (2000).

Na direção longitudinal, o espaçamento (D) é determinado pela Eq. (3.19), em que: D é o espaçamento entre pontos na direção longitudinal (m); S é o espaçamento entre luminárias na mesma linha (m) e N é o número de pontos de cálculos na direção longitudinal, levando em consideração o espaçamento entre poste, se o comprimento da via for menor ou igual que 30 metros utiliza-se 10 pontos de cálculo e, caso seja maior, deve-se utilizar um valor em que o espaçamento (D) resulte em um número menor ou igual a três.

$$D = \frac{S}{N} \quad (3.19)$$

Na direção transversal, o valor do espaçamento entre pontos (d) é dado pela razão entre a largura da via (Wr) e o número de pontos na direção transversal, sendo que deve ser maior ou igual a 3. Além disso, o menor inteiro para obter d menor ou igual que 1,5 metros é obtido pela Eq. (3.20)

$$d = \frac{Wr}{n} \quad (3.20)$$

Ainda existem espaçamentos entre a borda da malha de medição e o primeiro ponto de cálculo. Esses espaçamentos são, respectivamente, equivalentes a $D/2$, na direção longitudinal e a $d/2$ na transversal.

3.2 NBR 5101 -2012 - *Iluminação Pública*

A norma brasileira regulamentadora NBR 5101 (2012) é a norma vigente no Brasil para Iluminação Pública. Ela rege os requisitos para iluminação de logradouros públicos, gerando segurança aos tráfegos de veículos e pedestres.

3.2.1 Termos e definições

São apresentados alguns termos essenciais para a compreensão da norma brasileira de iluminação pública.

- Altura de Montagem (AM): Distância entre o chão da via e o centro da luminária;
- Avanço: Distância entre o meio-fio e a projeção do centro da luminária;
- Diagrama de Intensidades Luminosas: Distribuição espacial das intensidades luminosas de uma luminária;
- Fator de uniformidade de iluminância (u_0): Razão entre a iluminância mínima e média em um plano específico.
- Iluminância média horizontal: Iluminância delimitada pela malha de pontos considerada, na superfície da via.

3.2.2 Requisitos de Iluminância e uniformidade

As iluminâncias médias são os valores obtidos pelos cálculos da média aritmética dos pontos medidos, na superfície da via, utilizando a malha de medição. A iluminância mínima é o menor valor medido nos pontos da grade de medição, este valor não deve ser menor que 1 lux.

3.2.2.1 Vias para tráfego

Na Tabela 2 encontram-se os requisitos mínimos exigidos de iluminância média e fator de uniformidade, para cada classe de iluminação. Na Tabela 3 define-se a classe de iluminação para cada tipo de via para tráfego.

Tabela 2 – Requisitos mínimos exigidos para as classes de iluminação de veículos

Classe de Iluminação	Iluminância média (lux)	Fator de Uniformidade
V_1	30	0,4
V_2	20	0,3
V_2	15	0,2
V_4	10	0,2
V_5	5	0,2

Tabela 3 – Classes de Iluminação para Veículos

Descrição da Via	Classe de Iluminação
Vias de Trânsito Rápido	
Volume de tráfego intenso	V_1
Volume de tráfego médio	V_2
Vias Arteriais	
Volume de tráfego intenso	V_1
Volume de tráfego médio	V_2
Vias Coletoras	
Volume de tráfego intenso	V_2
Volume de tráfego médio	V_3
Volume de tráfego leve	V_4
Vias Locais	
Volume de tráfego médio	V_4
Volume de tráfego leve	V_5

3.2.3 Malha de Medição

Segundo a norma brasileira, há três tipos de malha de medição: malha para verificação detalhada, malha de medição devido ao número de rolamentos e malha de referência. Para este trabalho será adotada a malha de verificação detalhada, pois como o nome já diz, é a mais completa e que melhor se enquadra na finalidade do trabalho.

Para a malha de verificação detalhada visualizada na Fig. 12, os pontos de grade devem ser a intersecção das linhas transversais e longitudinais à pista e às calçadas, sendo:

- Uma linha transversal alinhada com cada luminária;
- Uma linha transversal no ponto médio entre as duas luminárias;
- Uma linha longitudinal no eixo de cada faixa;
- Uma linha longitudinal no eixo de cada calçada;

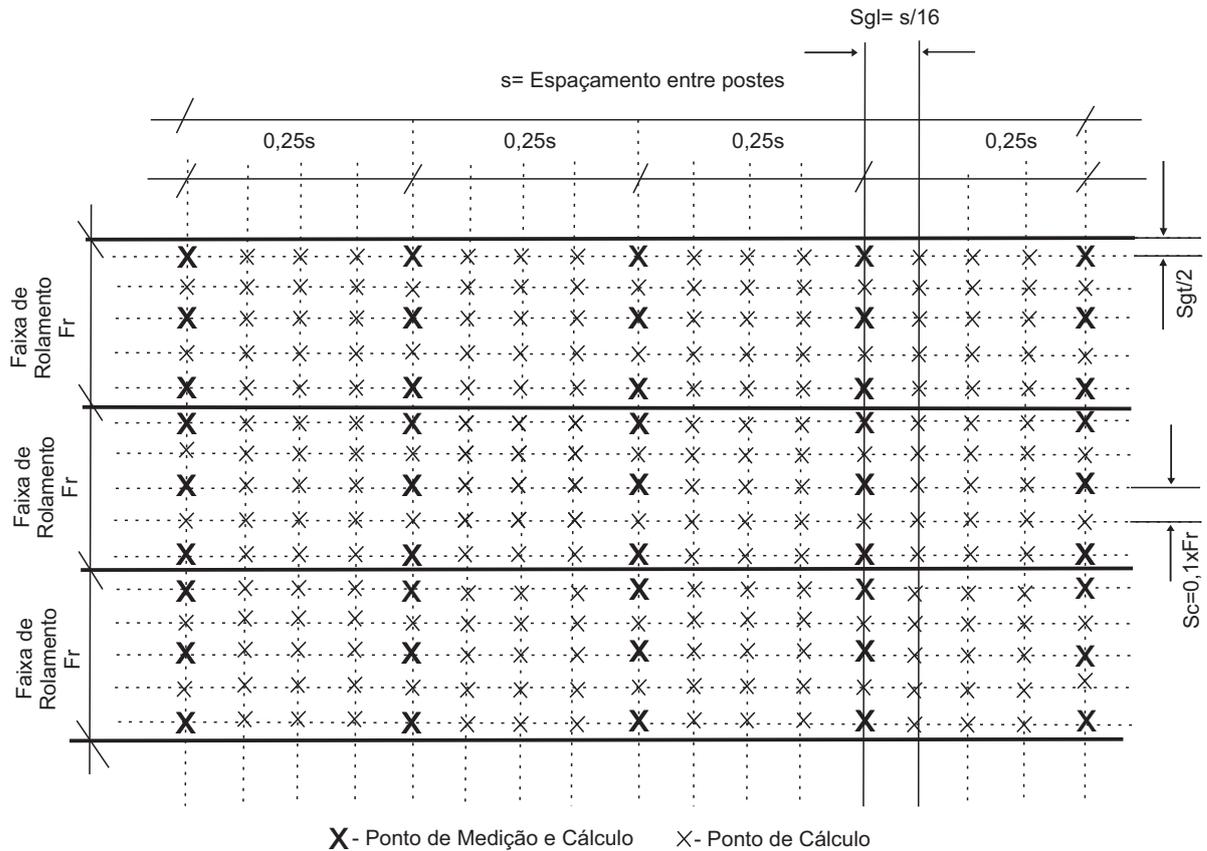


Figura 12 – Malha de medição com pontos de cálculo - Norma NBR 5101.

Fonte – Adaptado de ABNT (2012).

Os espaçamentos longitudinais S_{gl} são obtidos através da Eq. (3.21), em que S é o espaçamento entre postes, notando que os pontos extremos de cada fileira pertencem às linhas transversais que passam pela luminária do vão.

$$S_{gl} = \frac{S}{16} \quad (3.21)$$

Os espaçamentos transversais S_{gt} são obtidos pela Eq. (3.22), em que F_r é a largura da faixa de rolamento. Os pontos extremos de cada coluna são afastados das linhas longitudinais do meio-fio pela Eq. (3.23).

$$S_{gt} = 0,2 \times F_r \quad (3.22)$$

$$S_c = 0,1 \times F_r \quad (3.23)$$

3.3 CIE 140 *versus* NBR 5101

A norma CIE 140 serviu como base para o desenvolvimento do script de cálculos luminotécnicos, pois explica claramente a metodologia de cálculo para obter os parâmetros, por exemplo, como transformar o sistema cartesiano para o sistema de coordenadas (C, γ) , como proceder com os arquivos de dados fotométricos (.IES), como calcular a intensidade luminosa em um dado ponto na via, e assim por diante até obter os parâmetros de iluminação desejados como: iluminância, uniformidade, entre outros.

A norma NBR 5101 auxiliou na parte da malha de medição que é diferente da utilizada na norma CIE 140, como o trabalho está sendo realizado no Brasil utilizou-se a malha de medição da norma NBR 5101. Também foram utilizadas as classes de via para veículos com seus requisitos de iluminância e uniformidade obtidos na Tabela 2.

Então, utilizaram-se conceitos da norma CIE 140 para complementar o pouco embasamento da norma NBR 5101, com a finalidade de aumentar a confiabilidade e robustez do trabalho.

4 Cálculos dos Parâmetros Luminotécnicos

O propósito deste Capítulo é apresentar a metodologia de construção do script de cálculos luminotécnicos e realizar uma comparação dos resultados obtidos pelo script e software Dialux[®], com objetivo de validação. Na Fig.13 visualiza-se o fluxo de entrada e saída das variáveis no script de cálculos luminotécnicos.

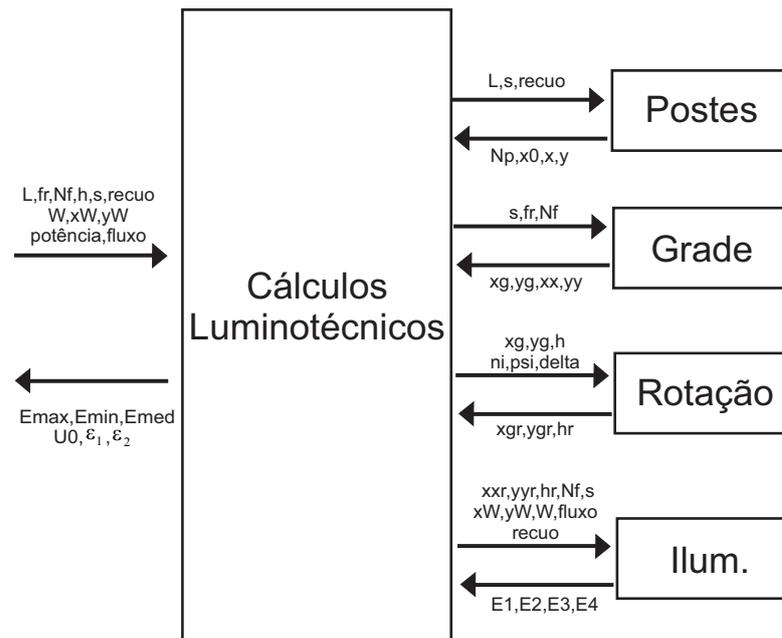


Figura 13 – Metodologia do Script de Cálculos luminotécnicos.

Fonte – Elaborado pelo autor

Como entrada do script tem-se o comprimento da via (L), a largura da faixa de rolamento (Fr), o número de faixas de rolamentos (Nf), a altura de montagem (h), o espaçamento entre postes (s), o recuo do poste ($recuo$) e os dados fotométricos da luminária. Primeiramente, calcula-se o número de postes na via utilizando a Eq. (4.1).

$$Np = \left(\frac{L}{s}\right) + 1 \quad (4.1)$$

Para o cálculo da posição do primeiro poste, utiliza-se a Eq.(4.2).

$$x_0 = \frac{(L - s) \times (Np - 1)}{2} \quad (4.2)$$

Já para obter os pontos de cálculo da malha de medição da norma NBR 5101, aplica-se a Eq. (3.21) para espaçamento longitudinal e a Eq. (3.22) para os espaçamentos

transversais, levando em consideração o espaçamento entre o primeiro ponto e o meio-fio, conforme a Eq. (3.23).

Se a luminária for rotacionada calculam-se os novos pontos (x_r e y_r) da malha de cálculo, utilizando as coordenadas atuais dos pontos (x e y), a altura de montagem (h) e os ângulos de orientação (v), de inclinação (ψ) e de rotação (δ), respectivamente, com as (3.9), (3.10) e (3.11).

Para calcular a iluminância, em cada ponto, necessita-se converter o sistema de coordenadas cartesianas para o sistema de coordenadas (C, γ). Então, avalia-se o azimute (φ) da instalação e os quadrantes em que se encontram os pontos. Assim, aplica-se uma das quatro Eqs. (3.12), (3.13), (3.14) e (3.15). Após calculado este azimute, utiliza-se a Eq. (3.16) para encontrar o azimute fotométrico (C) e a Eq. (3.17) para determinar o ângulo fotométrico vertical (γ).

Com os valores de C e γ calculados, utilizam-se os arquivos IES para obtenção dos valores de intensidade luminosa. Se os valores de C ou γ forem intermediários aos existentes na tabela, utilizam-se as Eqs. (3.1), (3.2), (3.3), (3.4) e (3.5) para a obtenção das intensidades luminosas intermediárias.

Por fim, a iluminância vertical em cada ponto da malha de cálculo dá-se pela Eq. (3.18), levando em consideração o fator de manutenção unitário. Então, a iluminância média é dada pela média aritmética dos pontos de cálculo da grade como demonstrado na Eq. (4.3) dado em Lux.

$$Eméd = méd(E) \quad (4.3)$$

O valor de iluminância máxima é o maior valor de iluminância encontrado na grade de cálculos obtido pela Eq. (4.4) em Lux.

$$Emáx = máx(E) \quad (4.4)$$

O valor de iluminância mínima é o menor valor encontrado na grade de cálculos e é dado segundo a Eq. (4.5) em Lux.

$$Emín = mín(E) \quad (4.5)$$

A uniformidade da malha de medição é obtida através da Eq. (4.6), sendo adimensional.

$$U_0 = \frac{Emín}{Eméd} \quad (4.6)$$

A eficiência-uniformidade é obtida pela Eq. (4.7), sua unidade é $1/W$.

$$\varepsilon_1 = \frac{U_0}{Np \times Potência} \quad (4.7)$$

A definição de eficiência energética na iluminação é alvo de muitas divergências sendo determinada de várias formas, porém, nesse trabalho, utiliza-se a mesma definição citada em Gómez-Lorente et al. (2013) e Castillo-Martinez et al. (2017), visualizada na Eq. (6.1), sua unidade é $\frac{m^2 \times Lux}{W}$ ou $(\frac{lm}{W})$.

$$\varepsilon_2 = \frac{L \times Fr \times Nf \times Eméd}{Np \times Potência} \quad (4.8)$$

4.1 Validação do script proposto

A validação é realizada para a parte dos cálculos luminotécnicos. São comparados os resultados da uniformidade, iluminância máxima, mínima e média obtidos pelo script proposto com aqueles resultantes da simulação com a mesma configuração de via no software Dialux[®], o qual é amplamente utilizado por engenheiros e projetistas de iluminação. Essa ferramenta é livre e pode ser baixada pelo site do fabricante (DIAL GmbH, 2017).

Realizaram-se simulações para uma configuração específica de via e para dois tipos de luminárias, sendo as fabricantes *General Electric Lighting* (GE) e *Philips Lighting*. Os arquivos .IES da GE estão disponibilizados no site da empresa na seção *road and street e outdoor lighting*, já os da Philips foram obtidos através de um plugin disponibilizado no site que contém todos os arquivos .IES das luminárias fabricadas por eles. A configuração utilizada foi a seguinte:

- Comprimento da via (L): 30 metros;
- Largura da Faixa de rolagem (Fr): 3 metros;
- Número de Faixas de rolagem (Nf): 2 faixas;
- Altura de montagem (h): 5 metros;
- Distância entre postes (s): 30 metros.

Na Tabela 4 podem ser visualizados os dados fornecidos pelos fabricantes das luminárias utilizadas na validação e calibração do script.

Tabela 4 – Luminárias utilizadas na validação

Fabricante	Luminária	Potência (W)	Fluxo Luminoso (lm)
GE	Euro 2	70	6600
Philips	SGS102	150	17500

Fonte: Adaptado de arquivo disponibilizado pelas fabricantes.

Na Fig. 14, verificam-se as distribuições luminosas para as luminárias utilizadas, as quais foram obtidas por meio do software IES viewer[®].

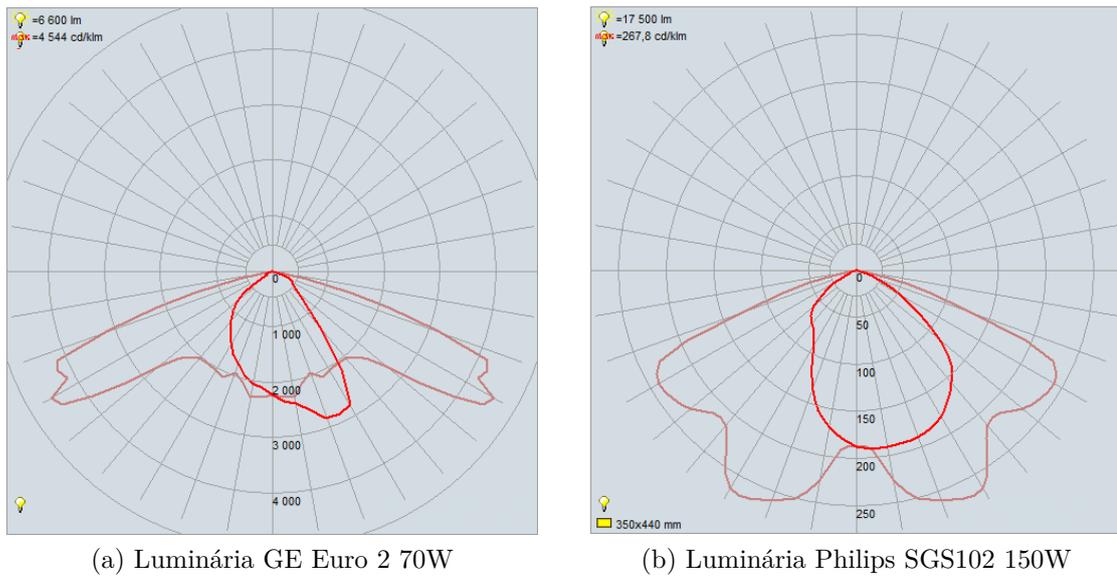


Figura 14 – Curva das distribuições Luminosas para Luminárias utilizadas.

Fonte: Adaptado do Software IES viewer®

4.1.1 Luminária da GE 70 W

Os valores de iluminâncias e uniformidades obtidos pelo script foram bem próximos aos valores simulados no Dialux®, como apresentado na Tabela 5, portanto essas pequenas diferenças mostram claramente a precisão do script proposto em relação a um software já consolidado no mercado de projetos de IP.

Tabela 5 – Comparação de resultados para luminária da GE 70W.

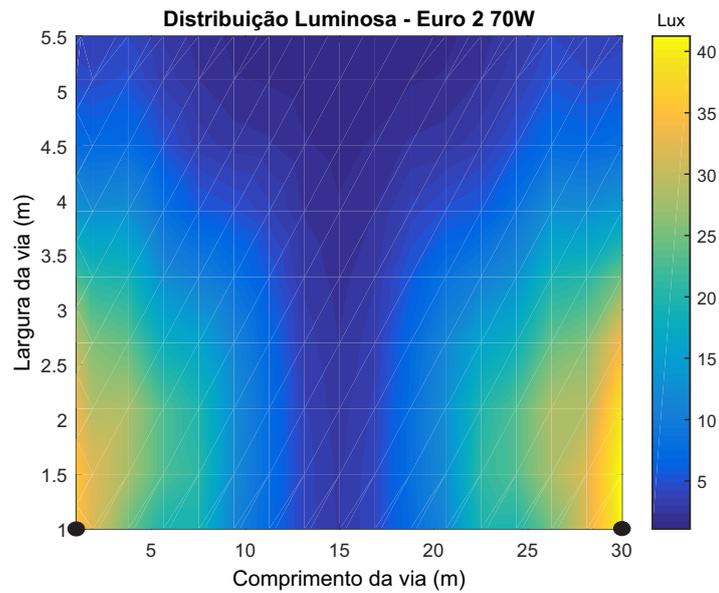
Parâmetros	Script	Dialux
E_{max} (lux)	35,8976	38,0000
E_{mín}	1,1304	1,0600
E_{med}	11,3556	11,0000
U_o	0,0995	0,0930

Na Tabela 6, observa-se o erro máximo, mínimo e médio para os valores da Tabela 5. Esses erros foram considerados utilizando todos os pontos da malha de cálculo visualizada na Fig.12, ou seja, cada ponto da malha calculada no script era comparado com o valor correspondente na malha obtida através do Dialux® para a luminária Euro 2 70W o erro médio ficou em torno de 8,5%.

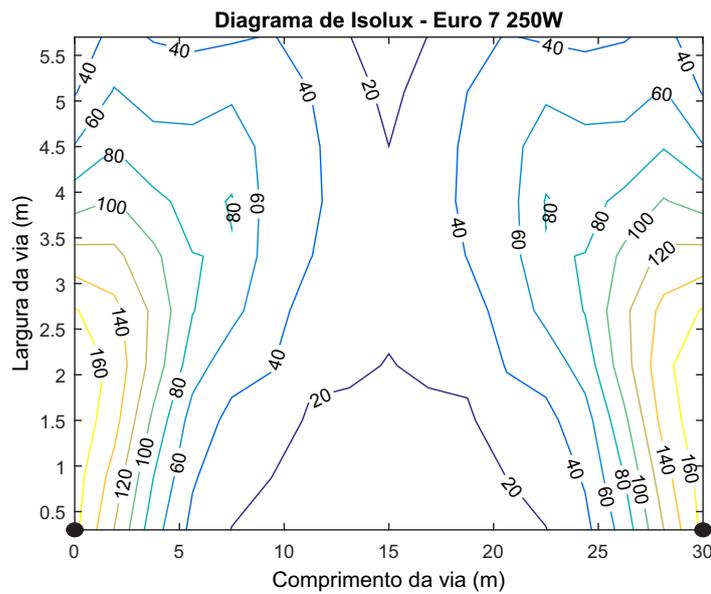
Tabela 6 – Erros relativos da luminária GE 70W.

Erros Relativos (%)	Euro 2 - 70W
Erro máximo	19,4107
Erro mínimo	0,2901
Erro médio	8,6380

Na Fig.15, é apresentado o diagrama de intensidades luminosas e diagrama isolux obtidos para a via a partir da luminária GE 70W e geradas pelo script proposto.



(a) Diagrama de intensidades luminosas



(b) Diagrama Isolux

Figura 15 – Distribuição Luminosa e Isolux para Luminárias da GE 70W.

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.2 Luminária da Philips

Novamente, os resultados do script e Dialux foram semelhantes, mesmo utilizando uma luminária de potência e fabricante diferentes da seção anterior. Isto reforça a ideia de precisão e validação do script proposto. Na Tabela 7 são visualizados os resultados obtidos pelo Dialux[®] e script proposto.

Tabela 7 – Comparação de resultados para luminária Philips 150W.

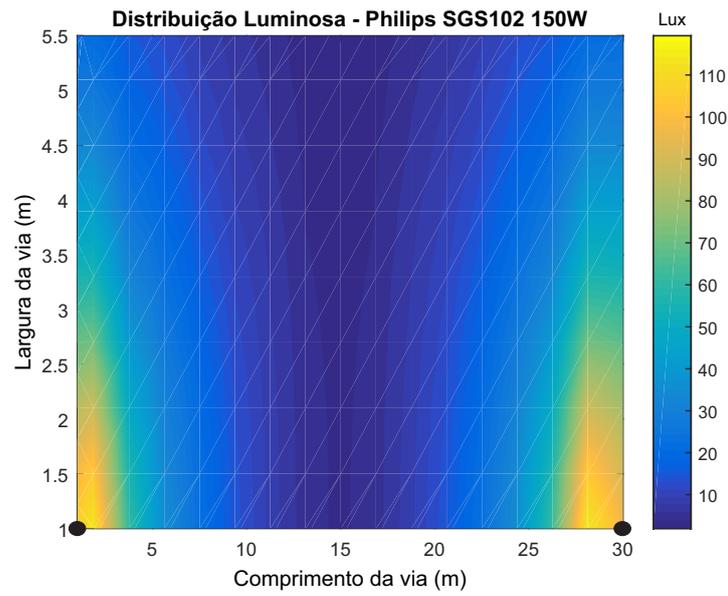
Parâmetros	Script	Dialux
E_{max} (lux)	116,3306	106,0000
E_{mín}	2,2233	2,0900
E_{med}	24,2960	22,0000
U_o	0,0915	0,0950

O erros médio, mínimo e máximo podem ser visualizados na Tabela 8, como nas luminárias da GE 70W, os erros foram calculados levando em consideração todos os pontos da malha de cálculo. Os valores não foram tão baixos como anteriormente, porém ainda estão dentro da faixa aceitável de erros. Na literatura, erros de até 10% são considerados aceitáveis (GÓMEZ-LORENTE et al., 2013).

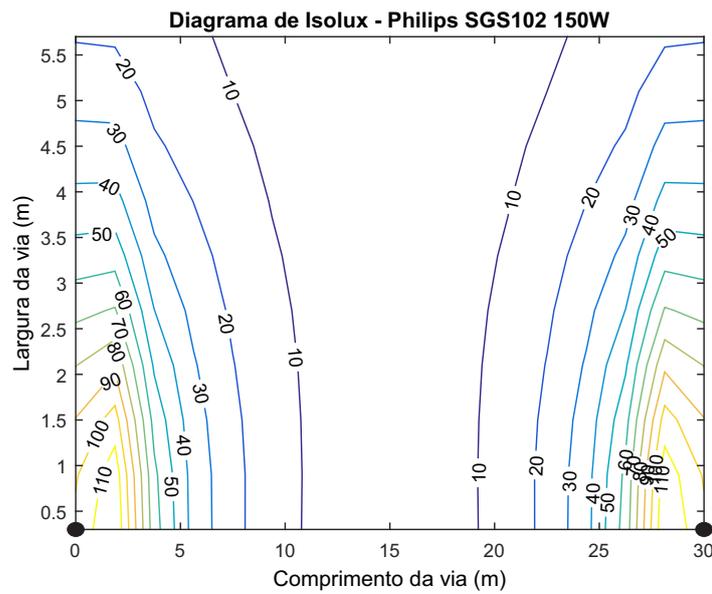
Tabela 8 – Erros relativos da luminária Philips 150W

Erros Relativos (%)	SGS102 150W
Erro máximo	13,1392
Erro mínimo	6,3786
Erro médio	9,7966

Na Fig. 16 podem ser visualizados os diagramas de intensidades luminosas e diagramas Isolux para a luminária da Philips 150W.



(a) Diagrama de Intensidade Luminosa



(b) Diagrama Isolux

Figura 16 – Distribuição Luminosa e Isolux para Luminária Philips 150W.

Fonte: Elaborado pelo autor

5 Otimização por Enxame de Partícula

O método de otimização por enxame de partículas foi introduzido por Eberhart e Kennedy (1995) 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 e 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 são 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 a novas posições no espaço de busca. Nesse sentido, representam a movimentação no espaço (SERAPIÃO, 2009). O Algoritmo 1 descreve o pseudocódigo do método, que será a base para o script completo.

Então, o método de otimização escolhido para implementação foi a Otimização por Enxame de Partículas (Particle Swarm Optimization - PSO), pois é um método que vem sendo utilizado para resolução de problemas de otimização em diversas áreas da engenharia. Este método costuma apresentar alta velocidade de convergência, além de simplicidade de implementação (SICILIANO, 2007).

No presente trabalho, o método será aplicado em iluminação, mais precisamente em projetos de iluminação pública, tendo como objetivo maximizar a eficiência energética. Primeiramente, não são utilizadas restrições, porém as variáveis de controle serão limitadas. Posteriormente são aplicadas as restrições, nas quais os requisitos mínimos de cada classe de iluminação serão avaliados. Com intuito de obter uma eficiência energética, a partir de parâmetros de iluminância média e uniformidade que cumpram a norma.

Algoritmo 1: PSEUDOCÓDIGO BÁSICO DO PSO

```

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

```

A atualização da velocidade de cada partícula é obtida através da Eq.(5.1).

$$V_{k+1}^i = w \times V_k^i + \varphi_1 \times \varepsilon_1 \times (p^i - x_k^i) + \varphi_2 \times \varepsilon_2 \times (p_k^s - x_k^i) \quad (5.1)$$

Em que:

- V_{k+1}^i é a velocidade atual da partícula;
- x_k^i é a 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 e φ_2 são os fatores cognitivo e social, respectivamente;
- ε_1 e ε_2 são números aleatórios com distribuição uniforme no intervalo $[0,1]$.

E a atualização da posição é realizada pela Eq.(5.2).

$$x_{k+1}^i = x_k^i + V_{k+1}^i \quad (5.2)$$

Em que:

- x_{k+1}^i é a posição de cada partícula i na iteração $k + 1$;
- x_k^i é a posição atual da partícula i na iteração k ;
- V_{k+1}^i é o vetor de velocidade da partícula.

5.1 Implementação do PSO

O fluxograma de funcionamento do script completo é apresentado na Fig. 17, utilizando o script de cálculos luminotécnicos como função *fitness*.

O primeiro passo é a escolha dos parâmetros a serem utilizados pelo método de otimização, então escolhe-se o número de partículas, dimensões e o valor de tolerância que será utilizado como critério de parada.

O segundo passo é limitar as variáveis de controle, ou seja, inserir um valor mínimo e máximo para altura de montagem, espaçamento entre postes, inclinação da luminária e recuo.

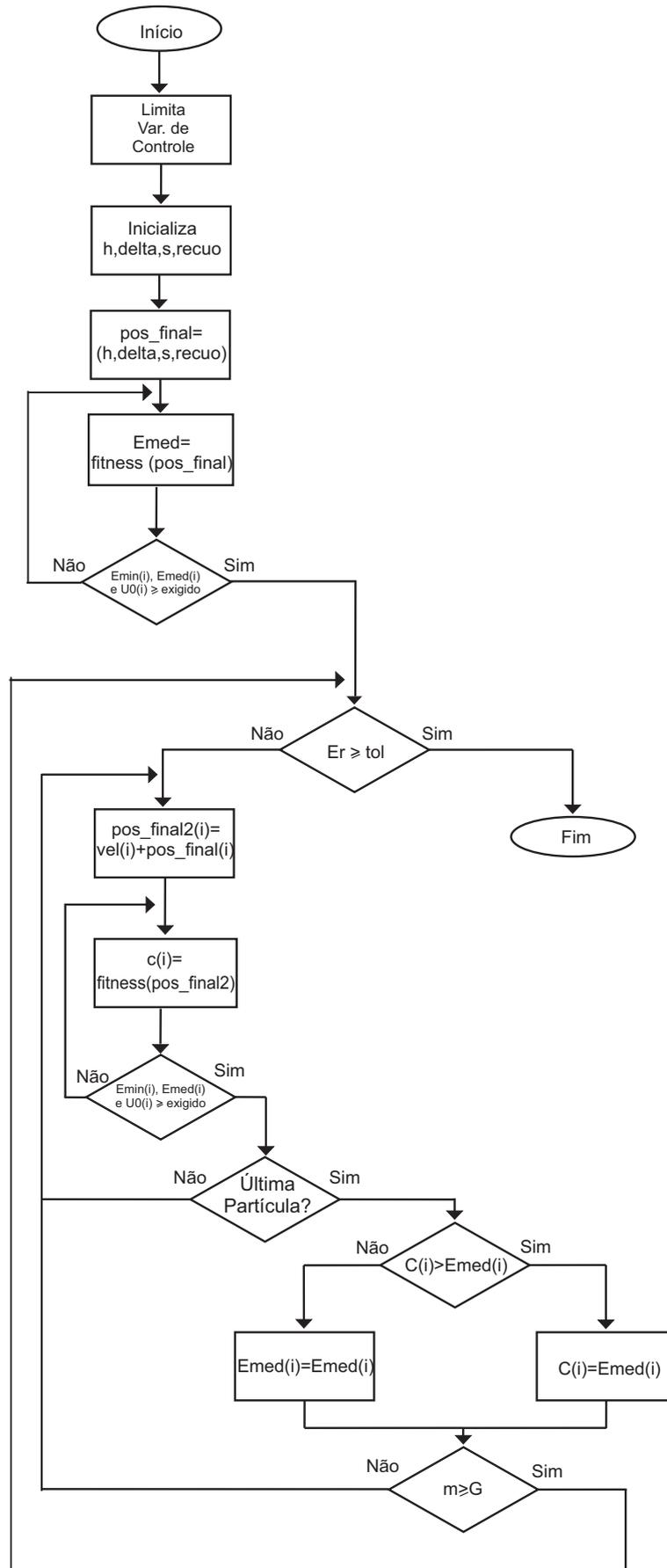


Figura 17 – Metodologia do Script de Cálculos luminotécnicos.

Fonte – Elaborado pelo autor

No terceiro passo, inicializam-se as variáveis de controle randomicamente dentro de uma faixa exigida, conforme restrições na Eq.(5.3). Após a inicialização das variáveis é construída uma matriz chamada de posições, em que cada coluna representa uma variável de controle e cada linha uma partícula.

O quarto passo é a avaliação da função *fitness*, que neste caso, será o cálculo da eficiência energética. Então, o retorno da função será uma matriz, em que cada coluna representa um parâmetro e cada linha uma partícula. Portanto, retorna um valor de iluminância mínima, de iluminância média, de uniformidade e um de eficiência energética que foi obtido a partir dos parâmetros anteriores, para cada partícula.

Após a obtenção da matriz com as eficiências energéticas para cada partícula é realizada a comparação dos valores de iluminância média, de iluminância mínima e de uniformidade, com os valores mínimos exigidos na norma, para cada classe de iluminação. Assim, não podendo resultar em uma eficiência energética que se originou de parâmetros não normalizados.

A partir daí, compara-se a matriz originada da avaliação da função *fitness* com o Pbest da partícula. Se o valor atual for melhor que Pbest então, o valor de Pbest é substituído pelo valor *fitness* encontrado e a posição Pbest pela posição atual no espaço de busca.

O valor *fitness* é comparado com os melhores valores encontrados em toda população. Se o valor atual for maior que o Gbest, então o Gbest é modificado para o índice e valor da partícula atual.

Após salvos Gbest e Pbest, compara-se o valor do erro calculado com a tolerância exigida. Na primeira iteração esse erro será um valor ajustado maior que a tolerância, para o código não convergir previamente.

Então, atualiza-se a velocidade pela Eq. (5.1), considerando a velocidade máxima configurada e a posição utilizando a Eq. (5.2), assim produzindo uma novo vetor de posições e esse processo é repetido até a última partícula.

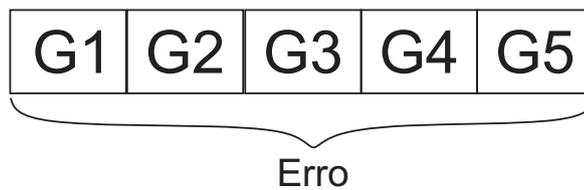
Desta forma com o novo vetor de posições avalia-se novamente a função *fitness*, e são comparados os valores dos parâmetros obtidos após a avaliação com os encontrados na norma vigente, a fim de atender os requisitos mínimos exigidos.

Por fim, comparam-se os valores de cada partícula da matriz nova com os valores da matriz originados pela avaliação da função *fitness* anterior, salvando os maiores valores nas variáveis Gbest e Pbest. Esse processo é realizado até que seja atingido o número máximo de gerações e o erro calculado seja menor que a tolerância definida.

5.1.1 Critério de Parada

Geralmente, um número máximo de iterações é utilizado como critério de parada dos processos evolutivos. Porém, a eficiência desse critério depende diretamente do problema de otimização em foco, também considerando as possíveis variações resultantes da aleatoriedade do algoritmo evolutivo. Então, para se obter um melhor desempenho, outros critérios de parada devem ser implementados (ZIELINSKI; LAUR, 2007).

Implementou-se um critério de parada levando em consideração o erro entre gerações. No começo do código é configurado um valor de tolerância e de gerações, após o algoritmo ser executado até o número de gerações configurado, é calculado o erro como visualizado na Fig. 18a. Se o erro calculado for maior que o valor de tolerância, então é simulada mais uma geração e o erro é calculado novamente descartando a primeira geração, como visto na Fig. 18b. Esse processo é refeito até o valor do erro ser menor do que o valor de tolerância.



(a) Erro para cinco gerações



(b) Erro para seis gerações

Figura 18 – Erros para as gerações

Fonte – Elaborado pelo autor

5.2 Calibração das Variáveis do PSO

Após a implementação do método de otimização utilizando o script cálculos luminotécnicos como função *fitness*, procedeu-se a calibração de alguns parâmetros do PSO. O problema teste de otimização está apresentado na Eq. (5.3)

$$\begin{array}{l}
 \underset{h,s,\theta,recuo}{Max.} \quad Emed(h, s, \theta, recuo) \\
 s.a \quad \left\{ \begin{array}{l}
 5 \leq h \leq 15 \\
 5 \leq s \leq 30 \\
 0 \leq \theta \leq 60 \\
 0 \leq recuo \leq 3
 \end{array} \right. \quad (5.3)
 \end{array}$$

5.2.1 Número de Partículas

Na Tabela 9, é apresentado a iluminância média, o tempo e a iluminância média máxima, bem como os desvios padrões entre as vinte simulações para cada parâmetro.

A eficiência da iluminância média e da melhor solução para cada número de partículas testadas pode ser visualizado na Tabela 10. A Eficiência da iluminância média é verificada na Eq. (5.4) e a eficiência da iluminância média máxima obtida através da Eq.(5.5).

$$Efi.Emed = \frac{Emed}{temp_execução} \quad (5.4)$$

$$Efi.Emed,máx = \frac{Emed,máx}{temp_execução} \quad (5.5)$$

Tabela 9 – Resultado dos parâmetros - Número de Partículas

Part.	Emed (lux)	D. P.	t(s)	D.P.	Emed Máx.(lux)	t(s)
10	140,3310	42,2460	285,7860	3,4660	173,9520	288,5400
20	190,2840	80,4400	112,0170	28,3080	321,4620	166,4900
30	259,4600	64,5020	498,4250	193,0450	328,0130	315,4300
40	286,9550	24,9300	414,4050	368,3120	326,4000	104,4300
50	241,0940	42,1340	284,2630	69,8550	292,8430	220,0100
60	234,5650	17,7840	520,0340	82,1850	275,8270	329,3500
70	311,7130	13,9740	735,9340	157,8680	328,6290	855,5400
100	303,9150	30,9560	935,2960	237,1130	332,2100	904,8900

Na Tabela 10 observa-se que a eficiência da iluminância média é explicitamente maior em 20 partículas. Além disso, as simulações possuíram o tempo de execução inferior aos outros valores de partículas testados para a eficiência da iluminância média. Portanto, optou-se por utilizar o número de 20 partículas para todas as simulações posteriores.

Tabela 10 – Eficiência da Iluminância - Número de Partículas

Part.	Efi. Emed	Efi. Emed Máx.
10	0,49104	0,60287
20	1,69871	1,93082
30	0,52056	1,03989
40	0,69245	3,12554
50	0,84814	1,33104
60	0,45106	0,83749
70	0,42356	0,38412
100	0,32494	0,36713

5.2.2 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 verifica se o erro nas últimas n gerações é menor que a tolerância definida.

Na Tabela 11, é apresentada a iluminância média, o tempo e a iluminância média máxima, bem como os desvios padrões entre as vinte simulações para cada parâmetro.

Tabela 11 – Resultado dos parâmetros - Gerações

Ger.	Emed (lux)	D.P.	t (s)	D.P	Emed Máx. (lux)	t (s)
10	151,2302	73,0384	40,1966	33,3306	324,8094	36,4530
20	127,4903	80,4400	112,0168	28,3083	321,4616	166,4858
30	169,8665	9,5925	196,6254	77,5485	262,5715	63,6941
40	137,4356	63,5677	319,9883	168,4025	316,9045	113,0326
50	193,9652	39,7179	205,4469	65,7173	330,0615	157,6181
60	184,6437	51,4097	246,5299	21,5497	323,4837	252,7302
70	128,2833	30,7360	280,7454	67,4901	287,8899	171,9747
80	182,0899	23,6188	556,8196	50,7593	271,7759	556,8196
90	208,3418	15,7756	1595,4214	908,4986	323,1066	1587,9341
100	161,6771	68,6423	633,6511	184,8923	310,2655	778,2382

Na Tabela 12, visualiza-se a eficiência da iluminância média e do melhor resultado. Tem-se a maior eficiência quando se utilizam dez gerações, porém não foi o que obteve o maior valor de eficiência média, sendo que o objetivo é a maximização do mesmo. O maior valor de iluminância média foi em 90 gerações e o segundo maior foi em 50 gerações, entretanto o tempo de execução em 90 foi praticamente 8 vezes maior, conseqüentemente, a eficiência da iluminância média foi bem abaixo de quando empregou-se 50 gerações. Assim, o valor escolhido para ser fixado como número de gerações é 50.

Tabela 12 – Eficiência da Iluminância- Gerações

Ger.	Efi.Emed.	Efi. Emed Máx.
10	3,7623	8,9104
20	1,1381	1,9309
30	0,8639	4,1224
40	0,4295	2,8037
50	0,9441	2,0941
60	0,7490	1,2800
70	0,4569	1,6740
80	0,3270	0,4881
90	0,1306	0,2035
100	0,2552	0,3987

5.2.3 Fator de Inércia

Após o número de partículas e gerações escolhidos, foi realizada uma análise no fator de inércia. Na Tabela 13 encontram-se os resultados para valores de inércia testados de 0,7 a 1,3 em um intervalo de 0,1. Observa-se que o maior valor de iluminância média foi em 0,9 e o segundo maior em 1. Porém o menor tempo de execução foi conseguido utilizando o fator igual a 1.

Tabela 13 – Resultado dos parâmetros - Fator de Inércia

Inércia	Emed (lux)	D.P.	t (s)	D.P.	Emed máx (lux)	t(s)
0,7	259,5880	68,6530	310,8040	106,6570	306,1400	402,9700
0,8	257,7400	81,5580	594,5700	54,6440	329,2900	466,9900
0,9	293,7340	50,5740	263,7950	33,2850	326,3040	335,7800
1	289,5000	159,8040	205,4770	73,4330	330,0610	157,6200
1,1	272,4570	74,0170	230,3770	70,8190	316,4580	107,2500
1,2	186,2430	0,0000	324,4230	0,0000	186,2430	324,4200
1,3	277,8990	65,0040	309,4840	67,1810	314,9300	107,8200

A Tabela 14 contempla a eficiência da iluminância média e da iluminância média máxima e verifica-se que a melhor eficiência para iluminância média é utilizando o fator de inércia 1. Portanto, foi escolhido o fator de inércia igual a 1.

Tabela 14 – Eficiência da Iluminância - Fator de Inércia

Inércia	Efi. Emed	Efi. Emed Máx
0,7	0,835	0,760
0,8	0,433	0,705
0,9	1,113	0,972
1	1,409	2,094
1,1	1,183	2,951
1,2	0,574	0,574
1,3	0,898	2,921

6 Resultados

Estes resultados atendem o objetivo principal e os específicos deste trabalho. Portanto, maximizando a eficiência energética considerando os requisitos mínimos estipulados na norma vigente brasileira.

Os resultados foram obtidos utilizando um problema de otimização sem restrições, no domínio contínuo (números inteiros e decimais) e discreto (números inteiros). Para as variáveis de controle altura de montagem (h), distanciamento entre postes (s), recuo (*recuo*) e inclinação da luminária (*delta*).

Após a análise de dados sem restrições, o código foi adaptado para trabalhar com restrições, ou seja, respeitando a norma brasileira e, ainda, para o domínio contínuo e discreto. Então foi utilizado o mesmo problema de otimização, porém considerando os requisitos mínimos para cada classe de iluminação de V1 a V5.

Foram testadas as luminárias da GE Euro 2 70W e da Philips SGS102 150W, que já foram validadas nas seções anteriores e obtiveram pequenos erros médios em relação ao Dialux®.

Foram executados 20 experimentos para o problema de otimização sem restrições e com restrições para cada tipo de luminária e, ainda, foram consideradas as classes de iluminação no segundo caso.

Todas as simulações foram realizadas utilizando as seguintes configurações da via e do método de otimização, sendo essas:

- Comprimento da via (L): 500 metros;
- Largura da faixa de rolagem (Fr): 3 metros;
- Número de faixas de rolagem (Nf): 2 faixas;
- Número de Partículas (*numpar*): 20 partículas;
- Critério de parada: 50 gerações;
- Fator Cognitivo (φ_1) e Social (φ_2): 2;
- Fator de inércia (w): 1;
- Velocidade Máxima ($V_{máx}$): 5.

Foram aplicadas restrições para as variáveis de controle do problema de otimização, como será apresentado posteriormente. Tais variáveis podem ser visualizadas na Fig. 19. A altura de montagem (h) ficou limitada de 5 a 15 metros; a inclinação da luminária

(*delta*) de 0 a 60 graus; o distanciamento entre postes (*s*) foi de 5 a 30 metros e o recuo da luminária (*recuo*) de 0 a 3 metros, assim limitando o espaço de busca.

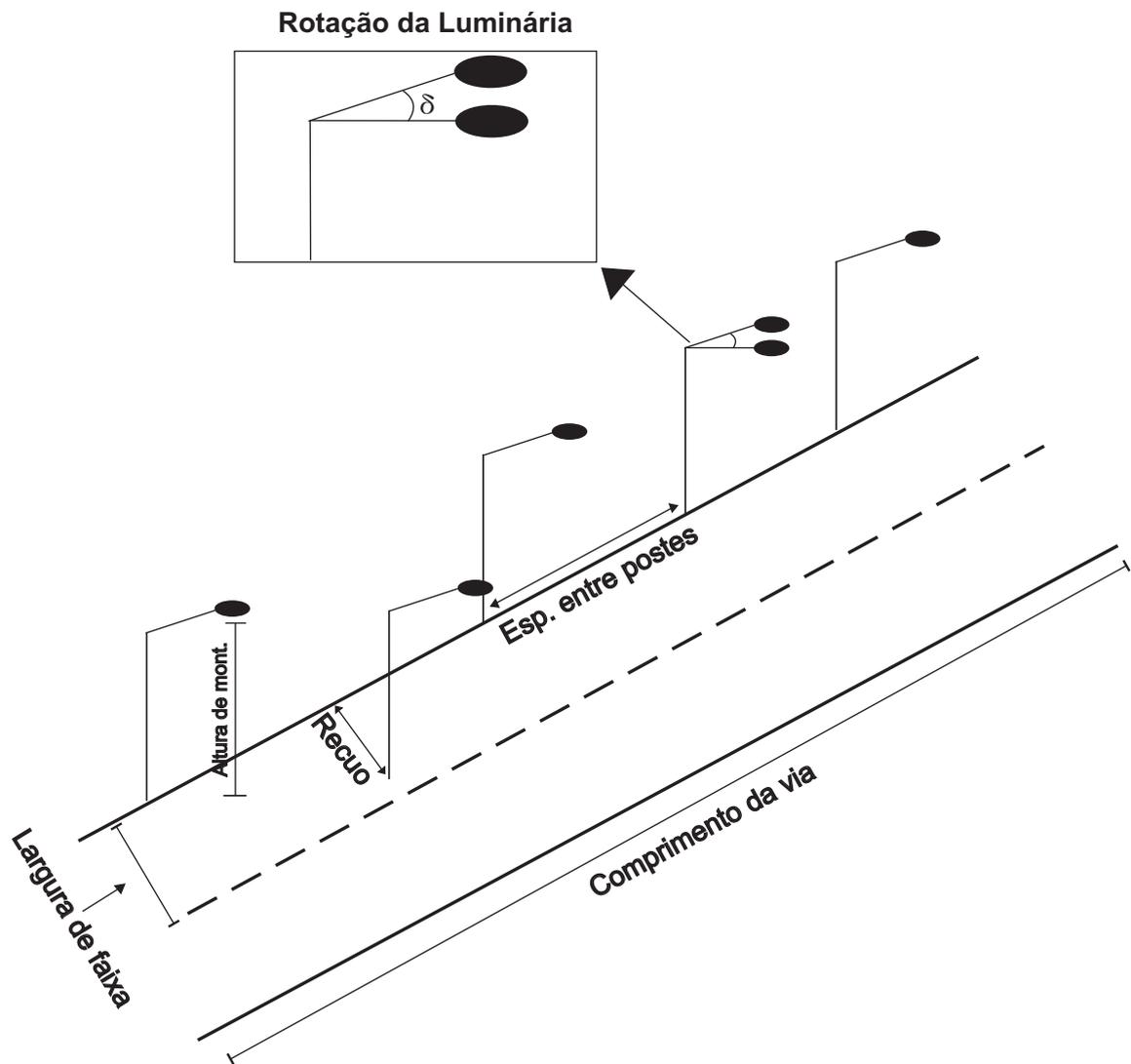


Figura 19 – Variáveis de controle do problema de otimização.

Fonte – Elaborado pelo autor

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

6.1 Luminárias utilizadas

Na Tabela 15 são apresentados os dados das luminárias que foram utilizadas nas simulações dos resultados, contendo seu fabricante, código do fabricante, potência e fluxo luminoso.

Tabela 15 – Luminárias utilizadas no trabalho

Fabricante	Luminária	Potência (W)	Fluxo Luminoso (lm)	Ef. (lm/W)
GE	Euro 2	70	6600	94,28
Philips	SGS102	150	17500	116,66

Fonte: Adaptado de arquivo disponibilizado pelas fabricantes.

6.2 Sem considerar a Norma Brasileira

Primeiramente foi realizado a simulação para o problema de otimização sem restrições, ou seja, não considerando os requisitos mínimos exigidos na norma. Esse problema é apresentado na Eq.(6.1), na qual se visualizam as limitações nas variáveis de controle.

$$\begin{array}{l}
 \underset{h,s,\theta,recuo}{Max.} \quad \epsilon_2(h, s, \theta, recuo) \\
 s.a \quad \left\{ \begin{array}{l}
 5 \leq h \leq 15 \\
 5 \leq s \leq 30 \\
 0 \leq \theta \leq 60 \\
 0 \leq recuo \leq 3
 \end{array} \right. \quad (6.1)
 \end{array}$$

6.2.1 Luminária GE 70W

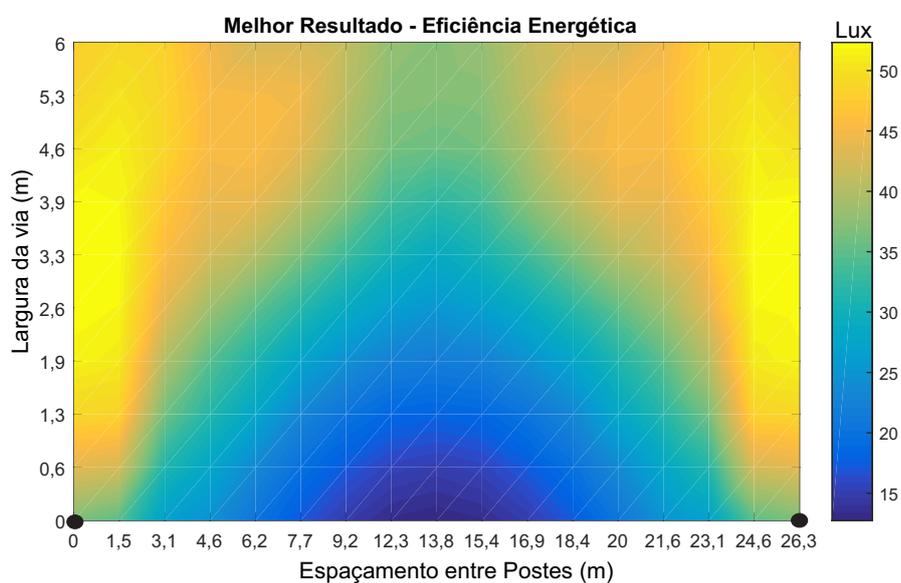
Após analisar os 20 experimentos e sintetizá-los pode-se criar a Tabela 16, em que se encontram os melhores resultados, as médias e desvios padrões, para o domínio contínuo e discreto.

Primeiramente, observa-se que as maiores eficiências foram alcançadas no domínio discreto. Tanto para o melhor experimento como para as médias dos experimentos.

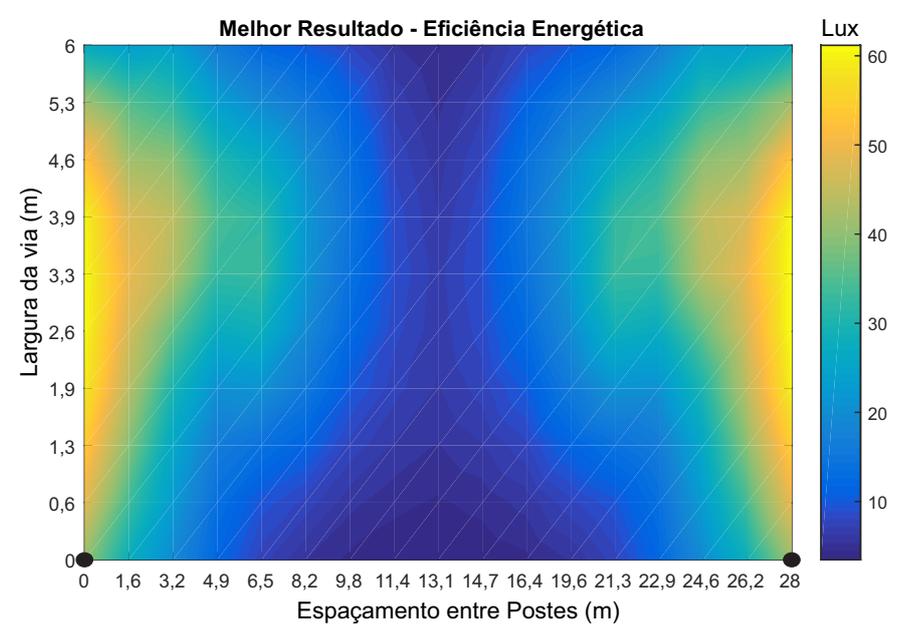
Em relação às médias, apesar da eficiência energética ser maior no domínio discreto, a uniformidade mostrou um comportamento inverso. Isso se deve ao fato de que a uniformidade é a razão entre iluminância mínima e iluminância média. Então, como a média diminuiu e a mínima aumentou, o valor de uniformidade foi maior em relação ao domínio contínuo.

O tempo de execução e o número de iterações foram menores para o domínio discreto.

Na Fig. 20 se visualizam os diagramas de intensidades luminosas, para os melhores resultados das maximizações para o domínio contínuo e discreto. Nota-se na Fig. 20a que a iluminância máxima e a uniformidade é maior do que na Fig. 20b.



(a) Eficiência Energética - Contínuo



(b) Eficiência Energética - Discreto

Figura 20 – Melhores resultados para luminária GE Euro 2 70W

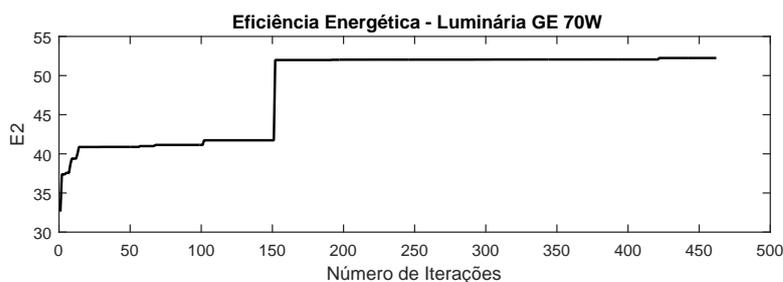
Fonte – Elaborado pelo autor

Tabela 16 – Resultados para Luminária GE Euro 2 70W

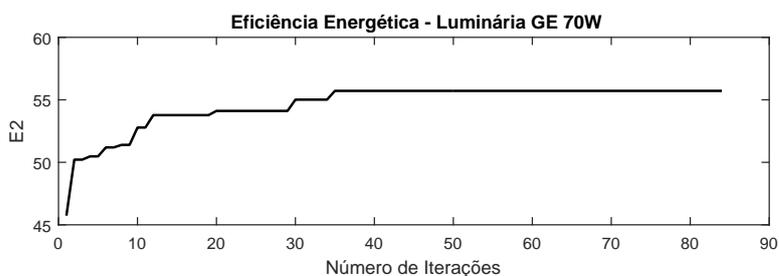
	Contínuo			Discreto		
	Melhor	Média	D.P.	Melhor	Média	D.P.
Np-(Unid.)	18,00	33,20	11,54	18,00	25,05	12,07
x0-(m)	13,89	8,05	2,77	12,00	9,55	3,41
h-(m)	5,00	5,30	1,33	5,00	5,00	0,00
delta-(°)	7,25	10,53	9,15	0,00	6,75	6,37
s-(m)	27,78	16,93	5,79	28,00	23,10	6,81
recuo-(m)	0,93	0,85	0,73	2,00	1,05	0,89
Emin-(lux)	4,14	15,54	9,43	3,47	9,25	9,95
Emed-(lux)	23,02	39,56	14,75	23,40	31,28	14,17
Emax-(lux)	56,16	63,83	18,31	61,17	62,94	12,84
Uo	0,18	0,37	0,11	0,15	0,25	0,12
ϵ_2 ($\frac{m^2 \cdot lux}{W}$)	54,81	50,74	5,94	55,72	53,97	1,17
Iterações	462,00	414,70	102,37	84,00	110,80	27,48
Tempo (s)	218,33	195,68	48,89	67,87	89,89	22,67
Núm. de exp.	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Total de iter.	8294,00	8294,00	8294,00	2216,00	2216,00	2216,00

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Fig. 21 se visualiza o gráfico de convergências dos melhores resultados para cada domínio. Nota-se que no gráfico para o domínio discreto, a convergência ocorreu mais rápido, por volta da iteração 40 e no domínio contínuo essa convergência foi obtida na iteração 150.



(a) Eficiência Energética - Contínuo



(b) Eficiência Energética - Discreto

Figura 21 – Convergência para luminária GE Euro 2 70W

Fonte – Elaborado pelo autor

6.2.2 Luminária Philips 150W

Após obter e resumir os dados de todos os experimentos, obteve-se a Tabela 17, na qual além das médias dos 20 experimentos, tem-se os resultados do melhor experimento para cada domínio.

Como notado na luminária da GE 70W, os resultados de eficiência energética foram melhores para o domínio discreto, tanto no melhor experimento como na média dos experimentos.

O número total de iterações e o tempo de execução foram maiores novamente para o domínio contínuo.

Em relação às médias, a iluminância média e a mínima foram maiores para o domínio contínuo. Porém, a iluminância máxima teve comportamento inverso, foi maior no domínio discreto.

O número de postes foi maior para o domínio contínuo, conseqüentemente, o espaçamento entre postes foi menor. As alturas de montagem obtiveram valores mínimos, em relação à restrição da variável.

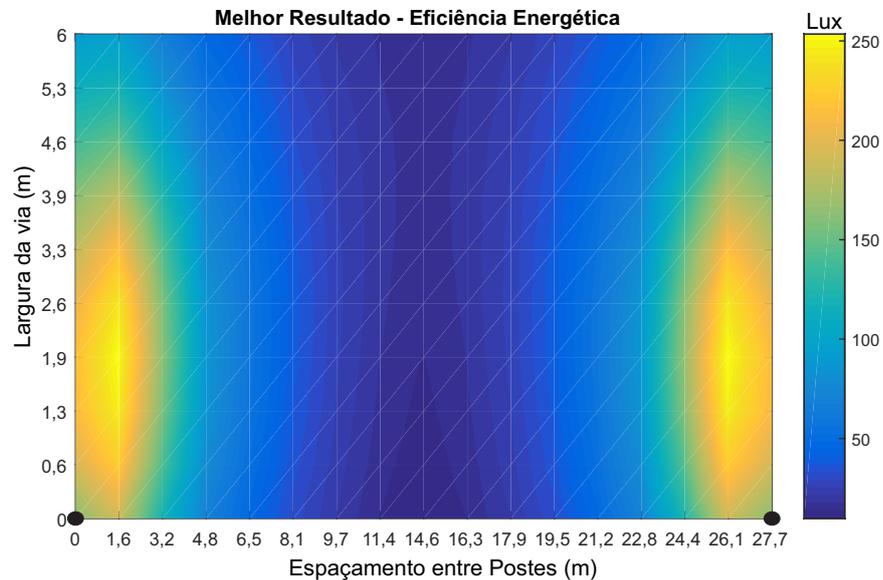
A inclinação foi maior para o domínio contínuo, conseqüentemente, a iluminância mínima foi maior. Isto é comprovado, pois geralmente o ponto de menor iluminância está localizado no lado oposto da via, então ao inclinar a luminária, esse ponto terá um maior nível de iluminância.

Tabela 17 – Resultados para Luminária Philips SGS102 150W

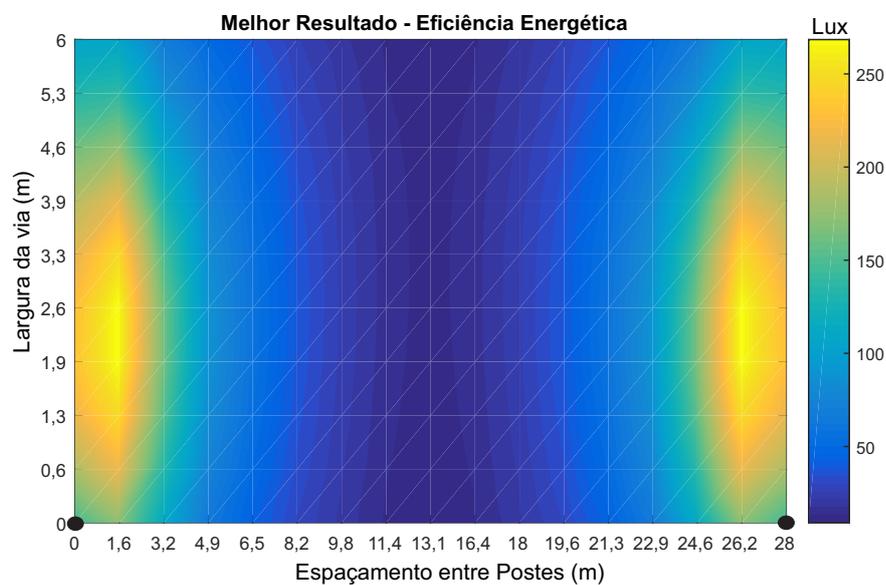
	Contínuo			Discreto		
	Melhor	Média	D.P.	Melhor	Média	D.P.
Np-(Unid.)	18,00	28,75	14,47	18,00	25,45	11,06
x0-(m)	13,89	10,05	3,70	12,00	9,10	3,56
h-(m)	5,00	5,00	0,00	5,00	5,00	0,00
delta-(°)	5,91	14,82	8,64	0,00	4,65	8,62
s-(m)	27,78	20,61	7,13	28,00	22,50	6,73
recuo-(m)	1,26	0,80	0,55	2,00	1,55	0,83
Emin-(lux)	9,77	47,05	49,33	9,08	35,68	38,68
Emed-(lux)	81,18	121,22	56,04	83,42	112,82	44,57
Emax-(lux)	253,40	253,09	31,90	268,43	271,77	21,44
Uo	0,12	0,31	0,19	0,11	0,25	0,17
ϵ_2 ($\frac{m^2 * lux}{W}$)	90,20	85,72	4,19	92,69	89,63	2,98
Iterações	186,00	280,90	68,21	108,00	111,10	16,93
Tempo (s)	92,37	133,00	29,18	89,90	92,46	13,99
Núm. de exp.	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Total de iter.	5618,00	5618,00	5618,00	2222,00	2222,00	2222,00

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Fig. 22, visualiza-se os diagramas de intensidades luminosas, para os melhores resultados das maximizações para o domínio contínuo e discreto. Nota-se na Fig. 22b que a iluminância máxima e o recuo são maiores do que na Fig. 22a.



(a) Eficiência Energética - Contínuo

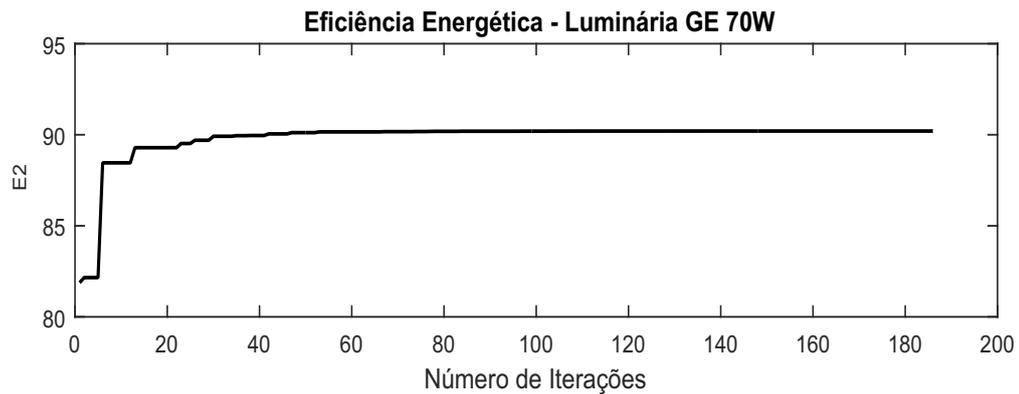


(b) Eficiência Energética - Discreto

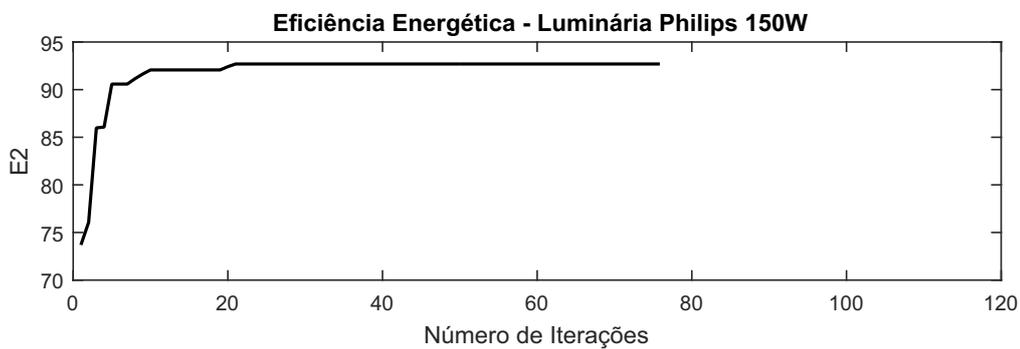
Figura 22 – Melhores resultados para luminária Philips SGS102 150W

Fonte – Elaborado pelo autor

Na Fig. 23, se pode visualizar o gráfico de convergências dos melhores resultados para cada domínio. Nota-se que no gráfico 23b para o domínio discreto a convergência ocorreu mais rápido, aproximadamente na iteração 25 e, no domínio contínuo, essa convergência foi em torno da iteração 50.



(a) Eficiência Energética - Contínuo



(b) Eficiência Energética - Discreto

Figura 23 – Convergência para luminária Philips SGS102 150W

Fonte – Elaborado pelo autor

Os resultados mostraram que no domínio discreto a eficiência energética obteve um melhor resultado nas duas luminárias, porque o domínio discreto tem um menor espaço de busca por considerar apenas números inteiros. Percebeu-se, também, que as luminárias não atingiram os requisitos mínimos de todas as classes de iluminação mostrando a importância de considerar a norma brasileira.

6.3 Considerando a Norma Brasileira

Posteriormente a realização da maximização da eficiência energética sem restrições, o código foi implementado inserindo as restrições. O problema de otimização é apresentado na Eq. (6.2), na qual se visualizam as limitações nas variáveis de controle e as restrições para classe V_1 , com finalidade de ilustração, pois serão realizados testes com todas as

classes.

$$\begin{array}{l}
 \underset{h,s,\theta,recuo}{Max.} \quad \varepsilon_2(h, s, \theta, recuo) \\
 \left. \begin{array}{l}
 5 \leq h \leq 15; \\
 5 \leq s \leq 30; \\
 0 \leq \theta \leq 60; \\
 0 \leq recuo \leq 3; \\
 Eméd \geq 30; \\
 Emín \geq 1; \\
 U0 \geq 0, 4.
 \end{array} \right\} \quad s.a \quad (6.2)
 \end{array}$$

6.3.0.1 Luminária GE 70W

Na Tabela 18, encontra-se o melhor resultado entre os 20 experimentos para cada classe de iluminação e para os dois domínios. Nota-se que as classes de V_1 a V_5 respeitaram os requisitos mínimos exigidos, conforme a Tabela 2 da norma, exceto na coluna sem restrição (SR), na qual o valor de uniformidade não atingiu o mínimo que é 0,2.

As classes obtiveram eficiências energéticas próximas, porém as maiores foram em V_3 e V_4 . A altura de montagem manteve-se fixa no limite inferior da variável para todas as classes.

O número de postes foi superior na classe V_1 , pois ela tem uma maior exigência no nível de uniformidade, ou seja, necessita de um número elevado de postes para aumentar os níveis de iluminância.

Na Tabela 18, na parte discreto, visualiza-se a execução que obteve melhor resultado para cada classe de iluminação. Confirmou-se que todas as classes respeitaram os requisitos mínimos exigidos pela norma.

Verifica-se que a maior eficiência energética foi obtida nas classes V_3 e V_4 , o resultado de $54,44 \left(\frac{m^2 * lux}{W}\right)$ parece ser o ponto ótimo do problema, pois na classe V_4 foram praticamente 1000 iterações mais do que em V_3 e o resultado permaneceu idêntico.

A altura de montagem, assim como nas luminárias anteriores, continuou no limite inferior da variável de controle. O maior número de postes foi na classe V_1 , porque ela necessita de um maior nível de iluminância para manter-se dentro dos requisitos desejados por norma.

Tabela 18 – Melhores Resultados para cada Classe utilizando Luminária GE 70 W

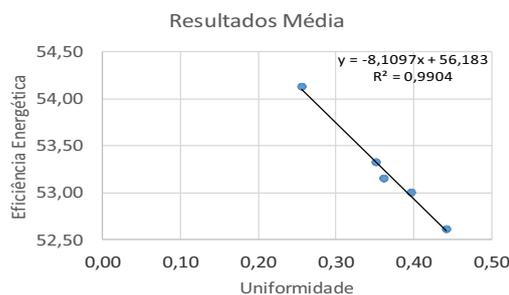
	Contínuo						Discreto					
	V1	V2	V3	V4	V5	SR	V1	V2	V3	V4	V5	SR
Np-(Unid.)	42,00	21,00	21,00	19,00	25,00	18,00	28,00	21,00	24,00	24,00	18,00	18,00
x0-(m)	5,52	11,90	11,68	13,01	9,97	13,89	7,00	10,00	8,50	8,50	12,00	12,00
h-(m)	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
delta-(°)	0,36	11,69	1,06	3,33	5,11	7,25	15,00	13,00	0,00	0,00	12,00	0,00
s-(m)	11,93	23,81	23,83	26,33	20,00	27,78	18,00	24,00	21,00	21,00	28,00	28,00
recuo-(m)	1,81	0,20	1,70	1,28	0,92	0,93	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	2,00
Emin-(lux)	21,05	8,00	5,89	5,01	10,66	4,14	13,89	8,19	6,62	6,62	4,72	3,47
Emed-(lux)	52,07	26,41	26,98	24,40	31,14	23,02	34,48	26,21	30,49	30,49	22,71	23,40
Emax-(lux)	81,85	56,51	60,37	58,62	58,34	56,16	57,18	56,55	61,58	61,58	56,63	61,17
Uo	0,40	0,30	0,22	0,21	0,34	0,18	0,40	0,31	0,22	0,22	0,21	0,15
$\epsilon_2 \left(\frac{m^2 * lux}{W}\right)$	53,13	53,89	55,07	55,05	53,38	54,81	52,78	53,48	54,44	54,44	54,07	55,72
Iterações	340,00	199,00	195,00	324,00	401,00	462,00	71,00	95,00	68,00	126,00	97,00	84,00
Núm. de Exp	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Tempo (s)	4257,83	834,81	462,47	476,78	958,67	218,33	753,78	447,26	311,09	239,18	271,33	67,87
Total de iter.	5846,00	3535,00	5711,00	4577,00	7068,00	8294,00	1963,00	2412,00	1555,00	2520,00	2048,00	2216,00

Na Tabela 19, visualiza-se as médias dos 20 experimentos para cada classe de iluminação e para o caso que não foi utilizado restrição (SR), todos para o domínio contínuo. Verifica-se que a melhor eficiência energética foi em V_3 . Isso se deve ao fato de que nessa classe o número de postes foi o menor entre todas e conforme a Eq.(6.1) os dois parâmetros são inversamente proporcionais.

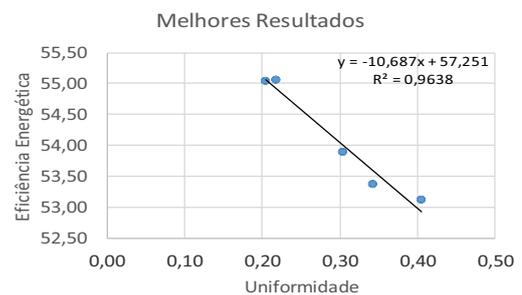
Na Tabela 20 nota-se as médias e desvios padrões dos 20 experimentos para o domínio discreto, verifica-se que o maior valor obtido de eficiência energética foi na classe sem restrição (SR), isso ocorre por não haver limitação no valor de uniformidade. Nas classes de V_1 a V_5 os requisitos de uniformidade e iluminância média foram alcançados.

Na Fig. 24, visualiza-se os quatro gráficos de dispersão para a luminária GE 70W nos dois domínios, notando uma boa correspondência entre a uniformidade e a eficiência energética, demonstrada pelos altos valores encontrados para os coeficientes de determinação (R^2).

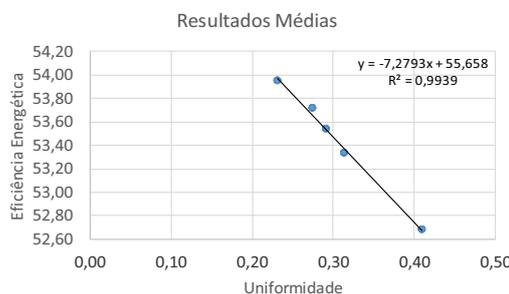
Os gráficos de convergência para o domínio contínuo e discreto para a luminária da GE 70W podem ser encontrados nos apêndices da presente dissertação.



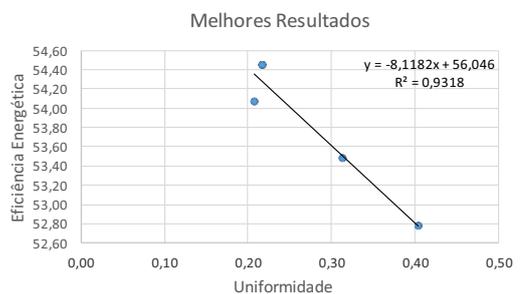
(a) Médias dos resultados - Domínio Contínuo



(b) Melhores resultados - Domínio Contínuo



(c) Médias dos resultados - Domínio Discreto



(d) Melhores resultados - Domínio Discreto

Figura 24 – Gráficos de Dispersão da Luminária GE Euro 2 70W

Fonte – Elaborado pelo autor

Tabela 19 – Médias e Desvios Padrões para cada Classe utilizando Luminária GE 70 W- Domínio Contínuo

	V1		V2		V3		V4		V5		SR	
	Média	D.P.										
Np-(Unid.)	41,85	6,52	32,30	8,54	23,55	6,87	33,30	11,42	38,80	12,11	33,20	11,54
x0-(m)	5,77	1,10	7,81	2,06	10,61	2,01	8,32	2,91	7,13	2,84	8,05	2,77
h-(m)	5,01	0,01	5,00	0,01	5,01	0,02	5,00	0,00	5,00	0,00	5,30	1,33
delta-(°)	6,17	5,08	5,00	4,11	4,99	4,28	5,46	3,27	5,64	4,20	10,53	9,15
s-(m)	12,27	2,14	16,56	4,26	22,50	4,54	16,82	5,70	14,44	5,51	16,93	5,79
recuo-(m)	1,05	0,69	1,16	0,62	1,18	0,58	1,17	0,44	1,15	0,58	0,85	0,73
Emin-(lux)	22,83	4,36	14,87	5,86	8,06	4,81	15,72	9,05	20,15	9,66	15,54	9,43
Emed-(lux)	51,39	8,05	40,02	10,40	29,68	8,31	41,22	13,52	47,80	14,47	39,56	14,75
Emax-(lux)	77,86	12,67	66,75	11,04	60,17	6,98	68,69	12,99	76,10	17,19	63,83	18,32
Uo	0,44	0,03	0,36	0,05	0,26	0,06	0,35	0,10	0,40	0,10	0,37	0,11
$\epsilon_2 \left(\frac{m^2 \cdot lux}{W}\right)$	52,62	0,24	53,16	0,40	54,14	0,59	53,33	0,95	53,01	0,85	50,74	5,94
Iterações	292,30	98,75	176,75	39,54	285,55	58,37	228,85	73,16	353,40	49,06	414,70	102,37
Tempo (s)	3573,47	1406,13	751,70	147,69	694,12	142,38	349,71	98,45	683,07	286,78	195,68	48,89
Núm. de exp.	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Total de iter.	5846,00	5846,00	3535,00	3535,00	5711,00	5711,00	4577,00	4577,00	7068,00	7068,00	8294,00	8294,00

Tabela 20 – Médias e Desvios Padrões para cada Classe utilizando Luminária GE 70 W - Domínio Discreto

	V1		V2		V3		V4		V5		SR	
	Média	D.P										
Np-(Unid.)	36,60	8,90	24,45	5,18	21,00	4,01	26,95	10,41	25,70	7,69	25,05	12,07
x0-(m)	4,90	2,20	8,65	1,73	10,30	1,71	8,43	3,08	8,53	2,60	9,55	3,41
h-(m)	5,00	0,00	5,00	0,00	5,00	0,00	5,00	0,00	5,00	0,00	5,00	0,00
delta-(°)	8,20	7,27	7,85	5,07	7,70	4,05	5,50	5,55	8,80	5,58	6,75	6,37
s-(m)	14,60	3,50	21,30	3,45	24,60	3,42	20,85	6,16	21,05	5,21	23,10	6,81
recuo-(m)	0,90	0,97	0,70	0,73	0,80	0,70	1,15	0,88	0,75	0,79	1,05	0,89
Emin-(lux)	18,49	4,73	9,57	2,26	6,23	2,15	10,16	7,48	10,00	6,04	9,25	9,95
Emed-(lux)	44,97	10,88	30,42	6,37	26,42	4,93	33,67	12,57	32,01	9,19	31,28	14,17
Emax-(lux)	71,18	14,71	59,05	4,59	57,69	3,20	63,69	12,08	59,91	6,31	62,94	12,84
Uo	0,41	0,01	0,31	0,01	0,23	0,03	0,27	0,08	0,29	0,09	0,19	0,12
ϵ_2 ($\frac{m^2*lux}{W}$)	52,68	0,18	53,34	0,14	53,95	0,26	53,72	0,61	53,54	0,65	54,97	1,17
Iterações	98,15	14,78	120,60	13,13	77,75	9,36	126,00	0,00	102,40	18,34	110,80	27,48
Núm. De exp.	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	22,67
Tempo (s)	896,27	223,11	479,03	16,30	200,10	75,91	239,18	0,00	220,29	59,31	89,89	20,00
Total de ite.	1963,00	1963,00	2412,00	2412,00	1555,00	1555,00	2520,00	2520,00	2048,00	2048,00	2216,00	2216,00

6.3.1 Luminária Philips 150W

Após análise dos resultados para a luminária da GE 70W utilizou-se a mesma configuração, porém com a luminária da Philips SGS102 150W.

Na Tabela 21 são vistos os resultados dos melhores experimentos para as classes de iluminação V_1 a V_5 , e ainda para o caso sem restrição, tanto para o domínio contínuo como para o domínio discreto.

Nota-se que todas as classes de V_1 a V_5 obtiveram resultados acima dos mínimos exigidos. Os maiores resultados de eficiência energética foram alcançados nas classes V_3 para os dois domínios, também foram estas classes que obtiveram os maiores números de iterações.

Para todas as classes e domínios, a altura de montagem resultou no menor valor possível para essa variável de controle. As maiores quantidades de postes na via foram nas classes V_1 , pois elas necessitam de uma maior quantidade de iluminância média e uniformidade para resultarem em valores condizentes com a norma.

Na Tabela 22 e na Tabela 23, são encontrados os resultados para as médias dos 20 experimentos para cada classe de iluminação. Todas as classes respeitaram os parâmetros mínimos exigidos por norma.

Os melhores resultados de eficiência energética foram atingidos nas classes V_3 , isso se deve ao fato, que o número de postes na via foi menor de todas as classes, de acordo com a Eq.(6.1).

Os menores valores de iluminância mínima foram na classe V_3 . A altura de montagem teve um comportamento semelhante com as simulações da luminária da GE 70W, para todas as classes ela permaneceu no limite inferior da variável de controle.

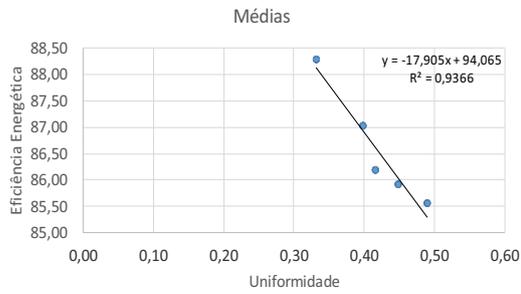
Os espaçamentos entre postes são inversamente proporcionais ao número de postes, assim nas classes em que resultaram os maiores número de postes se obtiveram os menores espaçamentos entre postes e assim por diante.

Os gráficos de convergência para o domínio contínuo e discreto para a luminária Philips 150W podem ser encontrados nos apêndices da presente dissertação.

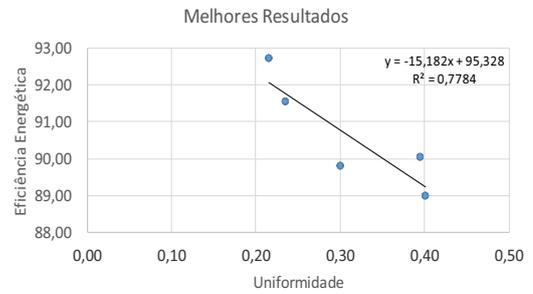
Tabela 21 – Melhores Resultados para cada Classe utilizando Luminária Philips 150W

	Contínuo						Discreto					
	V1	V2	V3	V4	V5	SR	V1	V2	V3	V4	V5	SR
Np-(Unid.)	27,00	22,00	21,00	21,00	29,00	18,00	28,00	23,00	21,00	21,00	21,00	18,00
x0-(m)	9,26	11,36	11,90	11,90	8,33	13,89	7,00	8,00	10,00	10,00	10,00	12,00
h-(m)	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
delta-(graus)	2,87	3,34	0,20	2,71	0,00	5,91	2,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
s-(m)	18,52	22,73	23,81	23,81	17,26	27,78	18,00	22,00	24,00	24,00	24,00	28,00
recuo-(m)	1,86	1,53	2,69	2,09	2,62	1,26	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Emin-(lux)	48,23	29,70	20,94	22,58	51,52	9,77	51,08	31,89	22,28	22,28	22,28	9,08
Emed-(lux)	120,14	98,79	97,37	96,14	130,59	81,18	124,05	103,84	96,36	96,36	96,36	83,42
Emax-(lux)	266,60	266,16	274,90	264,60	277,45	253,40	269,32	272,55	275,67	275,67	275,67	268,43
Uo	0,40	0,30	0,22	0,23	0,39	0,12	0,41	0,31	0,23	0,23	0,23	0,11
Ef. Energ.	88,99	89,81	92,73	91,56	90,06	90,20	88,61	90,30	91,77	91,77	91,77	82,69
Iterações	325,00	443,00	418,00	271,00	349,00	186,00	68,00	74,00	113,00	87,00	112,00	108,00
Núm. de exp.	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	92,37	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Tempo (s)	482,97	678,63	612,55	373,56	659,54	20,00	150,31	181,44	188,91	149,18	161,49	89,90
Total de iter.	6350,00	7555,00	8360,00	4725,00	6380,00	5618,00	2393,00	1946,00	2713,00	2531,00	2202,00	2222,00

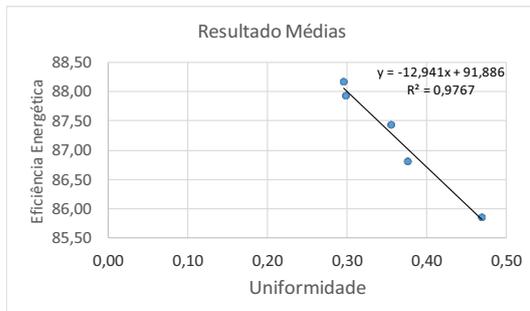
Na Fig. 25 são visualizados os quatro gráficos de dispersão, que mostram correspondência entre a eficiência energética e a uniformidade. O coeficiente de determinação (R^2) na Fig. 25a é maior do que na Fig. 25b, ou seja, tem-se uma maior correspondência entre as variáveis na primeira figura e o mesmo acontece para o domínio discreto.



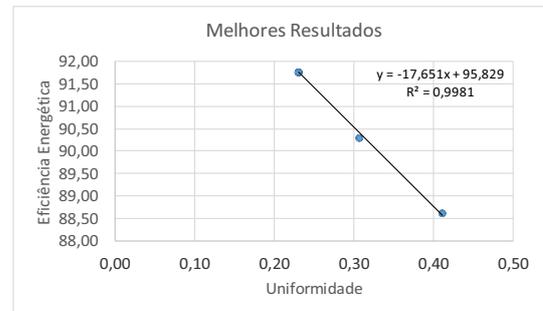
(a) Médias dos resultados - Domínio Contínuo



(b) Melhores resultados - Domínio Contínuo



(c) Médias dos resultados - Domínio Discreto



(d) Melhores resultados - Domínio Discreto

Figura 25 – Gráficos de Dispersão da Luminária Philips SGS102 150 W.

Fonte – Elaborado pelo autor

Tabela 22 – Médias e Desvios Padrões para cada Classe utilizando Luminária Philips 150 W - Domínio Contínuo

	V1		V2		V3		V4		V5		SR	
	Média	D.P.										
Np-(Unid.)	39,10	13,03	35,05	13,24	25,70	7,49	30,20	9,88	30,05	8,02	28,75	14,47
x0-(m)	7,00	2,01	7,95	2,41	10,12	1,99	8,77	2,49	8,73	2,06	10,05	3,70
h-(m)	5,00	0,00	5,00	0,00	5,00	0,01	5,00	0,01	5,00	0,00	5,00	0,00
delta-(°)	8,63	6,34	9,18	6,71	8,24	7,91	8,97	6,97	12,73	8,10	14,82	8,64
s-(m)	14,02	3,98	15,93	4,82	20,53	4,08	18,12	5,16	17,65	4,12	20,61	7,13
recuo-(m)	1,25	0,60	1,14	0,61	1,38	0,91	1,23	0,76	0,86	0,77	0,80	0,55
Emin-(lux)	83,63	34,97	71,49	41,26	40,60	29,08	56,41	34,36	56,45	26,90	47,05	49,33
Emed-(lux)	166,51	52,76	149,70	54,13	112,87	29,44	130,21	38,46	129,00	32,14	121,22	56,04
Emax-(lux)	281,07	42,55	274,75	36,77	260,13	16,22	264,89	16,05	256,87	18,61	253,09	31,90
Uo	0,49	0,06	0,45	0,10	0,33	0,12	0,40	0,14	0,42	0,10	0,31	0,19
$\epsilon_2 \left(\frac{m^2 \cdot lux}{W}\right)$	85,56	1,98	85,92	2,14	88,29	2,57	87,04	3,03	86,19	2,19	85,72	4,19
Iterações	317,50	100,84	377,75	59,59	418,00	0,00	236,25	40,60	319,00	61,56	280,90	68,21
Núm. de exp.	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Tempo (s)	465,02	149,81	588,49	92,10	612,55	0,00	361,90	46,62	614,62	92,16	133,00	29,18
Total de iter.	6350,00	6350,00	7555,00	7555,00	8360,00	8360,00	4725,00	4725,00	6380,00	6380,00	5618,00	5618,00

Tabela 23 – Médias e Desvios Padrões para cada Classe utilizando Luminária Philips 150 W - Domínio Discreto

	V1		V2		V3		V4		V5		SR	
	Média	D.P										
Np-(Unid.)	35,10	7,03	28,00	7,17	24,40	6,15	28,25	9,83	24,70	6,85	25,45	11,06
x0-(m)	5,43	1,33	6,98	1,64	8,78	2,07	7,78	2,68	8,73	2,17	9,10	3,56
h-(m)	5,00	0,00	5,00	0,00	5,00	0,00	5,00	0,00	5,00	0,00	5,00	0,00
delta-(°)	7,10	7,35	8,25	7,57	8,70	7,97	9,15	8,94	8,45	8,47	4,65	8,62
s-(m)	14,85	2,66	19,05	4,20	21,65	4,15	19,55	5,36	21,55	4,36	22,50	6,73
recuo-(m)	1,30	0,73	1,15	0,75	1,10	0,79	1,10	0,85	1,15	0,81	1,55	0,83
Emin-(lux)	71,54	19,67	48,01	22,80	34,30	21,67	48,18	34,20	34,83	23,39	35,68	38,68
Emed-(lux)	150,43	28,59	121,24	29,81	106,96	25,39	122,33	38,29	108,38	27,69	112,82	44,57
Emax-(lux)	272,53	21,04	263,28	16,76	259,59	14,98	265,38	17,90	261,27	16,24	271,77	21,44
Uo	0,47	0,04	0,38	0,09	0,30	0,10	0,35	0,14	0,30	0,11	0,25	0,17
ϵ_2 ($\frac{m^2*lux}{W}$)	85,86	1,95	86,81	2,05	87,93	2,34	87,44	3,26	88,16	2,65	89,63	2,98
Iterações	119,65	53,86	97,30	11,70	135,65	38,40	126,55	20,22	110,10	8,50	111,10	16,93
Núm. De exp.	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Tempo (s)	180,08	75,00	219,36	19,48	213,60	61,18	202,93	31,41	159,31	9,75	92,46	13,99
Total de ite.	2393,00	2393,00	1946,00	1946,00	2713,00	2713,00	2531,00	2531,00	2202,00	2202,00	2222,00	2222,00

Considerações Finais

A presente dissertação apresentou um script para definição da melhor configuração dos componentes da iluminação pública, a fim de obter maior eficiência energética possível. Isso foi realizado através da utilização do método de Otimização por Enxame de Partículas (PSO) para maximizar o problema de otimização e, ainda, foram considerados os requisitos mínimos exigidos pela norma ABNT NBR 5101/2012.

Após a implementação, em ambiente MatLab[®] de uma ferramenta para calcular os parâmetros luminotécnicos (Iluminância média, iluminância mínima, uniformidade, entre outros), foi realizada a sua validação. A fim de comparar os resultados obtidos pela ferramenta empregou-se a utilização do software Dialux[®]. Foram simulados na ferramenta e no software casos utilizando a mesma configuração de via e duas luminárias de fabricante diferentes, por fim, os erros médios entre elas permaneceram menores que 10%, valores que são aceitáveis segundo a literatura, assim tornando a ferramenta confiável e validada.

Posteriormente a validação, foi implementado o PSO utilizando a ferramenta de cálculos luminotécnicos como função custo. Antes da geração dos resultados efetuou-se a calibração de alguns parâmetros de entrada do método. Após inúmeras simulações, os valores escolhidos foram fator de inércia unitário, 20 partículas e 50 gerações. Ainda, foi inserido critério de parada que usualmente é utilizado como o número máximo de iterações, assim o método mostrou uma melhor convergência. Por fim, inseriram-se as restrições nos parâmetros de iluminância média e uniformidade no problema de otimização.

Na primeira parte dos resultados, na qual não foi considerada a norma brasileira, verificou-se que a eficiência energética foi maior para a luminária da Philips de 150 W. Também ficou evidente que o número de iterações foi menor no domínio discreto do que no contínuo, isto se deve ao fato de que ao utilizar somente números inteiros diminui-se o espaço de busca das variáveis de controle.

Na segunda parte dos resultados, na qual foi considerada a norma brasileira, observaram-se que todas as classes respeitaram os valores mínimos exigidos. Ainda, encontrou-se uma relação inversa entre as variáveis de eficiência energética e uniformidade provadas pelos coeficientes de determinação encontrados nos gráficos de dispersão tanto para os melhores resultados como para as médias.

Além de todas as vantagens supracitadas, a configuração que maximize a eficiência energética e respeite a norma brasileira é obtida entre milhares de configurações simuladas, ou seja, o tempo de execução do projeto e a normatização da configuração são os principais ganhos do trabalho, pois um projetista iria demorar um tempo imensurável para projetar, manualmente, no Dialux os milhares de casos possíveis verificados pelo script.

Então, ao maximizar a eficiência energética obtém-se uma via com qualidade de iluminação adequada aos padrões e alcança-se uma economia em energia elétrica.

Como propostas para trabalhos futuros, pode-se citar a avaliação de outros métodos de otimização, a avaliação de normas internacionais, a automatização da entrada dos dados dos arquivos fotométricos, a mensuração da economia de energia e, por fim, a implementação dos custos de projetos de iluminação pública e custos de utilização da configuração escolhida.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5101*: Procedimentos. Rio de Janeiro, 2012. 43 p. Citado na página 37.
- AUTODESK. *Sobre o formato de arquivo padrão IES*. 2016. Access date: 04 Set. 2017. Disponível em: <<https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/autocad/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/PTB/AutoCAD-Core/files/GUID-45CAAF1C-7C9D-49A7-B18D-00CA5E2ED380-htm.html>>. Citado na página 25.
- BOMMEL, W. van. *Road lighting: fundamentals, technology and application*. [S.l.]: Springer, 2014. Citado na página 17.
- CASTILLO-MARTINEZ, A. et al. Particle swarm optimization for outdoor lighting design. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 1, p. 141, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 41.
- CIE. Cie 140-2000 road lighting calculations. *Commission internationale de léclairage, Vienna*, 2000. Citado 4 vezes nas páginas 28, 29, 31 e 34.
- COSTA, G. J. C. da. *Iluminação econômica: cálculo e avaliação*. [S.l.]: EDIPUCRS, 2006. v. 5. Citado 4 vezes nas páginas 15, 19, 23 e 27.
- DIAL GmbH. 2017. Access date: 24 Ago. 2017. Disponível em: <<https://www.dial.de/en/software/dialux/download/>>. Citado na página 41.
- EBERHART, R.; KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. In: IEEE. *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on*. [S.l.], 1995. p. 39–43. Citado na página 46.
- ELVIK, R. et al. *The handbook of road safety measures*. [S.l.]: Emerald Group Publishing, 2009. Citado na página 17.
- ENERGY, D. O. Annual energy outlook and others. *Energy information administration*, v. 92010, n. 9, p. 1–15, 2017. Citado na página 15.
- EPE, E. d. P. E. Anuário estatístico de energia elétrica 2016: Ano base 2015. *Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE*, 2015. Citado na página 15.
- GÓMEZ-LORENTE, D. et al. A new methodology for calculating roadway lighting design based on a multi-objective evolutionary algorithm. *Expert systems with applications*, Elsevier, v. 40, n. 6, p. 2156–2164, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 16, 41 e 44.
- OLIVEIRA, R. A. D.; JÚNIOR, M. F. de M.; MENEZES, R. F. A. Application of genetic algorithm for optimization on projects of public illumination. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 117, p. 84–93, 2014. Citado na página 16.
- REA, M. S. *The iesna lighting handbook: reference & application*. Illuminating Engineering Society of North America, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

SERAPIÃO, A. B. d. S. Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral. *Sba: Controle e Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 20, n. 3, p. 271–304, 2009. Citado na página 46.

SICILIANO, A. d. V. Algoritmos genéticos e particle swarm optimization e suas aplicações problemas de guerra eletrônica. *Anais Do IX Simpósio de Guerra Eletrônica. Diretoria de Sistemas de Armas da Marinha DSAM*, 2007. Citado na página 46.

SOUSA, D. *Iluminação Pública no Brasil: Aspectos energéticos e institucionais*. Dissertação (Mestrado), 2012. Citado na página 22.

ZIELINSKI, K.; LAUR, R. Stopping criteria for a constrained single-objective particle swarm optimization algorithm. *Informatika*, v. 31, n. 1, 2007. Citado na página 50.

Apêndices

APÊNDICE A – Domínio Contínuo

A.1 Luminária GE 70W

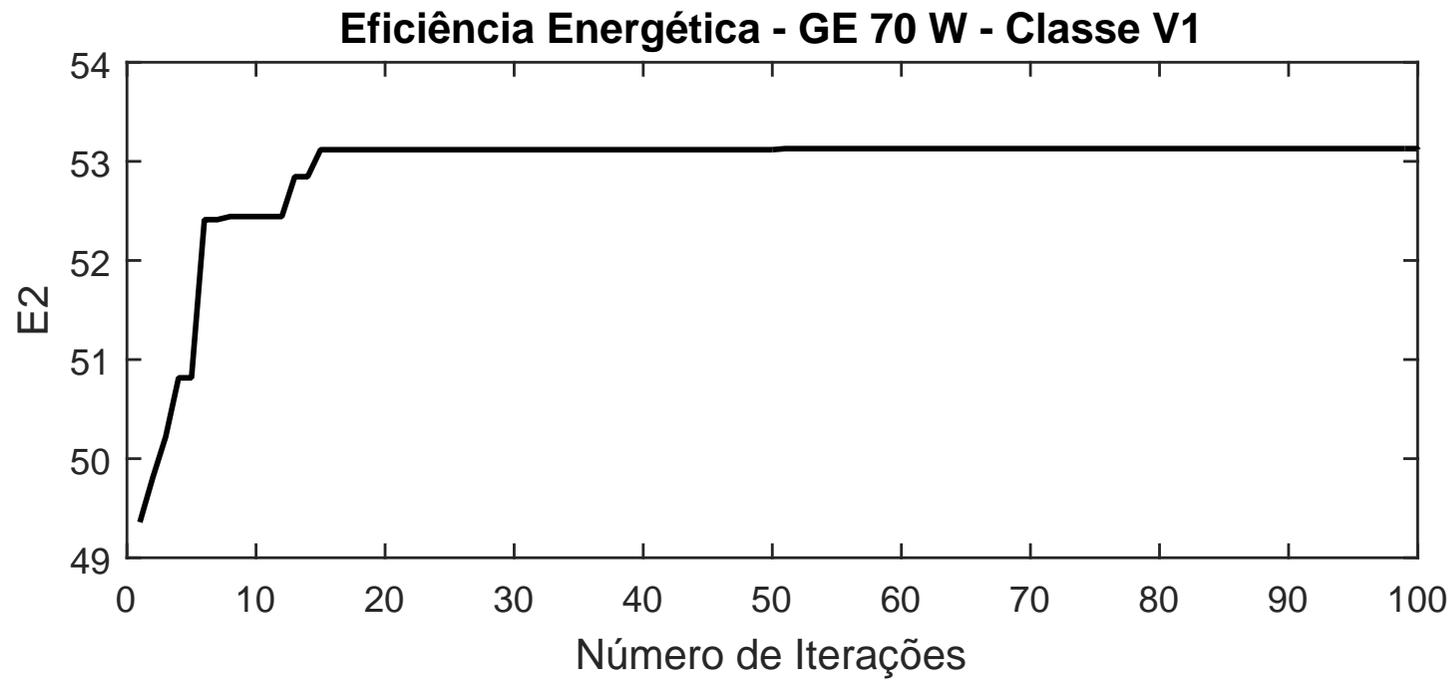


Figura 26 – Curva de Convergência para a Classe V1 - 70W - Domínio Contínuo.

Fonte – Elaborado pelo Autor

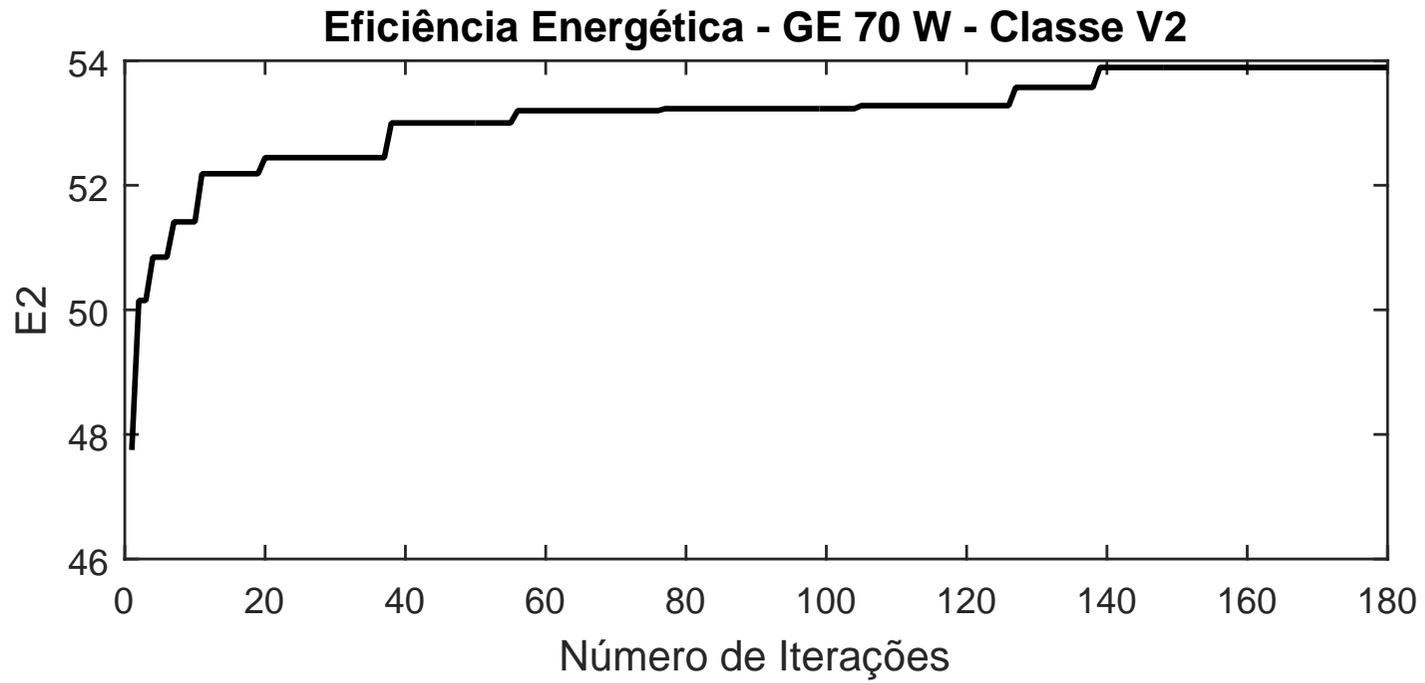


Figura 27 – Curva de Convergência para a Classe V2 - 70W - Domínio Contínuo.

Fonte – Elaborado pelo Autor

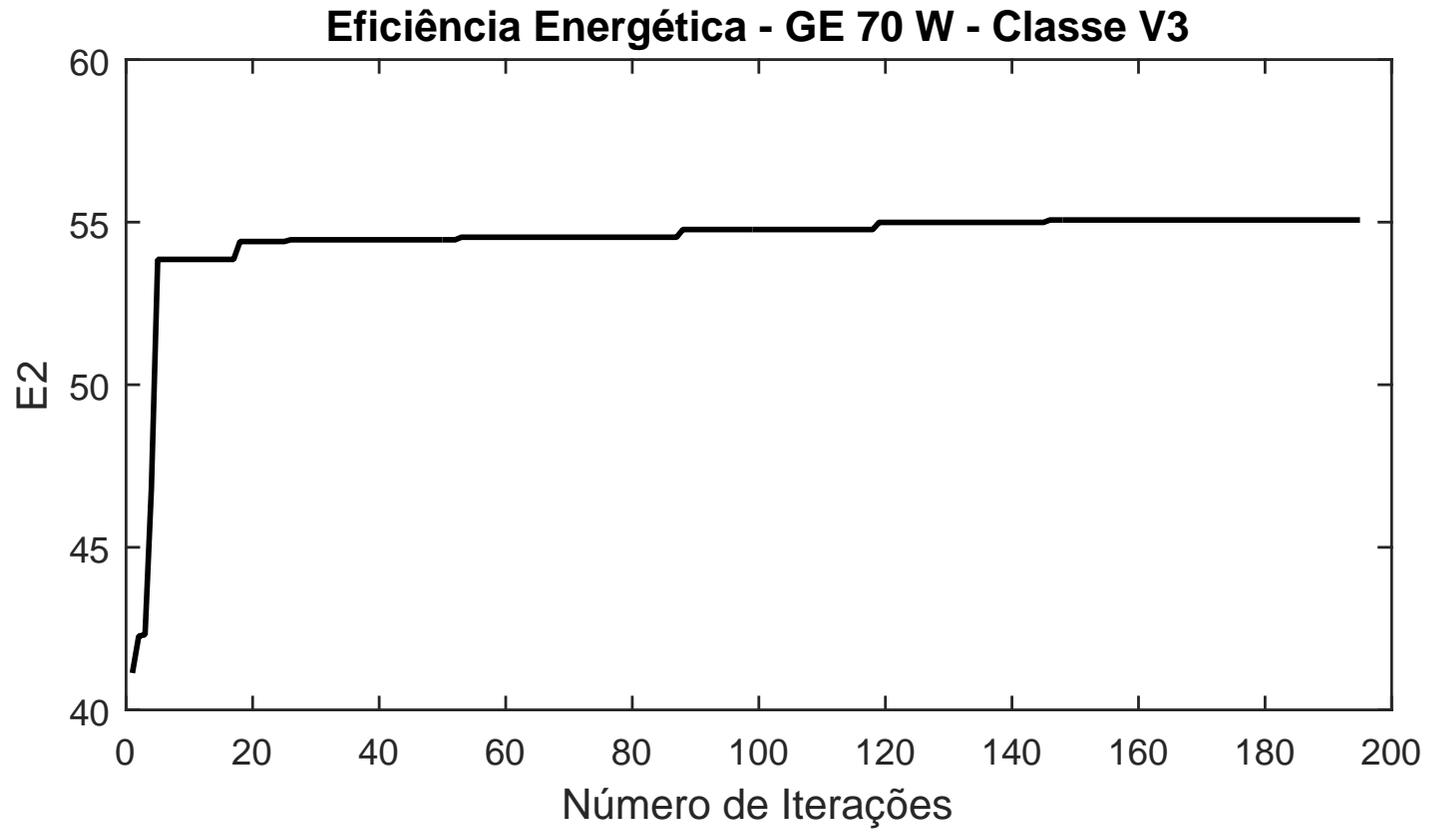


Figura 28 – Curva de Convergência para a Classe V3 - 70W - Domínio Contínuo.

Fonte – Elaborado pelo Autor

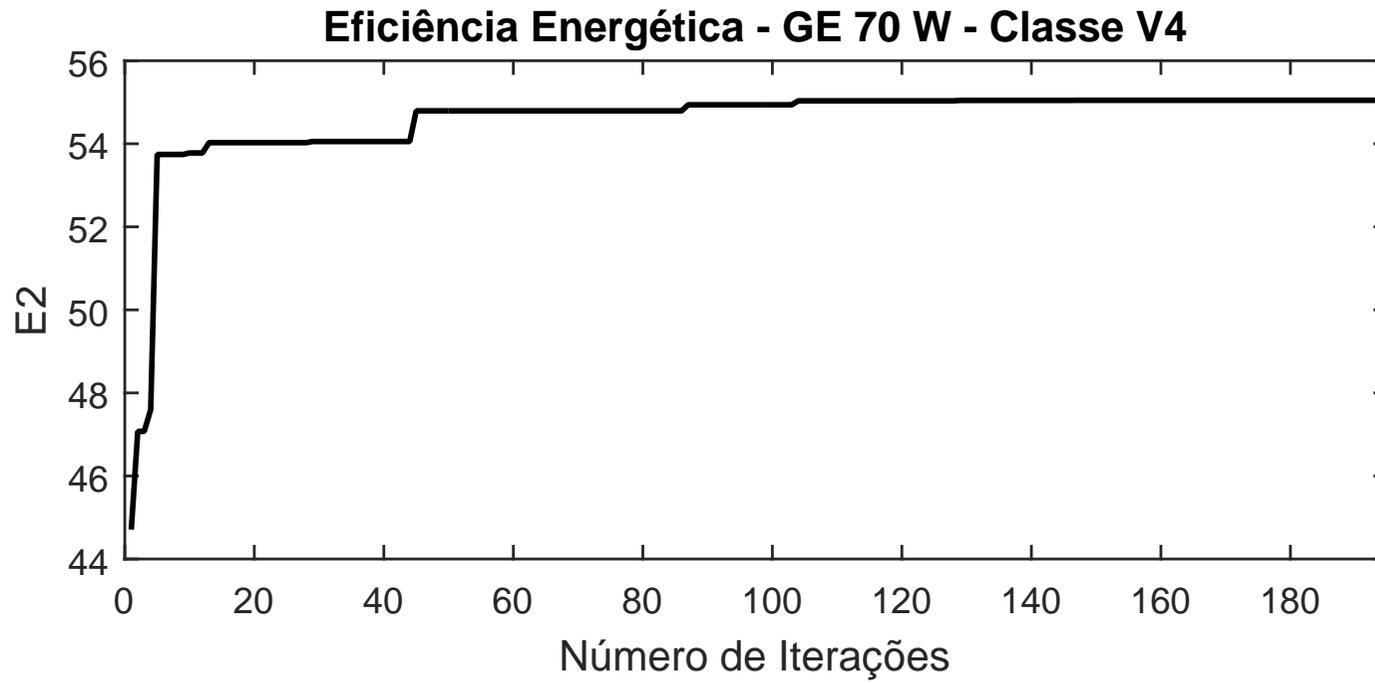


Figura 29 – Curva de Convergência para a Classe V4 - 70W - Domínio Contínuo.

Fonte – Elaborado pelo Autor

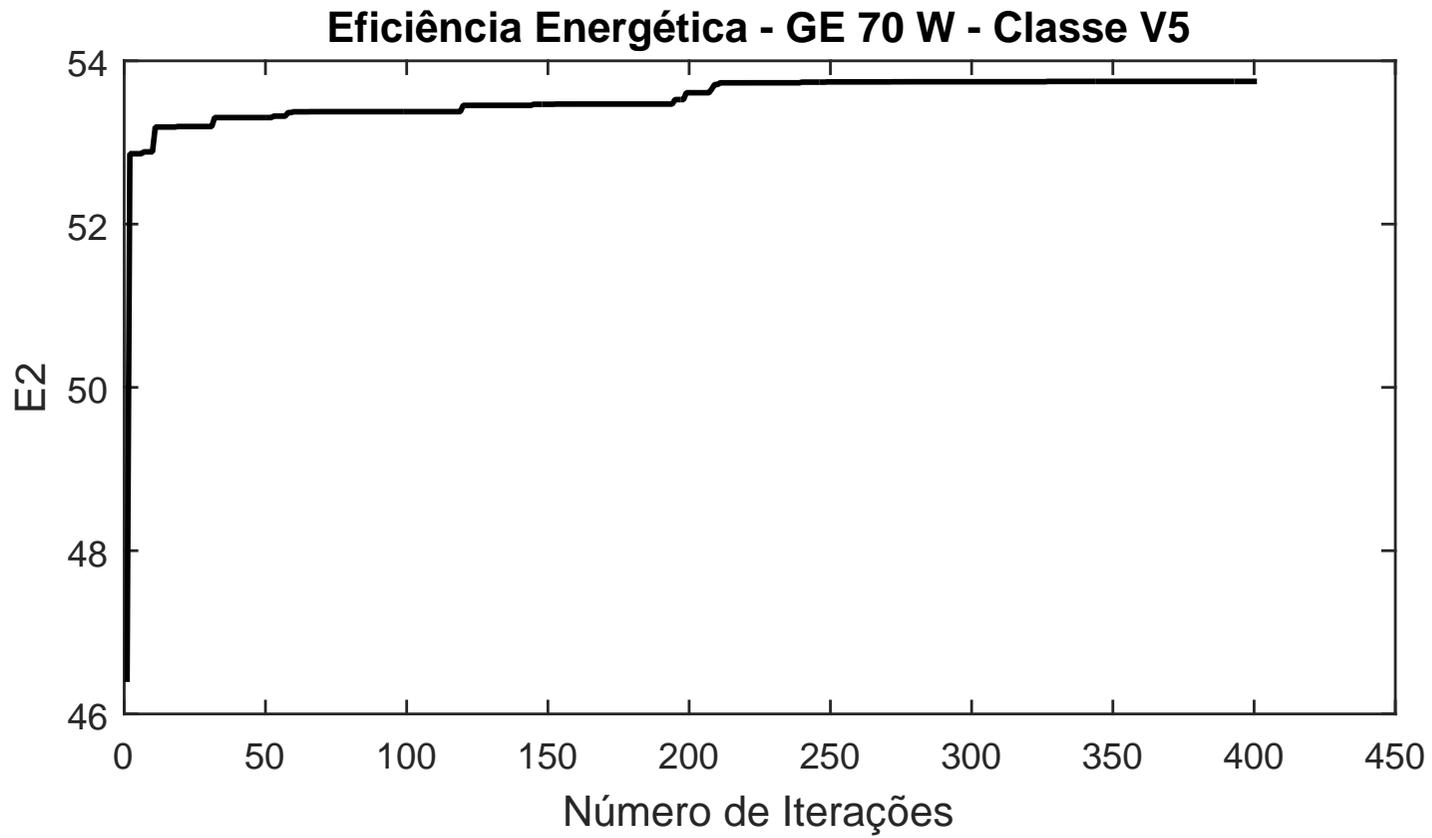


Figura 30 – Curva de Convergência para a Classe V5 - 70W - Domínio Contínuo.

Fonte – Elaborado pelo Autor

A.2 Luminária Philips 150W

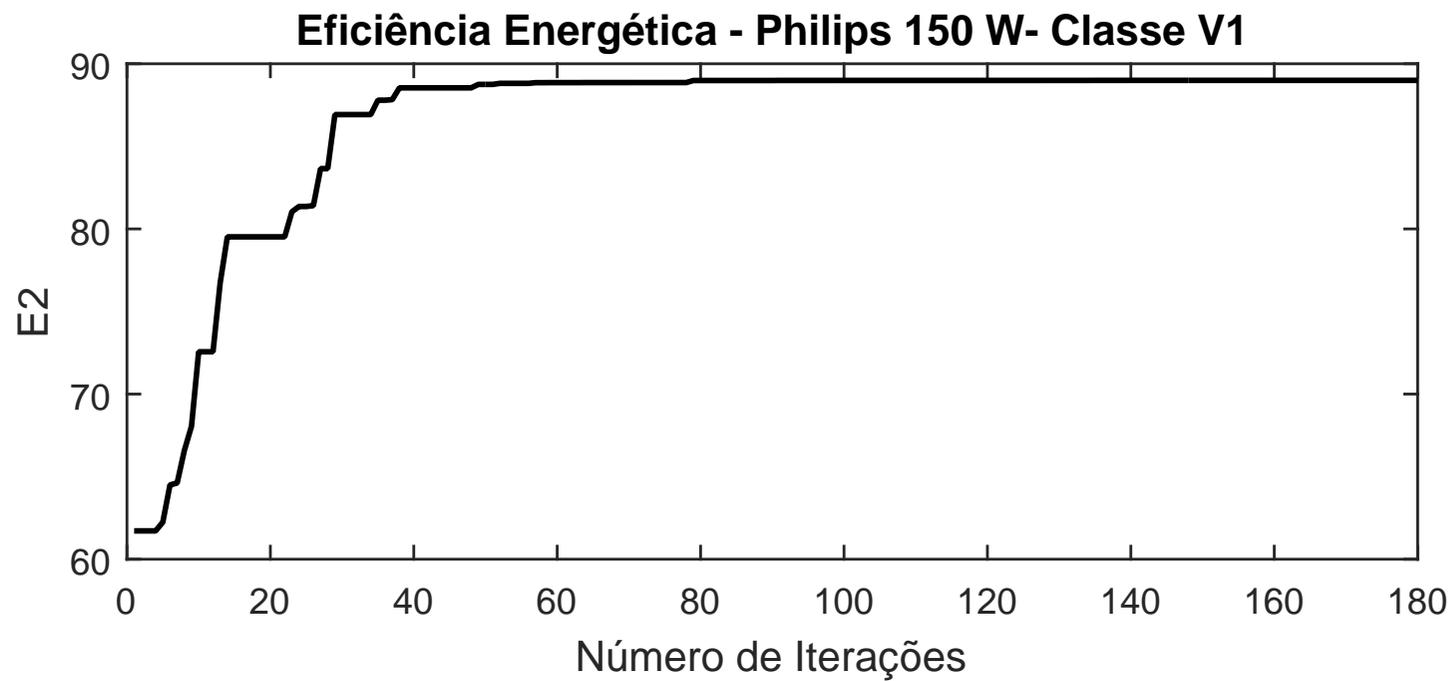


Figura 31 – Curva de Convergência para a Classe V1 - 150W - Domínio Contínuo.

Fonte – Elaborado pelo Autor

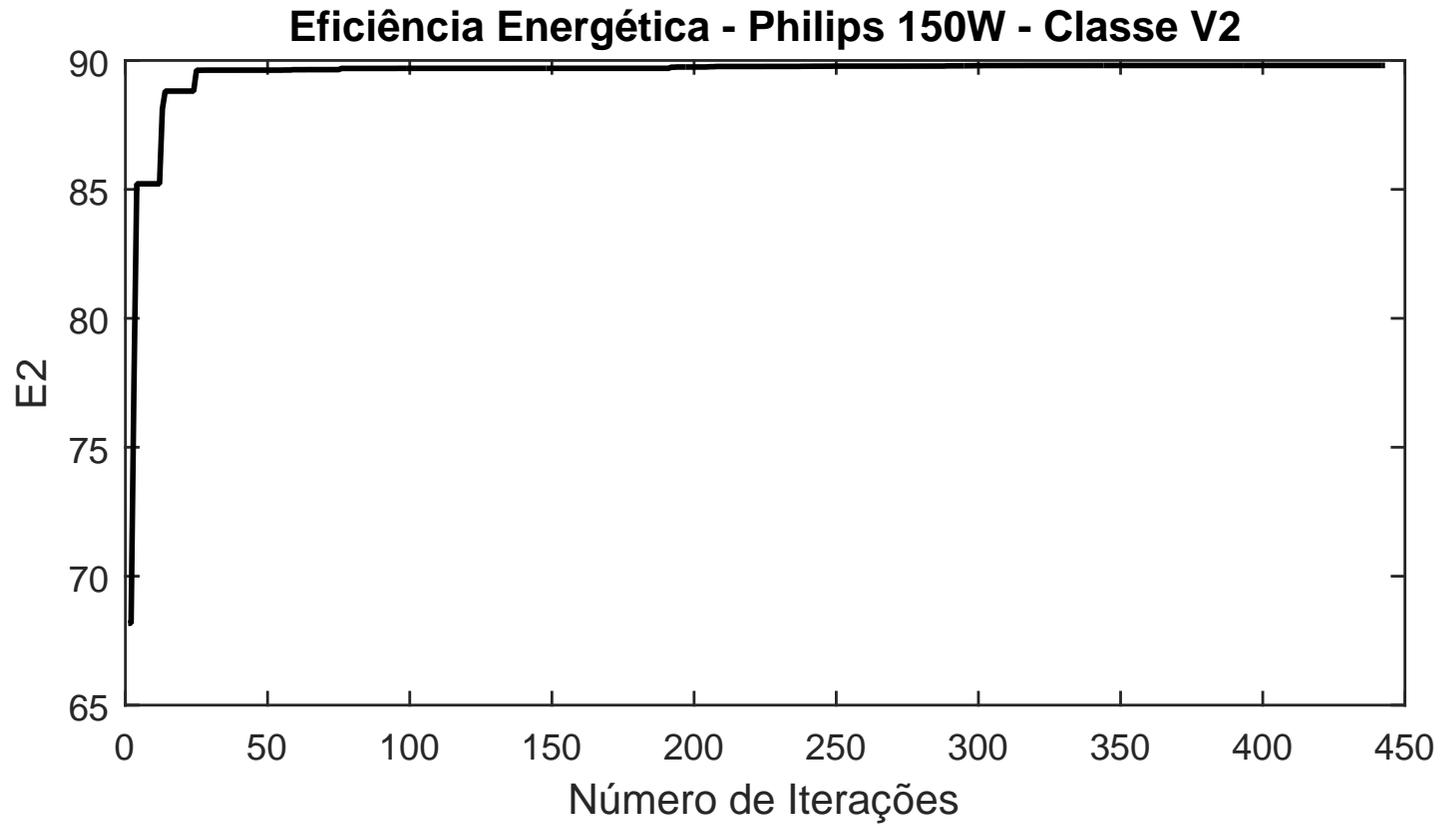


Figura 32 – Curva de Convergência para a Classe V2 - 150W - Domínio Contínuo.

Fonte – Elaborado pelo Autor

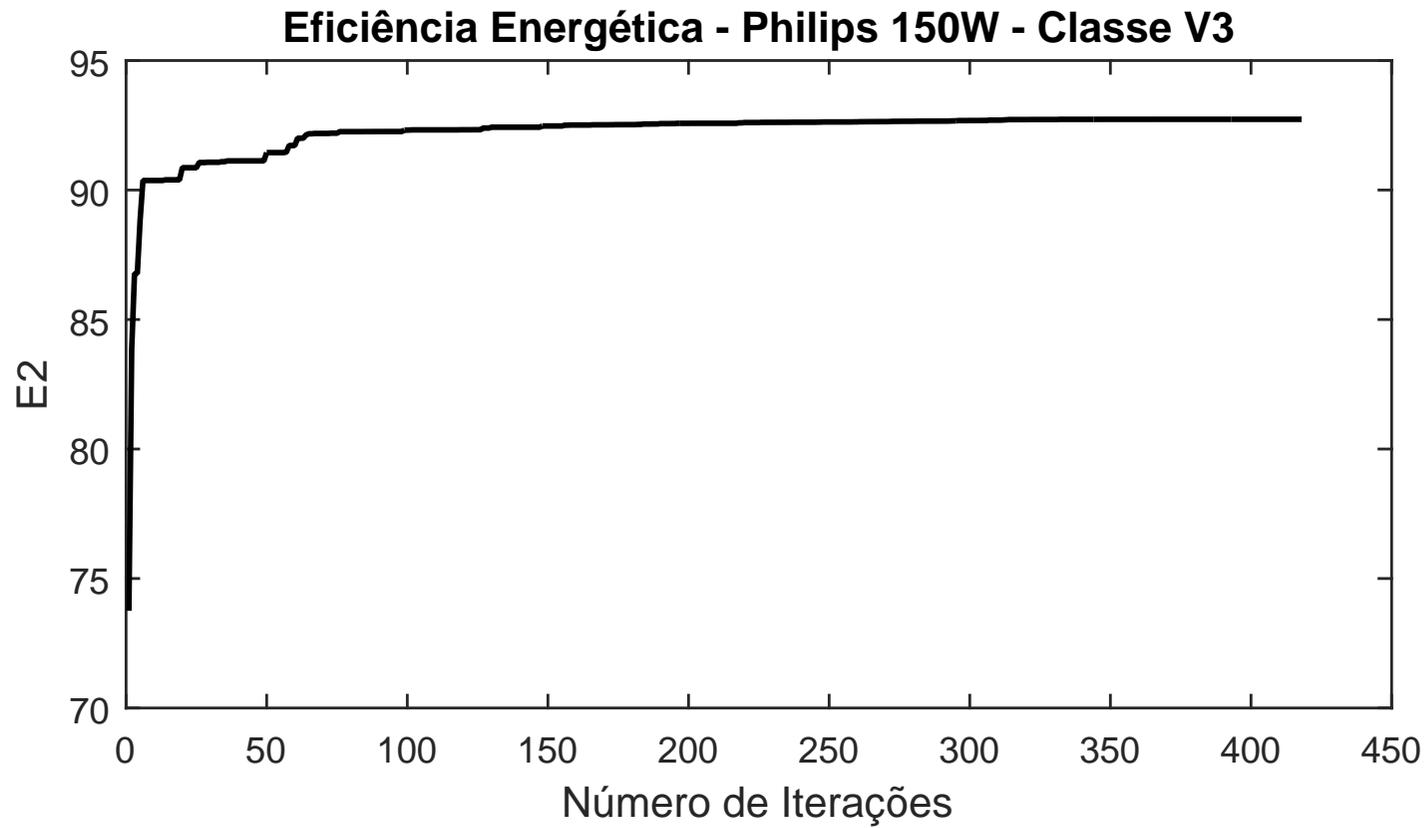


Figura 33 – Curva de Convergência para a Classe V3 - 150W - Domínio Contínuo.

Fonte – Elaborado pelo Autor

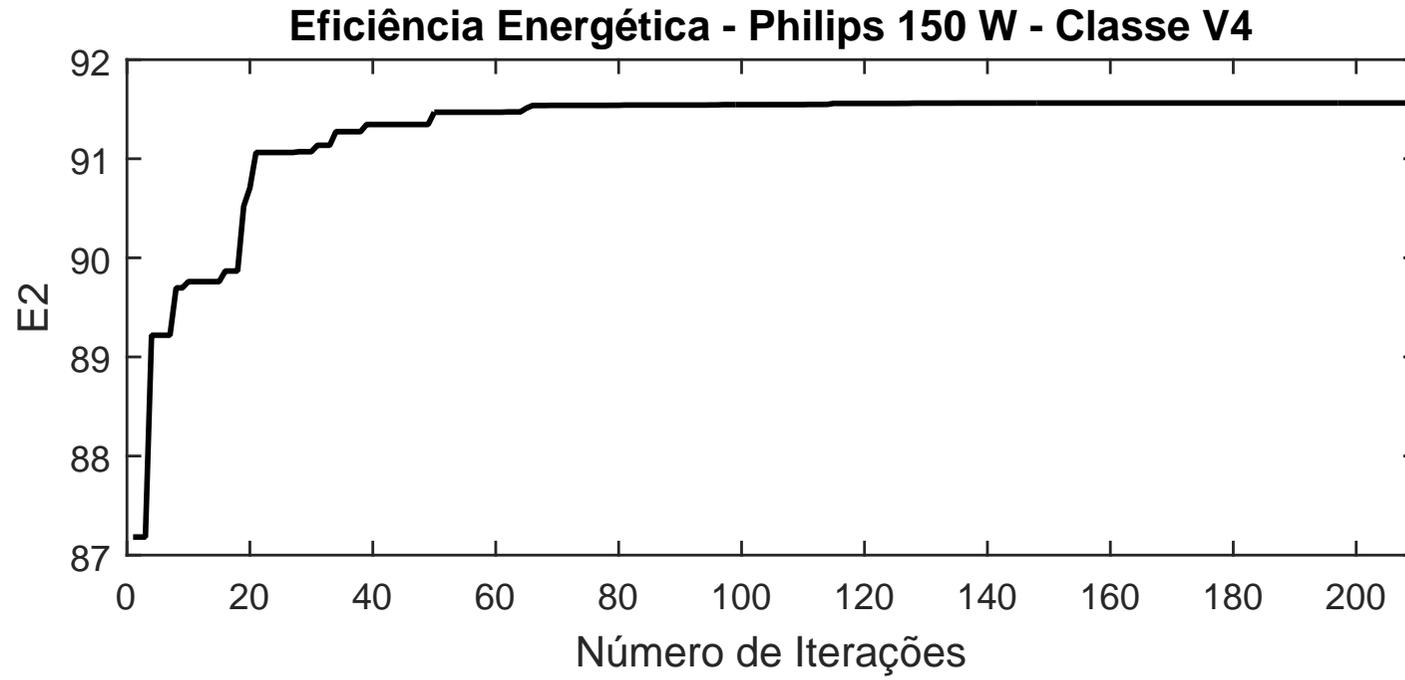


Figura 34 – Curva de Convergência para a Classe V4 - 150W - Domínio Contínuo.

Fonte – Elaborado pelo Autor

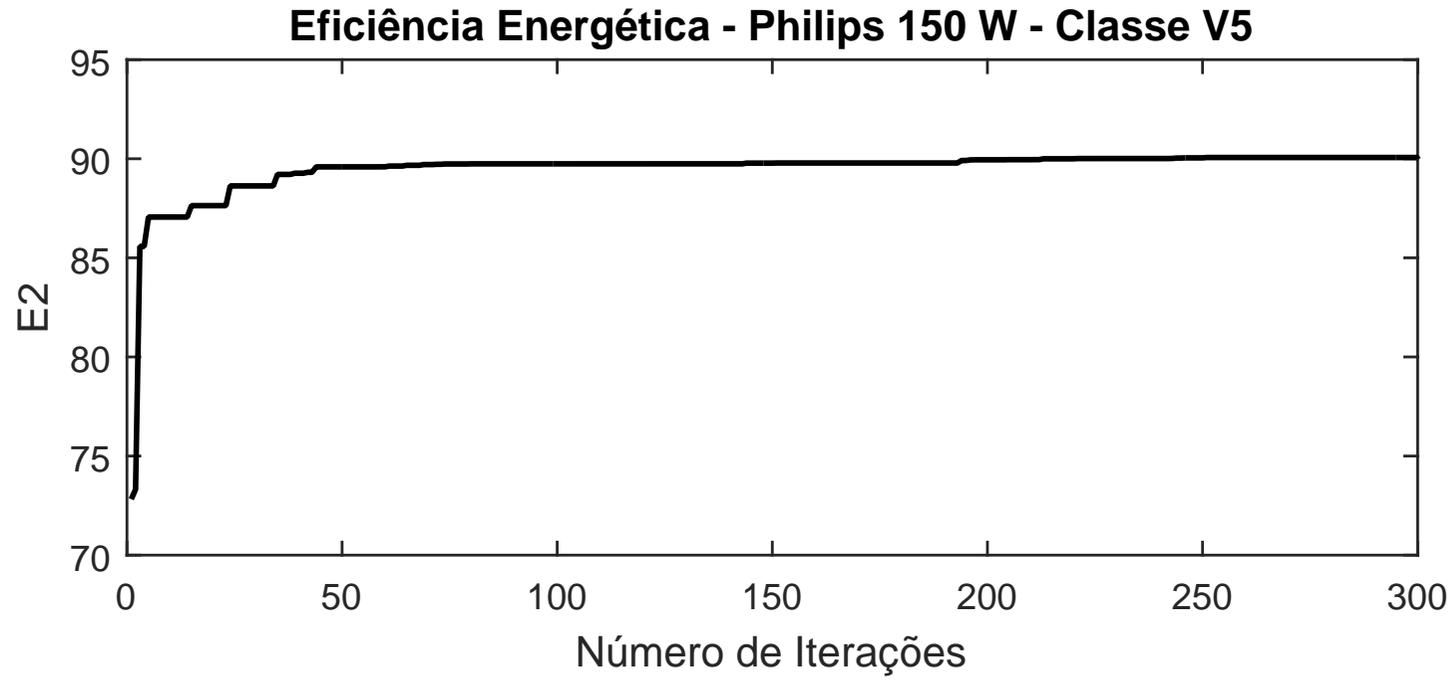


Figura 35 – Curva de Convergência para a Classe V5 - 150W - Domínio Contínuo.

Fonte – Elaborado pelo Autor

APÊNDICE B – Domínio Discreto

B.1 Luminária GE 70W

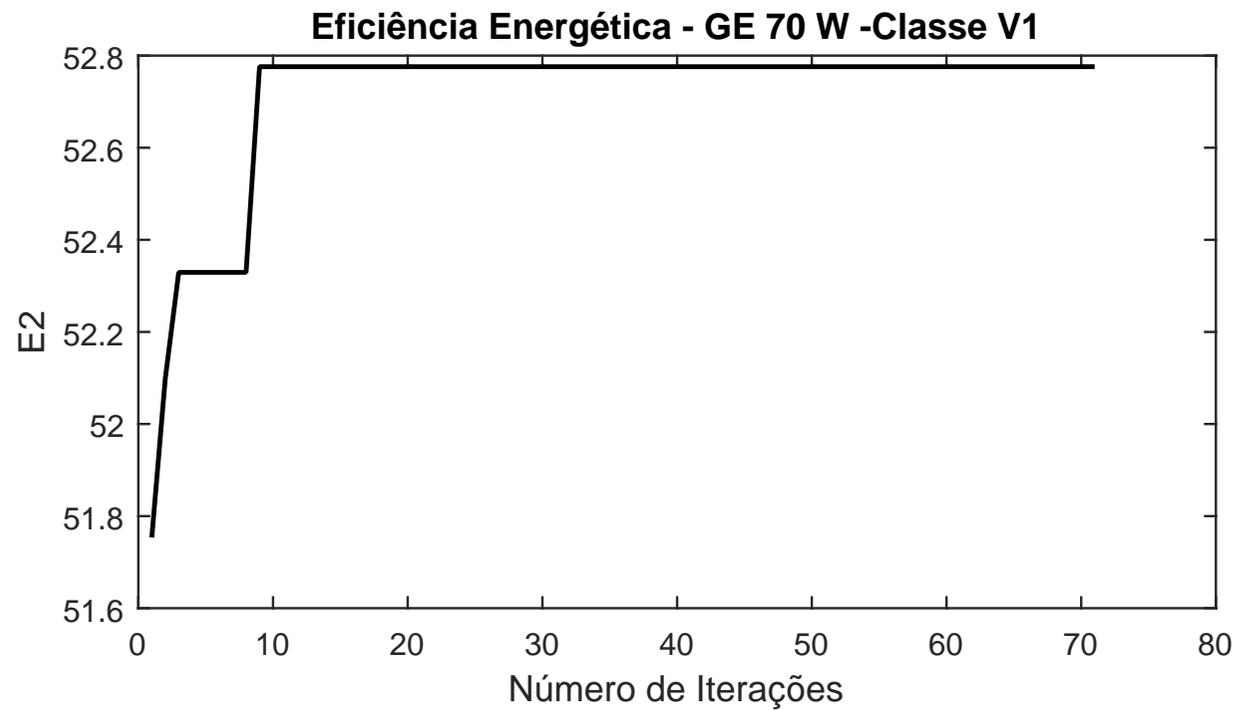


Figura 36 – Curva de Convergência para a Classe V1 - 70W - Domínio Discreto.

Fonte – Elaborado pelo Autor

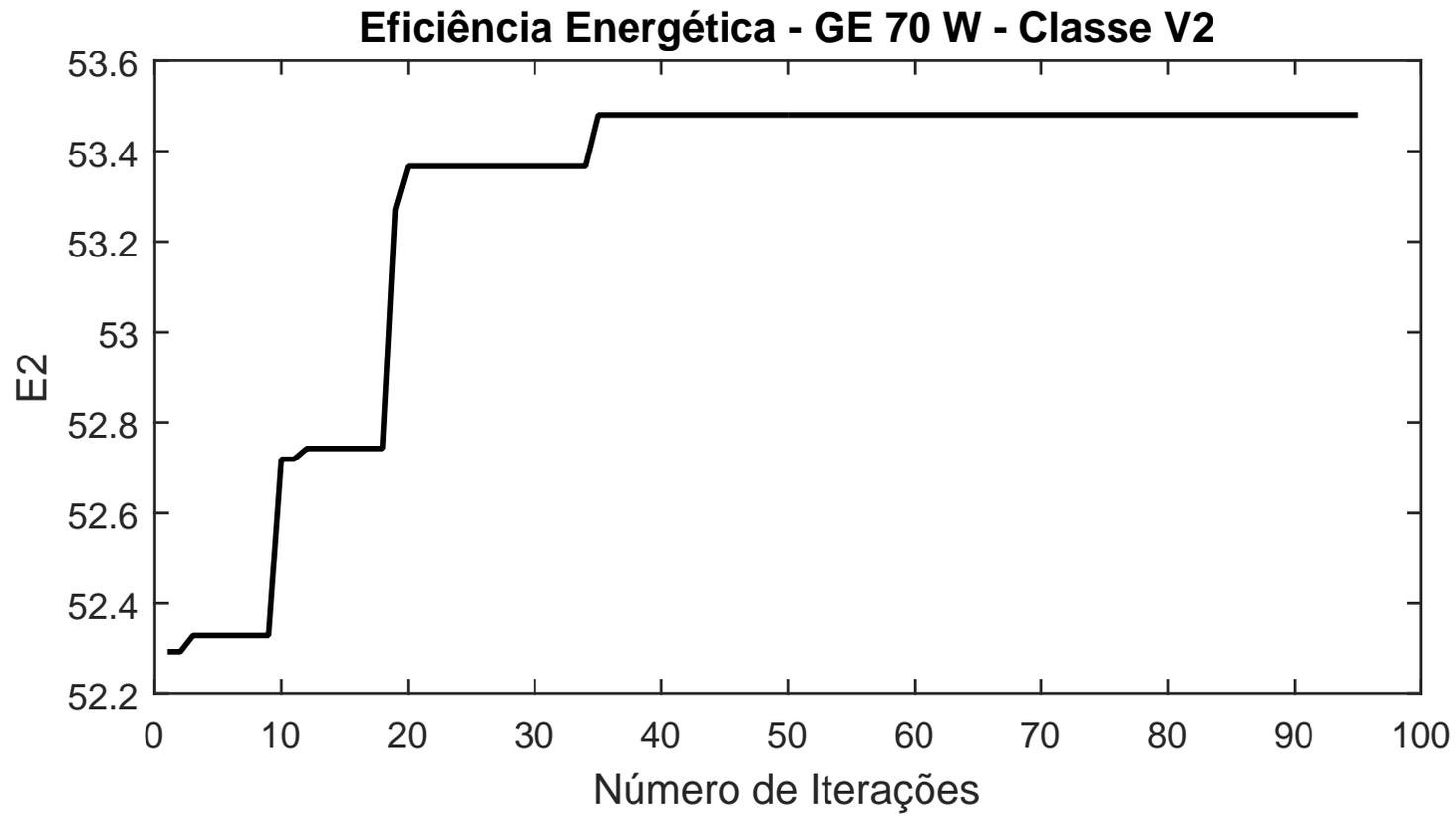


Figura 37 – Curva de Convergência para a Classe V2 - 70W - Domínio Discreto.

Fonte – Elaborado pelo Autor

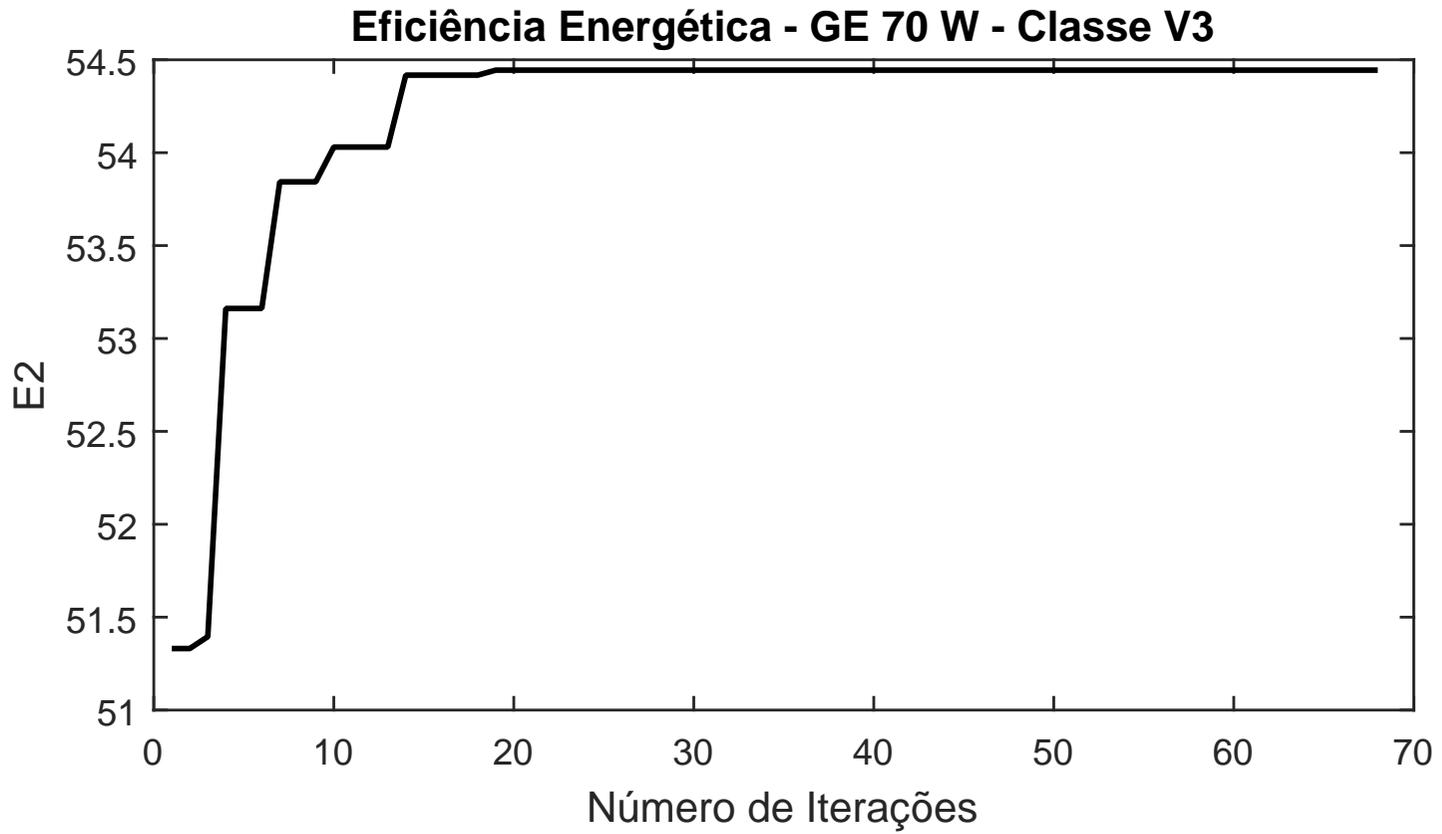


Figura 38 – Curva de Convergência para a Classe V3 - 70W - Domínio Discreto.

Fonte – Elaborado pelo Autor

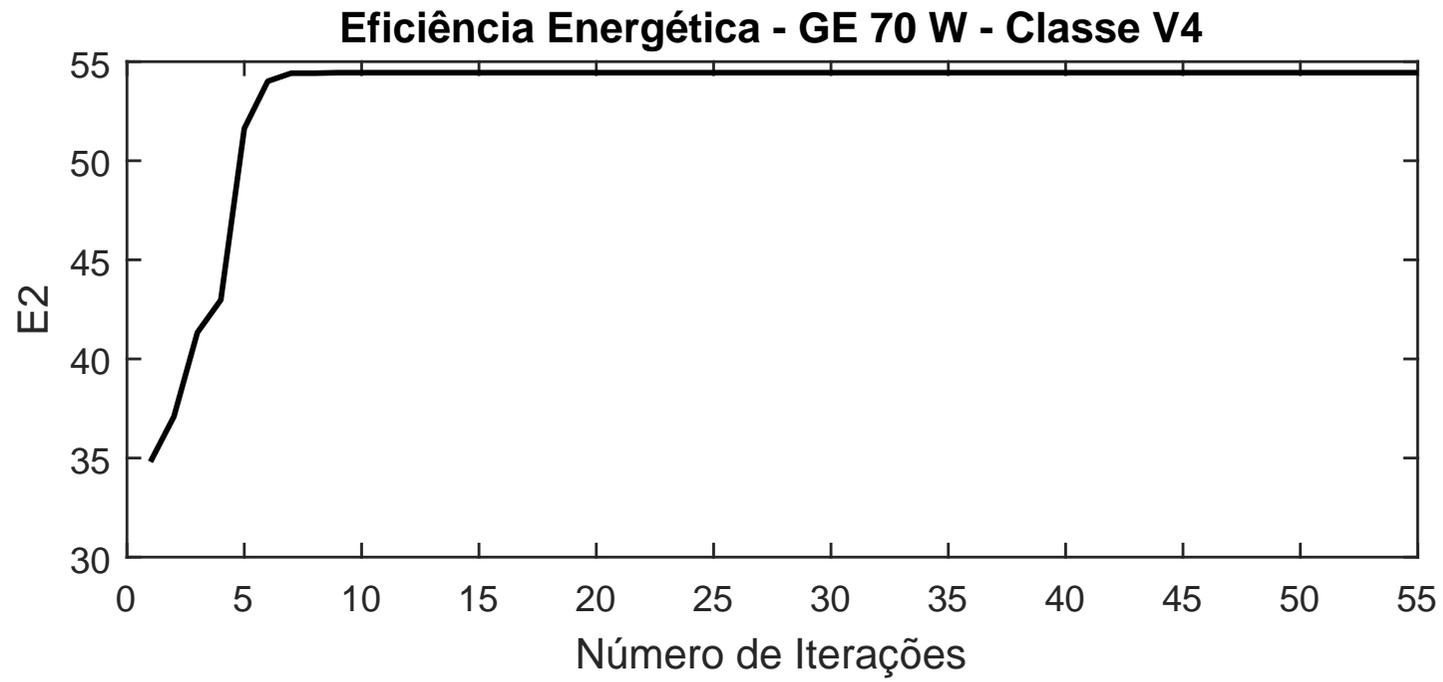


Figura 39 – Curva de Convergência para a Classe V4 - 70W - Domínio Discreto.

Fonte – Elaborado pelo Autor

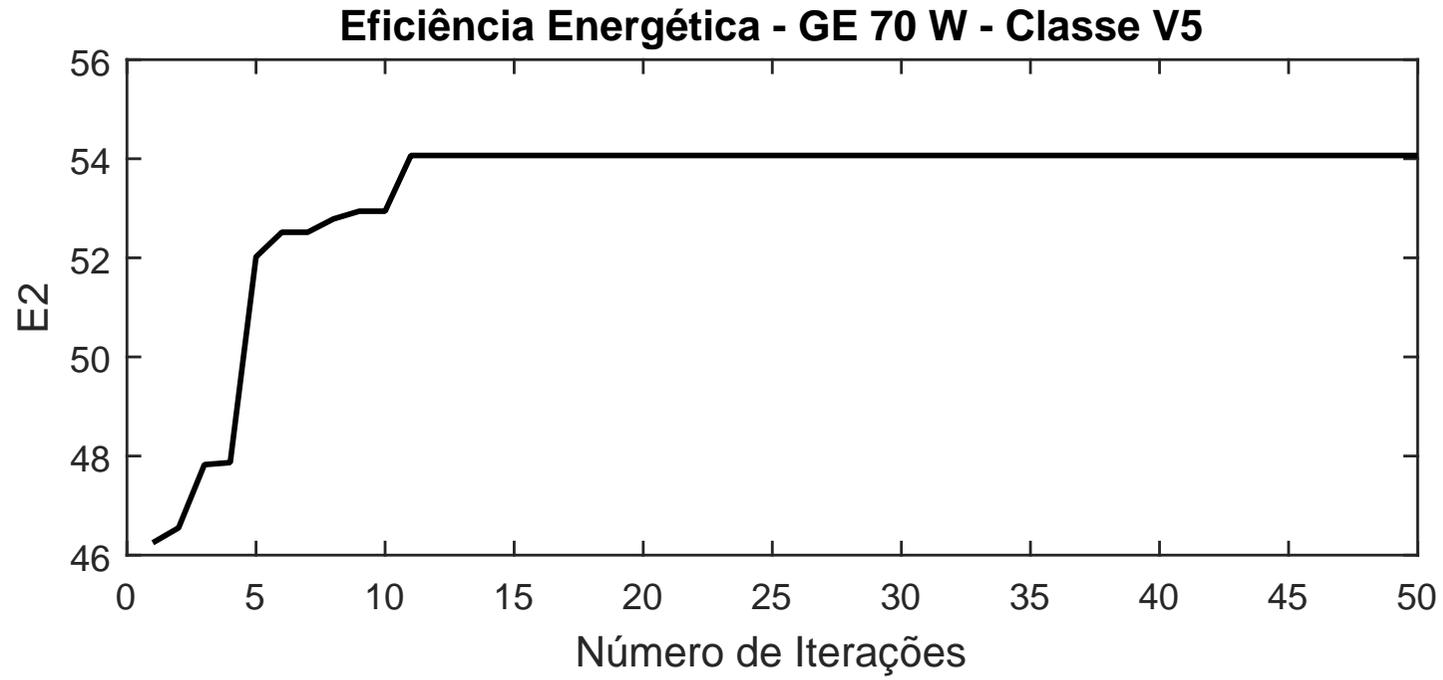


Figura 40 – Curva de Convergência para a Classe V5 - 70W - Domínio Discreto.

Fonte – Elaborado pelo Autor

B.2 Luminária Philips 150W

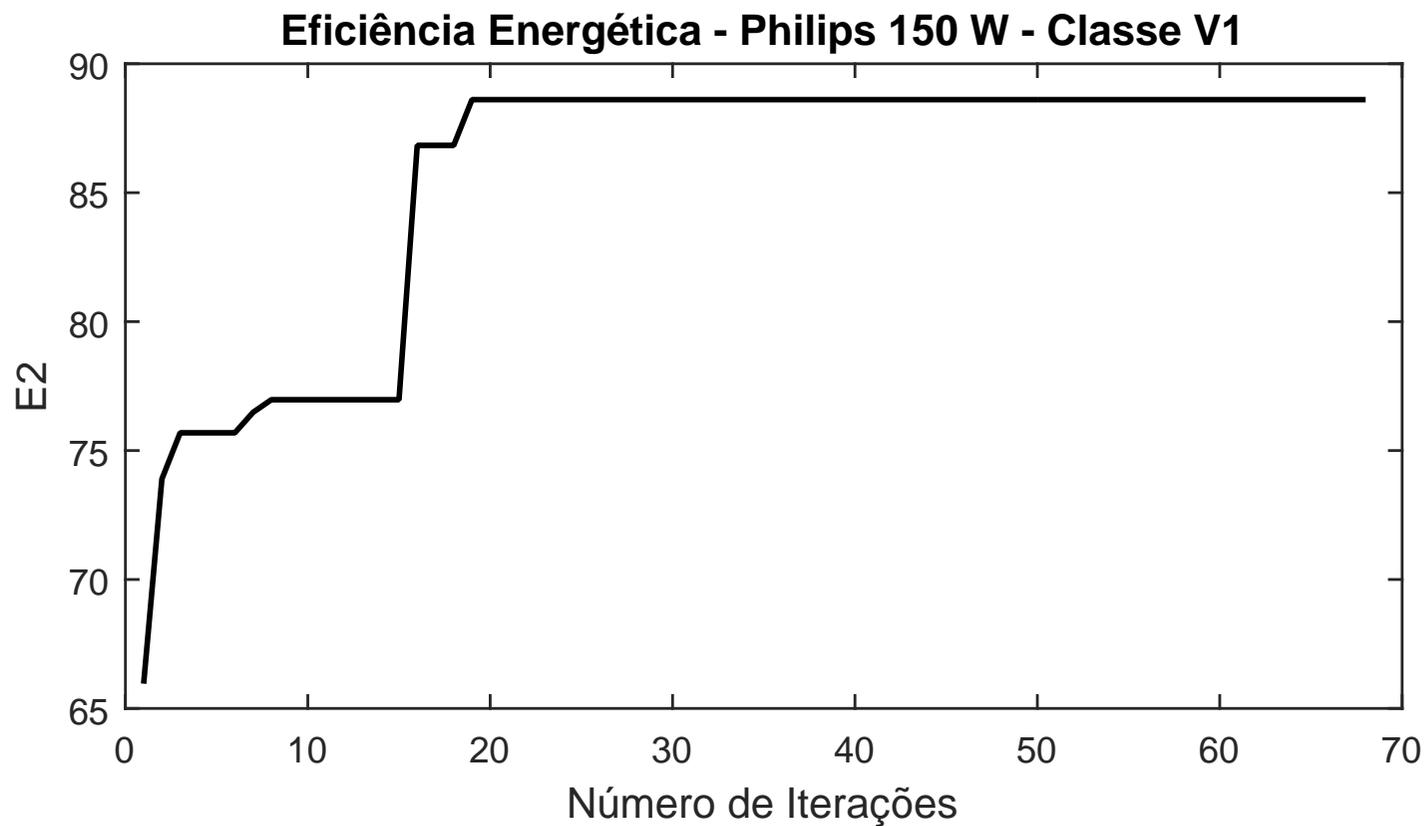


Figura 41 – Curva de Convergência para a Classe V1 - 150W - Domínio Discreto.

Fonte – Elaborado pelo Autor

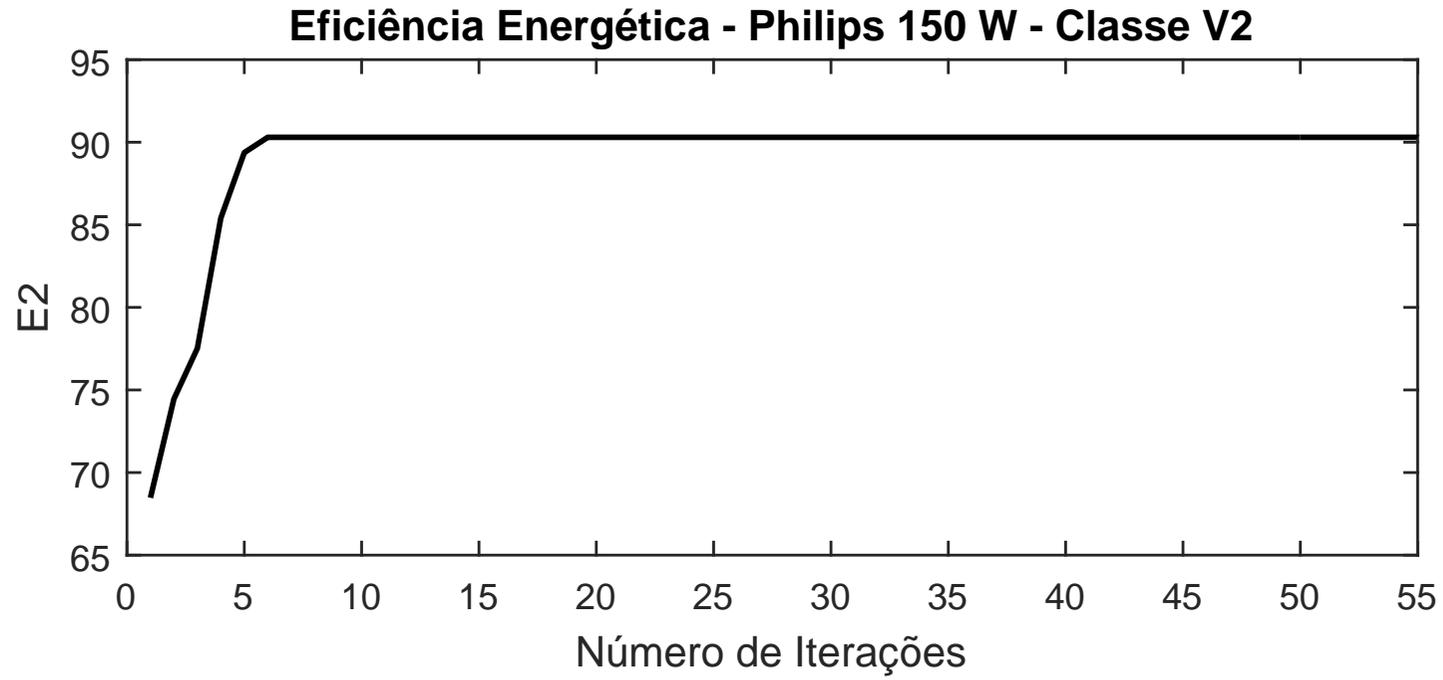


Figura 42 – Curva de Convergência para a Classe V2 - 150W - Domínio Discreto.

Fonte – Elaborado pelo Autor

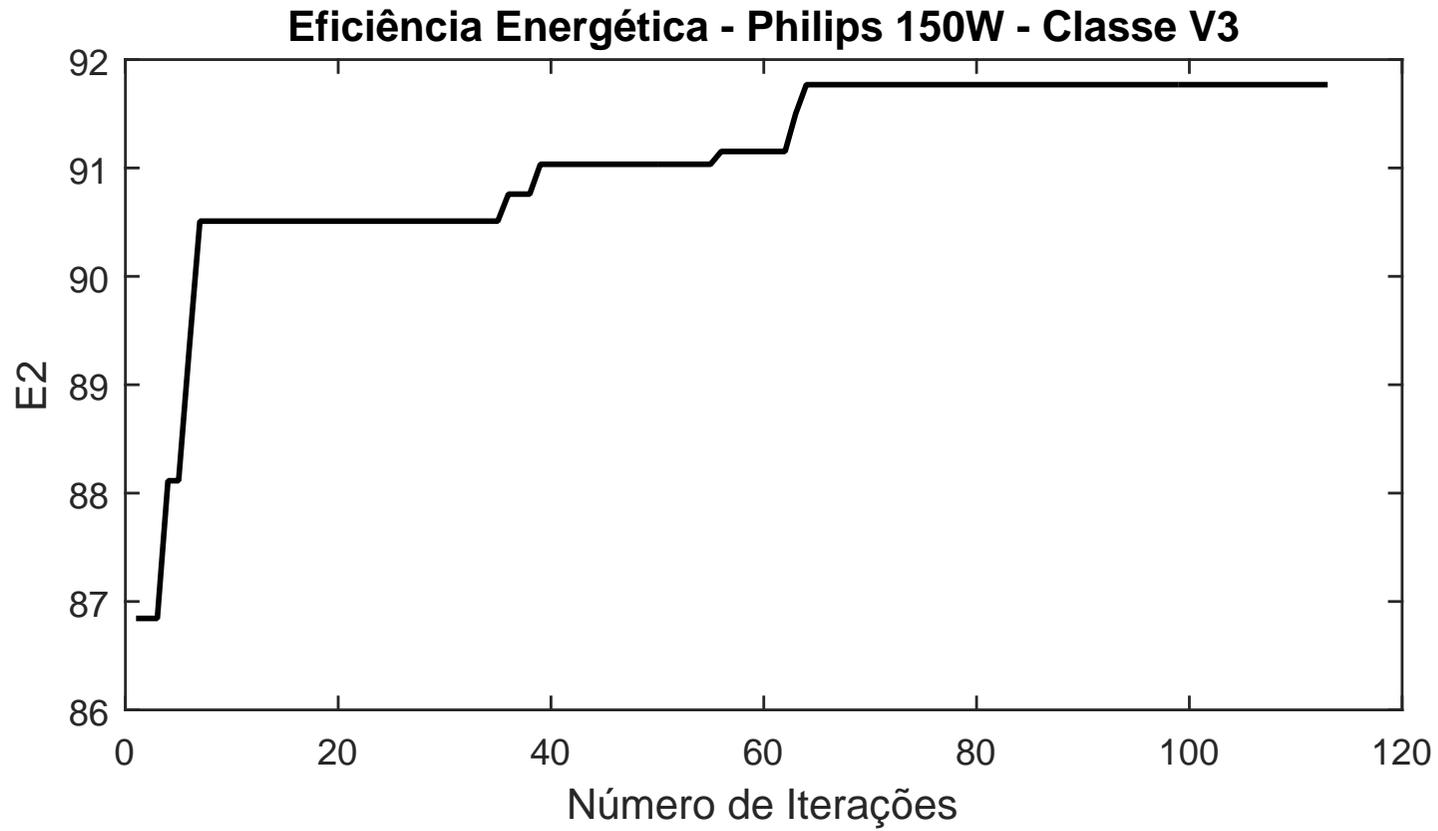


Figura 43 – Curva de Convergência para a Classe V3 - 150W - Domínio Discreto.

Fonte – Elaborado pelo Autor

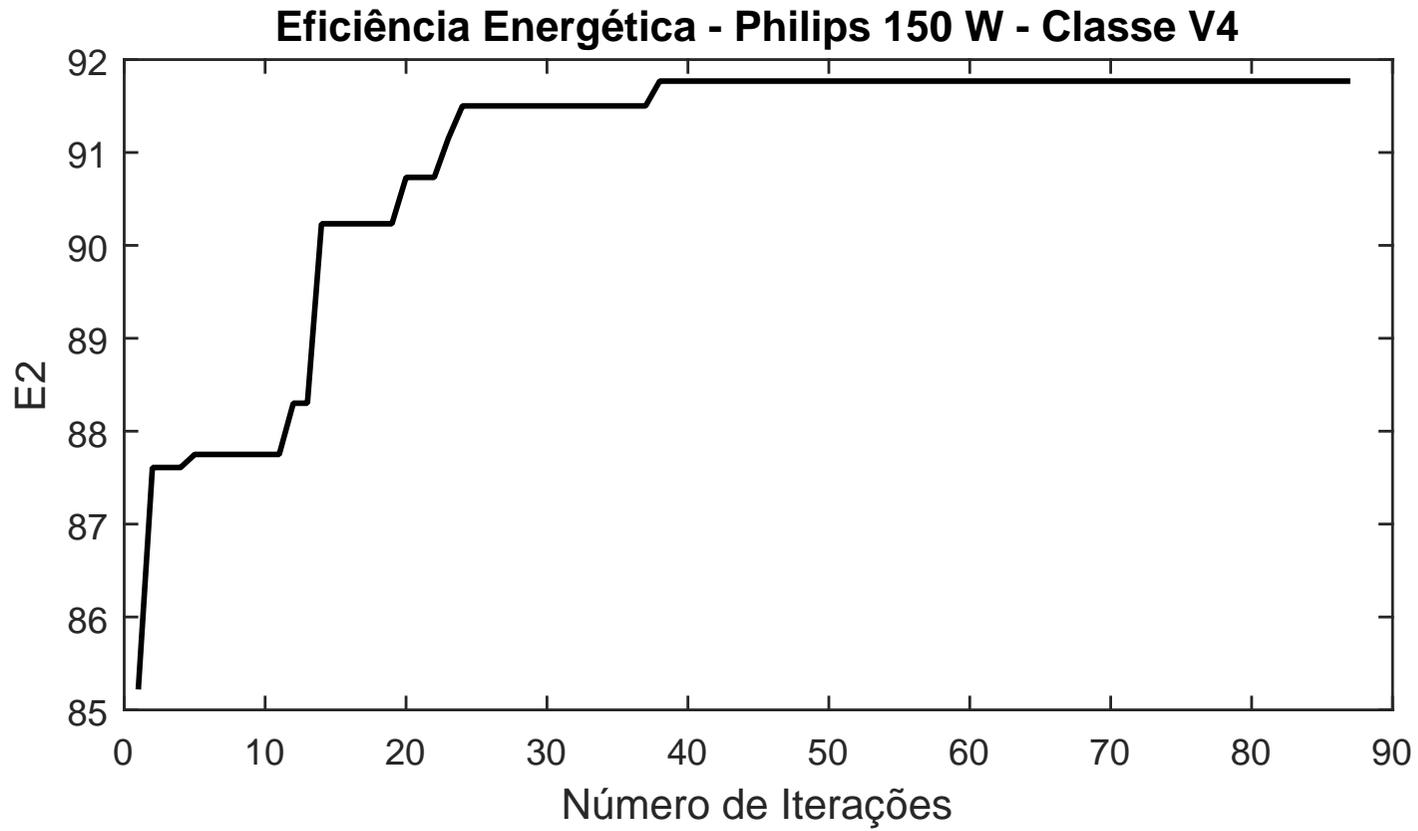


Figura 44 – Curva de Convergência para a Classe V4 - 150W - Domínio Discreto.

Fonte – Elaborado pelo Autor

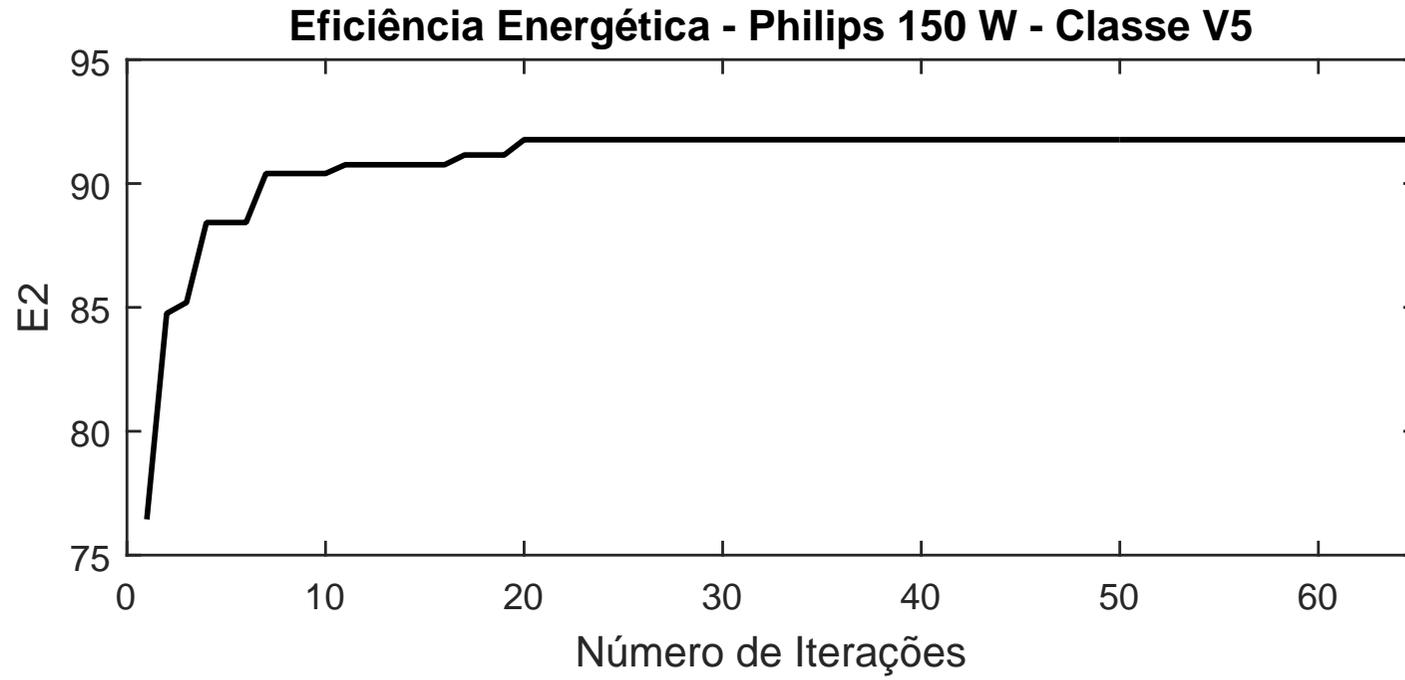


Figura 45 – Curva de Convergência para a Classe V5 - 150W - Domínio Discreto.

Fonte – Elaborado pelo Autor