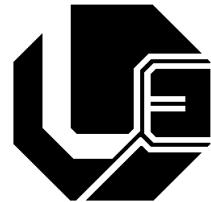


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**Otimização de Algoritmo Evolucionário
Multiobjetivo Paralelo para a geração
automática de Projetos de Iluminação
de áreas externas.**

Hugo Xavier Rocha

Uberlândia
2015

Hugo Xavier Rocha

**Otimização de Algoritmo Evolucionário
Multiobjetivo Paralelo para a geração
automática de Projetos de Iluminação
de áreas externas.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Processamento da Informação, Inteligência Artificial

Orientador: Prof. Dr. Keiji Yamanaka

Uberlândia
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

R672o Rocha, Hugo Xavier, 1970-

2015 Otimização de algoritmo evolucionário multiobjetivo paralelo para a geração automática de projetos de iluminação de áreas externas / Hugo Xavier Rocha. - 2015.

112 f.

Orientador: Keiji Yamanaka.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Iluminação elétrica - Teses. 3. Programação paralela (Computação) - Teses. 4. Algoritmos paralelos - Teses. I. Yamanaka, Keiji. II. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática. III. Título.

Hugo Xavier Rocha

**Otimização de Algoritmo Evolucionário
Multiobjetivo Paralelo para a geração
automática de Projetos de Iluminação
de áreas externas.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Processamento da Informação, Inteligência Artificial

Uberlândia, 20 de novembro de 2015

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Keiji Yamanaka – FEELT/UFU

Edilberto Pereira Teixeira, Dr – UNIUBE

Sérgio A. A. de Freitas , Dr – UNB

Sérgio Ferreira de Paula Silva, Dr –
FEELT/UFU

Rita Maria da Silva Julia , Dra –
FACOM/UFU

Abstract

Rocha, H. X. **Optimization Evolutionary algorithms Multiobjective parallel to generate automated Lighting outdoors designs..** 112 p. Ph.D. Thesis – Faculty of Electrical Engineering, Federal University of Uberlândia, 2015 .

This paper presents the study of Parallel Multiobjective Evolutionary Algorithms to enable the automation of exterior lighting designs by computers and results in an optimized version of the algorithm. The resulting algorithm basically works with variable length chromosomes and for which intrinsic operators of crossover and mutation were created. The fitness function was determined through a statistical evaluation method (difference of means), thus enabling the comparison of how different options of fitness functions could impact the performance of the proposed parallel multi-objective evolutionary algorithm. The chosen fitness function enables to develop more efficiently automated designs for exterior lighting. Moreover, adding to the proposed evolutionary algorithm, an application was developed in which the user chooses which the heights of the poles, lamps and fixtures to use and also the layout of the area to be illuminated (allowed to be irregular). Within this area, can be defined sub-areas where there are restrictions on the placement of lighting poles. The user must be set average illumination with a respective tolerance range, though. As a case study, the area of an airport parking lot in the city of Uberlândia-MG (Brazil) is presented. Evolved designs present a low coefficient of variation evaluated for 30 runs. This demonstrates that the system is converging on designs for similar metrics. By identifying the worst and the best of designs achieved by the system for those executions, one could note that there are savings regarding installed capacity when compared to the design of reference: 37.5 % for the worst evolved design and 50.0 % for the best evolved design. Also, evolved designs have better lighting uniformity and energy efficiency, as well as their respective quantities of lighting poles have decreased.

Keywords: Lighting. Parallel programming. Evolutionary algorithms multiobjective parallel. NSGA-II. Chromosome variable.

Resumo

Rocha, H. X. **Otimização de Algoritmo Evolucionário Multiobjetivo Paralelo para a geração automática de Projetos de Iluminação de áreas externas.**. 112 p. Tese – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2015 .

Este trabalho apresenta o estudo de um Algoritmo Evolucionário Multiobjetivo Paralelo que viabiliza a criação de projetos de iluminação de áreas externas automatizadas por computador e que resulta em uma versão otimizada desse algoritmo. O algoritmo resultante, essencialmente, trabalha com cromossomos de tamanho variável e para os quais foram criados operadores intrínsecos de cruzamento e mutação. A determinação da função de aptidão ocorreu por meio do método de avaliação estatística (diferença de médias), possibilitando, assim, a comparação de diferentes opções das funções de aptidão no desempenho do algoritmo evolucionário multiobjetivo paralelo proposto. Com a função escolhida, tornou-se possível construir projetos automatizados de iluminação externa de forma mais eficiente. Além disso, por meio do algoritmo evolucionário proposto, foi desenvolvida uma aplicação, pela qual o usuário escolhe quais as alturas dos postes, lâmpadas e luminárias que deseja utilizar e também o *layout* de área a ser iluminada (mesmo que irregular). Dentro dessa área, podem ser definidas subáreas onde existem restrições quanto à colocação de postes de iluminação. O usuário deve definir a iluminação média associada à sua respectiva tolerância, ou faixa de variação. Como estudo de caso, é apresentada a área de um estacionamento do aeroporto da cidade de Uberlândia, MG. Os projetos desenvolvidos, apresentam um baixo coeficiente de variação calculado a partir de 30 execuções. Isso demonstra que o sistema está convergindo para projetos com métricas similares. Ao identificar o pior e o melhor dos projetos apresentados como solução pelo sistema para essas execuções, pode-se notar que apresentam economia nas potências instaladas quando comparados ao projeto de referência: 37,5% no pior dos projetos e 50% no melhor projeto apresentado. Além disso, constataram-se melhores uniformidades

para iluminação e maiores eficiências energéticas, bem como a diminuição das respectivas quantidades de unidades de iluminação.

Palavras-chave: Iluminação. Programação paralela. Algoritmos Evolucionários multi-objetivo paralelos. NSGA-II. Cromossomo variável.

Lista de ilustrações

Figura 1 – <i>Representação gráfica de um esferorradiano (IESNA, 2000).</i>	27
Figura 2 – <i>Curva IES</i>	28
Figura 3 – <i>Definição das alturas para o cálculo de K (OSRAM, 2013).</i>	29
Figura 4 – <i>Recomendação quando à distribuição de luminárias (OSRAM, 2013).</i>	32
Figura 5 – <i>Orientação para quantidades geométricas (IESNA, 2000).</i>	33
Figura 6 – <i>Algoritmo dos Algoritmos Genéticos (AG) típicos (MITCHELL, 1996).</i>	37
Figura 7 – <i>Operador cruzamento (GOLDBERG, 1989).</i>	40
Figura 8 – <i>Operador Mutação (GOLDBERG, 1989).</i>	41
Figura 9 – <i>Paradigma de comunicação mestre escravo (CHIPPERFIELD; FLEMING, 1996).</i>	42
Figura 10 – <i>Algoritmo evolucionário de granulação fina (LUQUE; ALBA, 2011).</i>	43
Figura 11 – <i>Algoritmo evolucionário paralelo em ilhas (RIVERA, 2001).</i>	44
Figura 12 – <i>Fluxograma para NSGA-II (DEB et al., 2002).</i>	45
Figura 13 – <i>Cálculo do crowding-distance. Os pontos marcados em círculos preenchidos são soluções da mesma fronteira e são do tipo não dominados (DEB et al., 2002).</i>	46
Figura 14 – <i>Processo do NSGA-II (DEB et al., 2002).</i>	46
Figura 15 – <i>Arquitetura de um Cluster (PARHAMI, 2005).</i>	48
Figura 16 – <i>Divisão dos processos de forma sequencial (KIRBY; KARNIADAKIS, 2003).</i>	49
Figura 17 – <i>Divisão dos processos de forma paralela (KIRBY; KARNIADAKIS, 2003).</i>	50
Figura 18 – <i>Taxonomia de Flynn com a expansão de Jhonson (FLYNN, 1972).</i>	52
Figura 19 – <i>Elementos de um serviço Web (TIDWELL; SNELL; KULCHENKO., 2001).</i>	55
Figura 20 – <i>Integração cliente-Cluster via serviços Web</i>	59
Figura 21 – <i>Esquema de ($M \times N$) processos MPI de M nós trabalhando juntos.</i>	59

Figura 22 – Programa Java cliente.	62
Figura 23 – Manipulação de dados do Poste.	63
Figura 24 – Manipulação de dados das lâmpadas.	64
Figura 25 – Manipulação de dados da luminária.	64
Figura 26 – Manipulação de dados da área a ser iluminada.	65
Figura 27 – Entrada de dados para a construção do projeto de iluminação.	66
Figura 28 – Formulário para configuração avançada do projeto.	66
Figura 29 – Cromossomo representado por c . P_nL_m representa o par (poste, conjunto luminária-lâmpada). $(x_{nm}^{(k)}, y_{nm}^{(k)})$ é a posição no plano (eixo xy) e $\beta^{(k)}$ o ângulo da luminária em relação ao poste no plano horizontal. Todos os dados são para o k^{th} par do tipo P_nL_m	69
Figura 30 – Cruzamento : Par de pais escolhidos(* são pontos de cruzamento).	70
Figura 31 – Cruzamento entre os pais $p1$ e $p2$ gerando os filhos $o1$ e $o2$	70
Figura 32 – Aptidão parcial em função da iluminação calculada para um determinado ponto observado.	73
Figura 33 – Estudo de caso, estacionamento com formato irregular de $3.500m^2$	76
Figura 34 – Curva fotométrica da luminária isotrópica, unidade em $cd/1000\ lm$	84
Figura 35 – Uma área quadrada de $1,600\ m^2$ para ser iluminada.	86
Figura 36 – Curva isolux orientada pelo método dos lumens. Observa-se que existem alguns postes de iluminação colocados em áreas proibidas.	87
Figura 37 – Curva Isolux desde o projeto construído pelo ELCAutoD-EA.	88
Figura 38 – Caso de estudo, Layout simplificado de um estacionamento de formato irregular $3,550\ m^2$ ($160 \times 30\ m$, no geral).	89
Figura 39 – Curva Isolux do projeto de iluminação exterior realizado por engenheiro especializado.	90
Figura 40 – Curva Isolux de um projeto de iluminação exterior evoluído pelo sistema ELCAutoD-EA	91
Figura 41 – Curva fotométrica da luminária BETA. (unidades em $cd/1000\ lm$)	95
Figura 42 – Estudo de caso, estacionamento com formato irregular de $3.500m^2$	96
Figura 43 – Aptidão parcial em função da iluminação calculada para um determinado ponto observado, aqui nomeada função “passa-faixa”.	97
Figura 44 – Gráficos da primeira Fronteira.	98
Figura 45 – Valores ordenados obtidos a partir da aplicação da métrica de desempenho global.	100
Figura 46 – Boxplots das variáveis de resposta das soluções de projeto apresentadas nas 30 execuções da aplicação.	101
Figura 47 – Layout do projeto de referência.	103

Figura 48 – <i>Layout</i> do projeto pior cotado dentre todas as melhores soluções apresentadas nas 30 execuções, classificado de acordo com métrica própria apresentada ($0,4E_{med} = 11,86lx$)	103
Figura 49 – <i>Layout</i> do projeto melhor cotado dentre todas as melhores soluções apresentadas nas 30 execuções, classificado de acordo com métrica própria ($0,4E_{med} = 10,83lx$)	103

Lista de tabelas

Tabela 1 – <i>Fator de utilização (OSRAM, 2013)</i>	30
Tabela 2 – <i>Fator de manutenção (OSRAM, 2013)</i>	30
Tabela 3 – <i>Etiqueta de eficiência energética para uma instalação de iluminação (REGULAMENTO..., 2008)</i>	36
Tabela 4 – Classificação da arquitetura de um computador ou conjunto e computadores (FLYNN, 1972)	51
Tabela 5 – Combinações de mutação : ✓, ✗ mutação realizada e não realizada respectivamente.	71
Tabela 6 – Etiqueta de eficiência energética para uma instalação de iluminação (reproduzido a partir de (REGULAMENTO..., 2008))	75
Tabela 7 – Identificação das oito variações de aptidão (AE) relativa aos critérios qualidade de iluminação e eficiência energética.	77
Tabela 8 – Respostas médias calculadas após 160 execuções de cada variação. . . .	78
Tabela 9 – Desvio padrão calculado após 160 execuções de cada variação.	79
Tabela 10 – Comparação entre os algoritmos evolucionários no critério consumo médio (Minimização).	80
Tabela 11 – Comparação entre os algoritmos evolucionários no critério uniformidade global (Maximização).	81
Tabela 12 – Comparação entre os algoritmos evolucionários no critério de eficiência energética (Maximização).	81
Tabela 13 – Dominância estatística de Pareto aplicada aos dados das tabelas 10, 11 E 12.	82
Tabela 14 – Classificação nas fronteiras de Pareto.	82
Tabela 15 – <i>Comparação entre o método dos lumens e o ELCAutoD-EA (melhores valores de cada coluna em negrito)</i>	89
Tabela 16 – <i>Listagem dos postes de iluminação disponíveis para o CAutoD</i>	91

Tabela 17 – <i>Comparação entre o projeto construído pelo engenheiro e pelo sistema ELCAutoD-EA (melhores valores de cada coluna em negrito).</i>	91
Tabela 18 – <i>Speed-ups conseguido através de um cluster em relação a um computador com um núcleo para o projeto automatizado de iluminação exterior do estacionamento do aeroporto de Uberlândia (Brasil).</i>	92
Tabela 19 – Lâmpadas cadastradas para iluminação externa (O consumo e o fluxo das lâmpadas são para a temperatura de 25°C). Todas as lâmpadas listadas são fabricadas pela Osram.	95
Tabela 20 – Estatísticas das variáveis de resposta das soluções apresentadas para cada uma das 30 execuções do aplicativo.	100
Tabela 21 – Pior e melhor projetos apresentados dentro das 30 execuções da aplicação, de acordo com métrica dedicada que relaciona as variáveis de resposta, em comparação com o projeto de referência.	101
Tabela 22 – Dados do projeto de referência.	102
Tabela 23 – Dados do projeto pior cotado dentre todas as melhores soluções apresentadas nas 30 execuções, classificado de acordo com métrica própria apresentada.	102
Tabela 24 – Dados do projeto melhor cotado dentre todas as melhores soluções apresentadas nas 30 execuções, classificado de acordo com métrica própria.	103

Lista de Siglas

AG Algoritmos Genéticos

AE Algoritmos Evolucionários

AGPs Algoritmos Genéticos Paralelos

AXIS Apache eXtensible Interaction System

cd Candela

CIE Comissão Internacional de Iluminação

CEN Comitê Europeu de Normalização

U Fator de utilização

FM Fator de manutenção

lm Lúmen

lx Lux

MPI Message Passing Interface

NFS Network File System

nm nanômetros

NSGA-II A Fast Elitist Multiobjective Genetic Algorithm

PXE Preboot Execution Environment

ReLuz Programa Nacional de Iluminação Pública Eficiente

SOAP Simple Object Access Protocol

U_O Uniformidade global

U_L Uniformidade longitudinal

W3C World Wide Web Consortium

XML eXtensible Markup Language

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Motivação	19
1.2	Objetivos	20
1.2.1	Geral	20
1.2.2	Específico	20
1.3	Organização do trabalho	21
1.4	Artigos publicados	21
2	Trabalhos Relacionados	23
2.1	Artigos de iluminação com algoritmos evolucionários multiobjetivo	23
2.1.1	Projetos automatizados com algoritmos evolucionários	24
2.2	Considerações finais do capítulo	25
3	Referencial teórico	26
3.1	Iluminação	26
3.1.1	Pontos básicos de um projeto de iluminação	26
3.1.2	Métodos de cálculos luminotécnicos	28
3.1.3	Método ponto a ponto	31
3.2	Padrões e métricas de normas	33
3.2.1	Iluminação uniforme	34
3.2.2	Classes de eficiência energética	35
3.3	Algoritmos genéticos	36
3.3.1	Representação de um cromossomo	38
3.3.2	Geração da população inicial	38
3.3.3	Avaliação da população	39
3.3.4	Métodos de seleção	39
3.3.5	Operadores genéticos	40
3.3.6	Parâmetros dos algoritmos genéticos	41

3.3.7	Algoritmos genéticos paralelos	42
3.3.8	Um algoritmo genético multiobjetivo rápido elitista: NSGA-II	44
3.4	Programação paralela remota	46
3.4.1	Cluster	47
3.4.2	Programação paralela	49
3.4.3	Serviço Web	52
3.4.4	Aplicação cliente	56
3.5	Considerações finais do capítulo	56
4	Soluções desenvolvidas para programação paralela remota	58
4.1	<i>Cluster</i> de computadores	58
4.2	Programação paralela	59
4.3	Serviços Web	60
4.4	Cliente Java	62
4.4.1	Manipulação de dados	62
4.4.2	Projeto de iluminação otimizada de áreas externas	65
4.5	Considerações finais do capítulo	67
5	Algoritmo Evolucionário proposto	68
5.0.1	Cromossomo de tamanho variável	69
5.1	Operações de cruzamento	70
5.2	Operações de mutação	70
5.3	Escolha estatística da função de aptidão	71
5.3.1	Aptidão	72
5.3.2	Método	76
5.3.3	Resultados e discussão	78
5.4	Considerações finais do capítulo	82
6	Aplicação em caso de estudo para a análise de viabilidades	84
6.1	Parâmetros do algoritmo evolucionário	85
6.2	Resultados e discussão	85
6.2.1	Exemplo simples	86
6.2.2	Áreas com formato irregular	89
6.2.3	<i>Cluster</i> , programação paralela e <i>speed-up</i>	92
6.3	Considerações finais do capítulo	92
7	Aplicações com elementos disponíveis comercialmente	94
7.1	Introdução	94
7.2	Estudo de caso	94
7.2.1	Materiais	94
7.2.2	Parâmetros do algoritmo evolucionário	96

7.3	Resultados e discussão	99
7.4	Considerações finais do capítulo	104
8	Considerações Finais	106
8.1	Trabalhos futuros	107
	Referências	108

CAPÍTULO 1

Introdução

A eficiência e economia de energia são uma prioridade nos dias atuais para os especialistas da área de iluminação. Pensando nisso, o governo do Brasil criou o Programa Nacional de Iluminação Pública Eficiente (ReLuz) com o objetivo de promover o desenvolvimento de sistemas eficientes de iluminação pública. Para atender ao programa, tecnologias mais eficientes deverão ser utilizadas, observando os princípios de conservação de energia e as normas técnicas específicas vigentes, bem como os critérios e procedimentos técnicos e econômicos estabelecidos (RELUZ., 2004).

A União Europeia definiu padrões mais elevados de eficiência energética. A partir do dia 1º de setembro de 2009, as lâmpadas incandescentes e outras lâmpadas ineficientes começaram a ser substituídas gradualmente por lâmpadas mais eficientes, uma tendência mundial na área de iluminação. A qualidade dos projetos de iluminação está sob forte atenção das autoridades responsáveis a partir da adoção de normas cada vez mais rígidas (EUROPEAN COMMISSION., 2013). Como exemplo, foi introduzida uma diretiva de desempenho energético dos edifícios (ENERGY..., 2010). Esse instrumento promove a introdução do conceito *nearly zero-energy buildings*, em que se deve utilizar quantidades nulas ou muito baixa de energia, sendo esta proveniente de fontes renováveis produzidas no local ou nas proximidades.

A Espanha desenvolveu estratégias de poupança e eficiência de energia baseadas em ações e regulamentos dirigidos para a melhoria do sistema de energia espanhola. Essa estratégia é justificada tanto no plano socioeconômico como no ambiental. A sua implementação promove a redução significativa da emissão de poluentes na atmosfera seguindo as orientações europeias e internacionais. Uma das principais medidas que foi adotada é a melhoria das instalações de iluminação ao ar livre (REGULAMENTO..., 2008).

As recentes discussões sobre as questões socioambientais, associadas à necessidade de projetos de iluminação de maior qualidade, têm impulsionado a utilização de sistemas energéticos mais eficientes e o uso de fontes alternativas de energia (Lighting Europe, 2013). As autoridades adotam normas cada vez mais rigorosas (EUROPEAN COMMISSION., 2013; REGULAMENTO..., 2008; ABNT, 2012; RELUZ., 2004), aumentando o

tamanho e a complexidade dos projetos de iluminação. Infelizmente, as metodologias de projeto não acompanharam esse desenvolvimento, contribuindo para que se busquem novas ferramentas para esse fim (RABAZA et al., 2013).

Um bom projeto de iluminação tem como objetivo permitir que nossos ambientes ofereçam aos usuários o melhor conforto visual com o menor custo possível. Quanto menor o esforço de adaptação do indivíduo, maior será sua sensação de conforto (IESNA, 2000). Juntamente com uma melhor qualidade de iluminação, a sociedade moderna exige a eficiência energética e a utilização de energias alternativas (EUROPEAN COMMISSION., 2013). Ainda, a qualidade de um determinado projeto de iluminação está atualmente sob a atenção das autoridades responsáveis a partir da adoção de normas cada vez mais rigorosas (EUROPEAN COMMISSION., 2013; REGULAMENTO..., 2008; ABNT, 2013; RELUZ., 2004).

O engenheiro é o ator responsável para alcançar os objetivos propostos em um projeto de iluminação. Esse profissional está em uma busca contínua para encontrar o melhor compromisso de custo-benefício, considerando um baixo consumo de energia e a melhor qualidade de iluminação. Esses requisitos convertem um projeto de iluminação em um problema de otimização multiobjetivo. A ajuda de sistemas de *software* especializados é altamente desejável e é considerado um requisito para lidar com projetos de iluminação. O principal problema é que sistemas de *software* comerciais disponíveis atualmente, denominados *CAD - Computer-Aided Design*, não incluem técnicas de inteligência artificial, deixando para o engenheiro o desafio de encontrar uma solução viável (ZOU; LI, 2010; LI et al., 2010).

Estendendo o *CAD*, Kamentsky (KAMENTSKY; LIU, 1963) cunhou o termo *Computer-Automated Design (CAutoD)* ao descrever um programa de computador construído para projetar circuitos lógicos com certas restrições no projeto de *hardware* para reconhecimento de caracteres baseada no processamento de amostras de dados. Este trabalho, portanto, adota o termo *CAutoD* para se referir a qualquer projeto realizado por computadores, sem qualquer interferência humana além das definições prévias de materiais disponíveis e restrições relacionadas com o problema. Projetos automatizados têm sido bem-sucedidos (LI et al., 2010) com o suporte de técnicas da computação evolucionária (HORNBY; LOHN; S., 2011).

Problemas de otimização multiobjetivo são considerados de difícil resolução. Algoritmos Evolucionários (AE) é uma classe da heurística computacional inspirada na evolução Darwiniana e são amplamente usados para resolver com sucesso esse tipo de problema. Interessante mencionar é, como afirmado por (RABAZA et al., 2013), “no entanto, esses algoritmos não têm sido amplamente aplicados à iluminação”.

1.1 Motivação

A grande dificuldade para se obter bons projetos de iluminação deve-se ao fato de que vários objetivos devem ser contemplados. Na maioria das vezes, apenas o uso de sua experiência e bom senso não são suficientes para que o projetista tenha êxito em sua tarefa. Além disso, para compreender o impacto financeiro de um projeto eficiente de iluminação pública, considere os dados da Empresa de Distribuição de Energia Elétrica de Goiás (CELG), um importante fornecedor de energia elétrica do Brasil. Em 2010 a CELG vendeu, 617 MWh de energia para iluminação pública (RELATÓRIO..., 2010) no estado de Goiás (3,99% do território brasileiro). Imagine um cenário no qual todas as instalações de iluminação pública de Goiás pudessem ser trocadas por outras alternativas que alcancem uma média de 5% da economia mensal de energia. Isso significa mais de que seis milhões de reais por ano em economia para os cofres públicos.

O projeto de iluminação é um problema de otimização multiobjetivo (ZAVALA et al., 2014). A ajuda de sistemas de *software* especializados é altamente desejável e é considerado um requisito para lidar com projetos de iluminação. Segundo Zou e Li (2010) os atuais sistemas de auxílio a projetos de iluminação por computador não fornecem ferramentas de Inteligência Artificial. Pachamanov e Pachamanova (2008) afirmam que os sistemas de *software* disponíveis no mercado são geralmente baseados em elementos finitos, métodos de Monte Carlo ou otimização linear.

Segundo Corcione e Fontana (2003), um projeto de iluminação envolve um grande número de variáveis, que incluem fatores fotométricos, considerações econômicas e estéticas, bem como a utilização eficaz de equipamentos e materiais. Como em muitos casos, diferentes projetos são capazes de satisfazer as principais especificações, assim metodologias de otimização devem ser estudadas.

Segundo Carlucci et al. (2015), as técnicas de otimização têm evoluído consideravelmente nos últimos anos, principalmente, pela utilização das otimizações multiobjetivo que têm sido amplamente utilizadas com AE.

Devido à alta dimensionalidade do problema que foi proposto para ser resolvido, tornou-se necessária a utilização da computação de alto desempenho por meio de um *cluster* de computadores e da programação paralela, o que permitiu maior poder de cálculo para que a melhor solução seja alcançada no menor tempo possível.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Estudo e implementação de técnicas de AE paralelo multiobjetivo que possibilite a construção de um sistema de *software* que consiga gerar projetos de iluminação de áreas

externas de forma automatizada, respeitando as normas, com baixo consumo e distribuição uniforme da luz.

1.2.2 Específico

- ❑ Escolha estatística da função de aptidão;
- ❑ Aplicação de caso de estudo, para análise de viabilidade;
- ❑ Aplicação de caso de estudo com componentes disponíveis comercialmente.

1.2.2.1 Técnicas para apoiar os objetivos específicos

- ❑ Configurar um *cluster* de computadores;
- ❑ Configurar um servidor de serviços *Web Apache AXIS*;
- ❑ Construir um serviço *Web* para fazer a ligação entre o algoritmo evolucionário multiobjetivo e a aplicação cliente;
- ❑ Construir uma aplicação cliente que permita ao usuário entrar com os dados e receber do *cluster* o projeto de iluminação pronto.

1.3 Organização do trabalho

A tese está organizada da seguinte maneira: o capítulo 2 visa apresentar os trabalhos relacionados encontrados na literatura que contribuem com a grande área na qual nosso trabalho está inserido. Nele fazemos ampla investigação das discussões sobre AE multiobjetivo aplicados a projetos de iluminação. No capítulo 3, são apresentados os fundamentos teóricos sobre o qual o trabalho está sendo construído. Com relação à iluminação, são mostrados os métodos de iluminação luminotécnicos. O funcionamento e as principais técnicas utilizadas para a boa utilização dos AE multiobjetivo paralelo, bem como os conceitos dos serviços *Web*, da programação paralela utilizando o MPI e a utilização de programas clientes que buscam informações em serviços *Web* também são descritos em detalhes. O capítulo 4 apresenta como foi implementado o *cluster*, como é utilizada a programação paralela e os serviços *Web*. Também é mostrado o funcionamento da aplicação cliente. No Capítulo 5, são apresentadas as propostas do cromossomo utilizado, bem como os métodos de cruzamento, mutação e também uma análise que possibilita a fundamentação da escolha da função de aptidão utilizada no projeto. No capítulo 6, trabalhamos em um estudo de caso que verifica a viabilidade das técnicas desenvolvidas que possibilitam a construção automatizada de projetos de iluminação. No capítulo 7, são aplicadas todas as técnicas estudadas utilizando material com disponibilidade comercial e é feito um trabalho estatístico que valida o desempenho do sistema proposto. O capítulo 8

apresenta as considerações finais do trabalho. Nele é situado onde o trabalho se encontra e qual são os rumos que o mesmo deve ter no futuro.

1.4 Artigos publicados

No decorrer do trabalho, alcançaram-se alguns objetivos gerando bons resultados. Com esses resultados, escreveram-se dois artigos que foram aceitos nos seguintes congressos:

- H. X. Rocha, I. S. Peretta, G. F. M. Lima, L. G. Marques, and K. Yamanaka, “Genetic algorithms applied to computer-generated green public lighting design” in Proceedings of CBIC2011 X Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional, 2011.
- H. X. Rocha, I. S. Peretta, G. F. M. Lima, L. G. Marques, and K. Yamanaka, “Green Public Lighting Design Solved by a Remote Genetic Algorithm Application” in Proceedings of 10th IEEE/IAS internacional conference on industry applications, 2012.

O artigo seguinte foi aceito pela revista *Expert Systems with Applications*, que atualmente é classificada como A1 para Engenharias IV pela CAPES. Esse artigo foi baseado no capítulo 6 desta tese.

- H. X. Rocha, I. S. Peretta, G. F. M. Lima, L. G. Marques, and K. Yamanaka, “Exterior lighting computerautomated design based on multicriteria parallel evolutionary algorithm: optimized designs for illumination quality and energy efficiency”

Dois artigos estão em fase de avaliação por revistas indexadas.

- H. X. Rocha, I. S. Peretta, G. F. M. Lima, R.S. BoaVentura, L. G. Marques, and K. Yamanaka, “Statistical Decision Support for Fitness Function Formulation to Multi-Objective Evolutionary Algorithms: a Case Study on Computer Automated Exterior Lighting Design”.
- H. X. Rocha, I. S. Peretta, G. F. M. Lima, R.S. BoaVentura, L. G. Marques, and K. Yamanaka, “Algoritmo Evolucionario Multi-Objetivo Paralelo Aplicado A Projetos De Iluminação De Áreas Externas”.

O primeiro artigo foi enviado para a revista *IEEE Latin America Transactions*, e o segundo para *Ciência & Engenharia*. Atualmente, essas revistas são classificadas como B2 para Engenharias IV pela CAPES. Esses artigos foram baseados, respectivamente, nos capítulos 6 e 8 desta tese.

CAPÍTULO 2

Trabalhos Relacionados

Este capítulo visa apresentar os trabalhos relacionados encontrados na literatura que contribuem com a grande área na qual nosso trabalho está inserido. Eles irão permitir conhecer métodos e técnicas que estão sendo utilizados na área de AE para trabalhar com projetos de otimização da iluminação. Outro fator importante é que, a partir dessas pesquisas, verificamos o que ainda não foi feito para que possamos contribuir de forma mais incisiva com a área.

2.1 Artigos de iluminação com algoritmos evolucionários multiobjetivo

Segundo Rabaza et al. (2013), nos últimos anos, a eficiência energética das instalações de iluminação pública tem se tornado uma importante área de estudo. Esses estudos estão voltados para atingir a uniformidade e obter valores de iluminação recomendados pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE). Ainda, relata que os sistemas de *software* de projetos de iluminação disponíveis comercialmente não trazem ferramentas de apoio baseadas em inteligência artificial. Com base nesse cenário, esses autores propõem novas relações de parâmetros para projetos de iluminação pública de ruas e avenidas(ou seja, iluminância média, espaçamento de luminária, e altura de montagem). Esses parâmetros foram calculados a partir de uma grande amostra de conjuntos de dados otimizados com um AE multiobjetivo. Os critérios de otimização incluíam a máxima eficiência energética e a uniformidade geral.

O trabalho de Zou e Li (2010) utiliza algoritmos genéticos multiobjetivo para otimizar a distribuição da intensidade luminosa em estradas que possuem iluminação artificial. O algoritmo genético multiobjetivo utilizado é derivado do método baseado em pesos. Esse método considera que existe um vetor de funções de avaliação $f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]$, que pode ser transformado em um único escalar por meio do somatório ponderado de cada um dos objetivos. O algoritmo tenta otimizar o valor da Uniformidade global (U_O) e da

Uniformidade longitudinal (U_L). Apesar de ter dois objetivos, eles não têm características opostas, ou seja, a melhora de um objetivo não desarranja o outro. A função de aptidão incorpora dois parâmetros de adaptação e trabalha com um método baseado em pesos. Esse trabalho não se preocupa com o consumo de energia, ele busca a otimização da curva fotométrica atuando nas luminárias a fim de garantir a uniformidade global e longitudinal da luminância (U_O , U_L) que são dois itens importantes para avaliar a qualidade da iluminação da estrada.

No trabalho de Corcione e Fontana (2003), foi utilizado algoritmo genético clássico para a otimização de projetos de iluminação. Realizou-se uma comparação entre a avaliação de desempenho do método proposto, que utiliza algoritmo genético, e métodos tradicionais tais como os métodos de Monte Carlo e o do Gradiente. Os estudos de caso são constituídos por projetos de iluminação de uma quadra de tênis e de um campo de futebol ao ar livre. A comparação entre os resultados obtidos a partir do processo de otimização são discutidos. Considerações entre os tempos computacionais e a precisão dos cálculos também foram apresentadas.

2.1.1 Projetos automatizados com algoritmos evolucionários

Após uma pesquisa da literatura disponível como estado da arte, apenas quatro artigos poderiam tangenciar o tema desta tese.

No trabalho de Pachamanov e Pachamanova (2008) é realizada a otimização de projetos de iluminação pública para túneis que satisfaçam os requisitos estabelecidos pela CIE e pelo Comitê Europeu de Normalização (CEN) nos quesitos qualidade de iluminação e consumo de energia. O problema é formulado como uma otimização linear que incorpora os parâmetros geométricos da instalação da iluminação e as propriedades refletores da superfície da estrada. Os experimentos computacionais indicam que modelos de otimização podem melhorar substancialmente os parâmetros de iluminação das luminárias, possibilitando o projeto de instalações mais eficientes. Os modelos de otimização da distribuição da iluminação por luminárias nos túneis permitem a incorporação das características das propriedades reflexivas da superfície da estrada na obtenção da distribuição da luz com maior eficiência energética e não precisam se preocupar com o posicionamento das luminárias, uma vez que a mesma pode ser colocada em qualquer lugar do teto do túnel.

Castro, Acebo e Sbert (2012) trabalharam com AE baseado em variações do algoritmo genético A Fast Elitist Multiobjective Genetic Algorithm (NSGA-II) para projetar a iluminação no interior de residências, com restrições geométricas suaves (obstáculos). Seu objetivo é minimizar o consumo energético de um ambiente interno adotando restrições geométricas suaves (obstáculos), em que objetos distintos possuem diferentes metas de iluminação. São estudados vários algoritmos de otimização, dentre eles o Algoritmo Genético. A iluminação desejada é expressa a partir de valores mínimos e máximos. Para

minimizar o alto custo computacional desse tipo de otimização, foi utilizado um método de pré-cálculo de iluminações pré-estabelecidas. O sistema permite que o usuário determine a obrigatoriedade de certos pontos de iluminação. Para ambientes mais complexos, o algoritmo genético e a otimização por enxame de partículas foram os que obtiveram melhores resultados. O resultado entregue ao usuário é a localização onde ele deve instalar os conjuntos de iluminação.

Brownlee e Wright (2015) apresentaram um AE baseado em variações do algoritmo genético NSGA-II que tem como objetivo projetar pavimentos de edifícios, a fim de reduzir a demanda de energia utilizada para o aquecimento, arrefecimento e iluminação, de forma a maximizar o conforto dos ocupantes. Neste trabalho, a iluminação é apenas um dos aspectos a serem considerados.

(CARLUCCI et al., 2015) usa AE para auxiliar no projeto de edifícios que consigam cumprir as normas europeias com vigência prevista a partir do final de 2018. Novamente, a iluminação é apenas um dos aspectos a serem considerados. O trabalho afirma que a otimização tem sido utilizada principalmente na melhoria do desempenho energético dos edifícios, dando um desempenho secundário para o conforto térmico e, geralmente, ignorando o conforto visual e a qualidade do ar. É utilizado o algoritmo NSGA-II com quatro funções objetivo : desconforto térmico durante o inverno, desconforto térmico durante o verão, desconforto visual devido ao brilho e quantidade inadequada da luz do dia.

2.2 Considerações finais do capítulo

Considerando relações com outros trabalhos de projetos automatizados de iluminação, temos que o trabalho de Pachamanov e Pachamanova (2008) pode ser diferenciado do presente, pois trata exclusivamente da iluminação de túneis, onde não existe áreas proibidas a fixação de luminárias.

Os trabalhos de Brownlee e Wright (2015) e de Carlucci et al. (2015) não possuem foco em iluminação, sendo esse item considerado apenas como mais uma parcela do consumo energético.

Por fim, o trabalho do Castro, Acebo e Sbert (2012) aparece como o mais próximo da presente tese. Ambos utilizam domínios discretos para posicionamento de pontos de luz. As diferenças residem, principalmente, na natureza dos projetos. Castro trabalha com iluminação interna, e suas especificidades, utilizando luminárias simples. A presente tese trabalha com iluminação externa, restrições geométricas de instalação e luminárias complexas comercialmente disponíveis. Além disso, o presente ainda incorpora soluções de paralelização e AE de tamanho variável.

Dentro desse cenário, o presente trabalho é o primeiro a usar técnicas de AE para automatizar projetos de iluminação exterior por computador respeitando tanto restrições

rígidas (não posicionamento de fontes luminosas em áreas proibidas e áreas com formato irregular) quanto normas aplicáveis diretamente relacionadas. As implicações desta tese vêm ao encontro dos esforços por parte de toda a sociedade na busca por soluções de iluminação mais econômicas, sustentáveis e de melhor qualidade.

CAPÍTULO 3

Referencial teórico

Este capítulo apresenta os conceitos teóricos de iluminação, padrões e métricas das normas, algoritmos genéticos e programação paralela remota. Os temas aqui apresentados nos dão suporte ao bom entendimento da tese.

3.1 Iluminação

O Fluxo luminoso é a energia radiante luminosa instantânea, emitida por uma fonte primária entre as frequências de 380 a 780 nanômetros (nm). A unidade internacional de medida (SI) que se utiliza é o Lúmen (lm). Apesar de o fluxo luminoso exprimir a potência de uma fonte de luz, ele não indica como esta se distribui em todas as direções. Assim, duas fontes luminosas podem ter igual potência e, no entanto, uma delas, numa dada direção, emitir muito mais energia que a outra. Para caracterizar esse fenômeno é necessário distinguir, além da potência, a intensidade luminosa da fonte (I), que é a parte do fluxo luminoso de uma fonte emitida numa determinada direção definida pelo ângulo espacial expresso em esferoradiano. A unidade internacional utilizada (SI) é Candela (cd), ou seja, lúmen por unidade de esferoradiano, em que esferoradiano, é a unidade de medida padrão no Sistema Internacional de Unidades para quantificar ângulos sólidos. Equivale ao ângulo sólido formado por um cone tal que a área da esfera de raio unitário interna ao cone tenha o valor de um metro quadrado (IESNA, 2000), conforme mostrado na Figura 1.

O fluxo que incide numa determinada superfície expressa em m^2 na unidade internacional de medida (SI) é o Lux (lx), que equivale a um lúmen por metro quadrado.

3.1.1 Pontos básicos de um projeto de iluminação

Um bom projeto luminotécnico tem o objetivo de fazer com que os nossos ambientes tenham o melhor conforto luminoso com o menor custo possível.

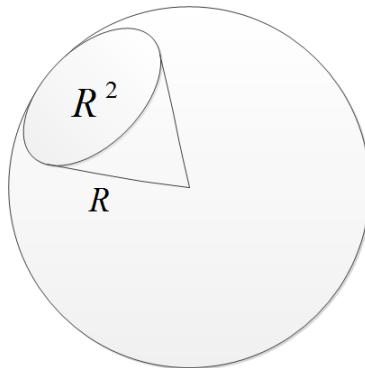


Figura 1 – Representação gráfica de um esferorradiano (IESNA, 2000).

Segundo a OSRAM (2013), quanto menor for o esforço de adaptação do indivíduo, maior será sua sensação de conforto. Do ponto de vista fisiológico, para desenvolvemos determinadas atividades visuais, nosso olho necessita de condições específicas e que dependem muito das atividades que o usuário realiza. Por exemplo: para ler e escrever, é necessária certa quantidade de luz no plano de trabalho; para desenhar ou desenvolver atividades visuais de maior acuidade visual, necessita-se de mais luz. Mas quantidade de luz não é o único requisito necessário. Para essas atividades, a boa distribuição de luz no ambiente e a ausência de contrastes excessivos também são fatores essenciais, diminuindo o esforço físico que o olho terá de fazer para se adaptar às condições ambientais e desenvolver bem a atividade em questão.

Ao determinar o ambiente a ser iluminado, definimos o tipo de luz que se deseja, dando subsídios para a escolha das lâmpadas. Serão utilizadas luminárias que projetam a luz da forma desejada. É calculada a quantidade de luz para o local buscando a excelência na ambientação luminosa (SILVA, 2009).

Segundo Silva (2009), quando pensamos em iluminar um ambiente, devemos construir nosso planejamento valendo-se de algumas ideias básicas para elaborar o projeto, são elas:

- Quais lâmpadas devemos utilizar;
- Alturas de montagem da fonte de luz;
- Quais luminárias são mais adequadas;
- Qual a quantidade de luz de que necessitamos;
- Qual a posição de instalação das luminárias.

3.1.1.1 Alturas de montagem da fonte de luz

A altura de montagem das luminárias nos ajuda a balancear a iluminação, uma vez que para alturas menores temos maior intensidade luminosa em menor área de abrangência. Já quando se aumenta a altura de montagem das luminárias, diminuímos a intensidade luminosa espalhando mais luz em maior área de atuação (IESNA, 2000).

3.1.1.2 Curvas fotométricas das luminárias

Para obter um melhor projeto de iluminação, é necessário conhecer as curvas fotométricas da luminária a ser utilizada. A distribuição apropriada das intensidades luminosas é um dos fatores essenciais para uma boa iluminação. Ela é a representação da Intensidade Luminosa em todos os ângulos conforme Figura 2.

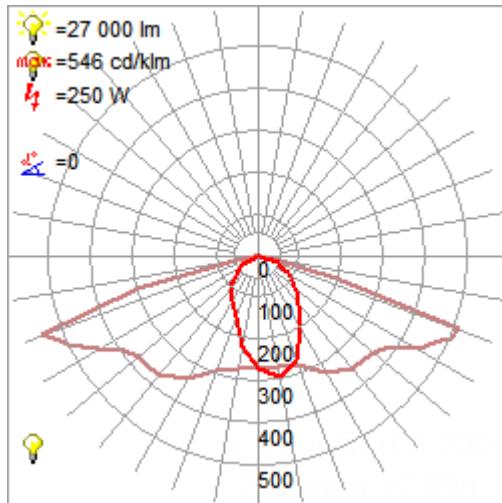


Figura 2 – Curva IES da Luminária BETAN fabricada pela Tecnowatt montada a 0º com no máximo 546cd por mil lumens. Imagem gerada pelo Software... (2012).

3.1.2 Métodos de cálculos luminotécnicos

Para a elaboração de projetos luminotécnicos, é importante a utilização de algum método de cálculo para a definição da quantidade de lâmpadas, as alturas de fixação das luminárias e demais equipamentos necessários para que determinado ambiente tenha a iluminação adequada.

Os métodos de cálculo normalmente utilizados são o método dos fluxos e o ponto a ponto, este se baseia na lei de Lambert que define que a iluminância é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o ponto iluminado e a fonte luminosa (-IESNA, 2000).

3.1.2.1 Método dos fluxos

O método dos fluxos considera a quantidade total de fluxo luminoso necessário para determinado ambiente, no Brasil é utilizada a norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013 a qual especifica, de acordo com a atividade desenvolvida no local, a iluminância que determinado ambiente interno deve ter. Também é considerada a refletância das superfícies (teto, parede e piso) e os tipos de equipamentos (Luminárias, lâmpadas e reatores) escolhidos. Esse método considera a distribuição da iluminação uniforme em ambien-

tes retangulares com superfícies de reflexão difusa, utilizando apenas um único tipo de luminária e lâmpada.

Cálculo do índice do local (K)

Dadas as dimensões, na iluminação direta, calcula-se o K , conforme mostrado na Figura ??, pela fórmula 1.

$$K = \frac{C \times L}{h \times (C + L)} \quad (1)$$

onde

C : Comprimento do ambiente;

L : Largura do ambiente;

h : Distância da luminária ao plano de trabalho (plano alvo);

H : Altura do pé direito.

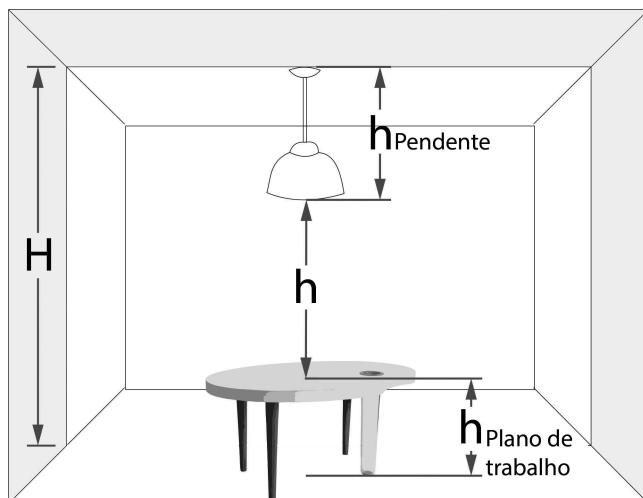


Figura 3 – Definição das alturas para o cálculo de K (OSRAM, 2013).

Definição do material a ser utilizado

A escolha dos equipamentos a serem utilizados deve priorizar o alto desempenho energético e o atendimento às características de uso do ambiente.

Determinação do fator de Utilização (U)

O Fator de utilização (U) das luminárias é a razão entre o fluxo utilizado e o fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas. Para a determinação do U, para valores não contemplados pela tabela 1 é recomendado que se faça a interpolação dos dados.

Tabela 1 – Fator de utilização (OSRAM, 2013).

Fator de Utilização						
Teto(%)	70	50	30	0		
Parede(%)	50	30	10	50	30	10
Piso(%)	10		10	10		0
K	Fator de Utilização (%)					
0.6	34	29	26	33	29	26
0.8	40	36	33	39	35	32
1.00	45	41	38	44	41	38
1.25	50	46	43	49	45	43
1.5	53	50	47	52	49	46
2.0	58	55	52	56	54	52
2.5	60	58	56	59	57	55
3.0	62	60	58	61	59	58
4.0	64	63	61	63	62	60
5.0	66	64	63	64	63	62
				29	26	25
				35	32	31
				40	38	36
				45	42	41
				48	46	45
				53	51	50
				56	55	53
				58	57	55
				61	59	58
				63	62	60
				64	63	62
				66	64	63
				26	25	
				32	31	
				38	36	
				42	41	
				46	45	
				51	50	
				55	53	
				57	55	
				59	58	
				62	60	
				63	61	
				64	63	
				66	64	

Tabela 2 – Fator de manutenção (OSRAM, 2013).

Fatores de Manutenção recomendados			
Limpo	2.500 Horas	5.000 Horas	7.500 Horas
Limpo	0,95	0,91	0,88
Normal	0,91	0,85	0,80
Sujo	0,80	0,66	0,57

Determinar o fator de manutenção

A iluminação diminui progressivamente durante o uso do sistema de iluminação devido às depreciações por acúmulo de poeira nas lâmpadas e luminárias, pelo desgaste dos materiais da luminária e das refletâncias das paredes e devido ao decréscimo do fluxo luminoso das lâmpadas. O dimensionamento dos sistemas de iluminação deve considerar um Fator de manutenção (FM) ou fator de perdas luminosas em função do tipo de ambiente e da atividade desenvolvida, do tipo de luminária e da lâmpada utilizada e da frequência de manutenção dos sistemas.

A Tabela 2 sugere valores de fatores de manutenção conforme período de manutenção e as condições do ambiente(OSRAM, 2013).

Para reduzir a depreciação de luminária, deve-se adotar manutenção periódica dos sistemas: limpeza de lâmpadas e de luminárias e substituição programada de lâmpadas.

Fator de fluxo do reator

Todas as lâmpadas de descarga operam em conjunto com reatores, e o fluxo luminoso total obtido depende do desempenho do reator. O seu valor é obtido pela divisão do fluxo luminoso obtido pelo fluxo luminoso nominal. Os reatores normalmente apresentam valores de fluxo entre 0.9 e 1.1 (OSRAM, 2013).

Dimensionamento

O cálculo do número de luminárias necessárias para determinado ambiente obedece à equação 2.

$$N = \frac{E_{Med} \times A}{n \times \phi_n \times U \times FM \times FFL} \quad (2)$$

Em que:

N : número necessário de luminárias

E_{Med} : iluminância média (lux)

A : área do ambiente(m^2)

n : número de lâmpadas de cada luminária

ϕ_n : fluxo luminoso de cada lâmpada

U : fator de utilização

FM : fator de manutenção

FFL : fator de fluxo do reator

Distribuição das luminárias

Definida a quantidade total de luminárias necessárias para atender aos níveis de iluminância e às condições requeridas de projeto, a distribuição das luminárias deve buscar distribuição uniforme na área de trabalho, conforme mostrado na Figura ??, e seguindo os seguintes passos :

- Procurar obter valores próximos a a e b , sendo $a > b$, desde que respeitando a curva de distribuição luminosa da luminária;
- Recomenda-se que as distâncias a e b entre luminárias sejam o dobro da distância entre estas e as paredes laterais;
- Recomenda-se sempre o acréscimo de luminárias quando a quantidade resultante do cálculo não for compatível com a distribuição desejada.

O método dos fluxos tem uma grande utilização em ambientes retangulares onde não existem restrições ao posicionamento das lâmpadas. Para o caso em que não se consegue utilizar o método dos fluxos devido às diversas restrições que esse método possui, o método de iluminação indicado é o ponto a ponto (IESNA, 2000).

3.1.3 Método ponto a ponto

O método de cálculo ponto a ponto (um tipo de método de iluminação direcionada) é o método mais utilizado para calcular a iluminação em projetos de iluminação externa,

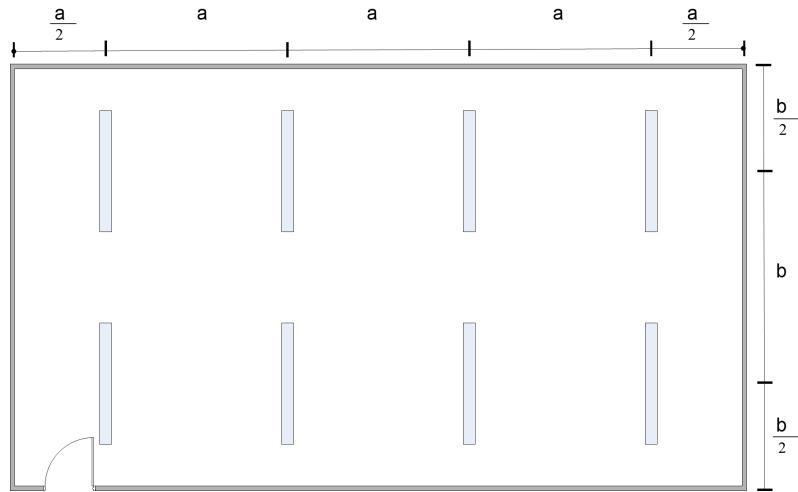


Figura 4 – Recomendação quando à distribuição de luminárias (OSRAM, 2013).

devido à suposta ausência de artefatos maiores (como paredes ou tetos) responsáveis por refletir a luz. Esse método também é recomendado pela Sociedade de Engenheiros de Iluminação América do Norte (IESNA). Ao aplicá-lo, o projetista pode obter a luminosidade fornecida por uma ou mais fontes de luz, em qualquer ponto desejado a partir de uma malha no plano de trabalho. Uma fonte de luz é definida por uma dada luminária que pode ser entendida como uma unidade de iluminação completa constituída por uma ou mais lâmpadas que estão ligados a uma fonte de energia e um dado refletor destinado a orientar e distribuir a luz. Este trabalho utiliza esse método para calcular a iluminação.

Parte do fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas é absorvida pela luminária e não contribui para a iluminação do ambiente. O saldo do fluxo é gasto acima e abaixo de um plano horizontal que passa pelo centro da luminária. Para cada luminária, os dados fotométricos utilizados para o cálculo da iluminância são obtidos por seus respectivos arquivos IES (um protocolo internacional padrão da Sociedade de Engenharia de Iluminação a fim de descrever arquivos de computador dados fotométricos), que são utilizados em muitos sistemas de *software* existentes. A iluminação total dada pela adição das contribuições de cada fonte de luz é representada pela Equação (3):

$$E_{total} = \sum_{i=1}^N E_i \quad (3)$$

onde E_i é o componente de iluminância da fonte de i ; e N é o número de fontes de luz.

A iluminância E_i , realizada por cada fonte de luz, individualmente, é dada pela equação (4), que relacionou as grandezas apresentados na Figura 5:

$$E_i = \frac{I_{P_i} \cdot \cos\gamma}{d^2} \quad (4)$$

onde I_{P_i} é a intensidade da fonte de luz i para o ponto P ; γ é o ângulo entre a normal ao plano de trabalho e o segmento entre o ponto considerado P e a à fonte de luz; e d é

a distância euclidiana entre a fonte de luz e o ponto P .

No que diz respeito a Figura 5, \vec{N} é a normal ao plano; γ_i é o ângulo entre \vec{N} e o segmento \overline{LP}_i ; h é a altura de fixação da luminária; l_i é a distância horizontal entre a fonte de luz (representada pelo ponto L) e o ponto de interesse P_i ; d_i é a distância euclidiana entre a fonte de luz e o ponto P_i ; $i = 1, 2, \dots, n$; em que n é o número de pontos de interesse sobre a malha do plano de trabalho(espaço discretizado), que constitui a área a ser iluminada.

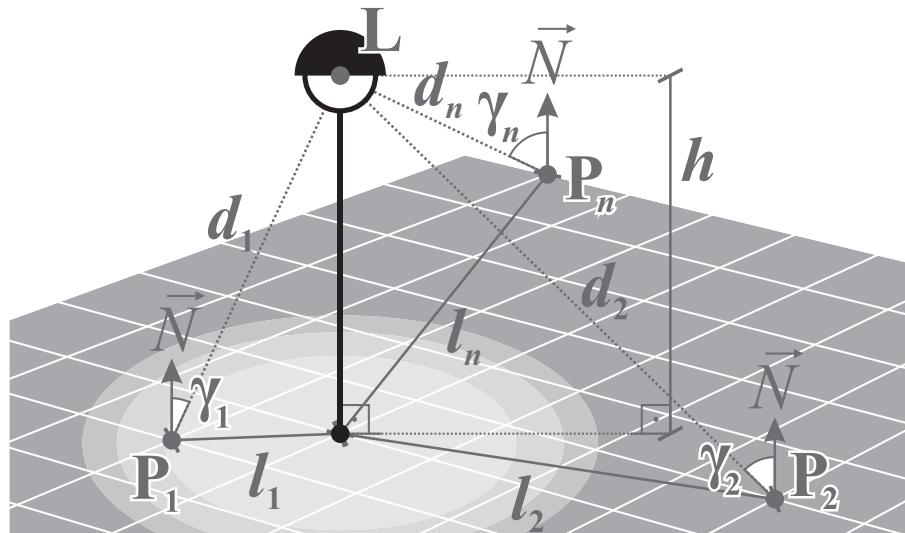


Figura 5 – Orientação para quantidades geométricas (IESNA, 2000).

A intensidade do fluxo emitido por uma fonte de luz em um determinado sentido é dada pela distribuição fotométrica da fonte de luz e varia para cada tipo de luminária (e a respectiva lâmpada) utilizada. O uso de curvas digitalizadas a partir de dados fotométricos nos arquivos padrão (IES) permitem o cálculo das intensidades de luz automaticamente, simplificando a implementação em computadores.

O método de ponto a ponto precisa de uma configuração inicial da instalação da iluminação (fontes de luz identificadas com as respectivas posições no plano horizontal, a altura dos postes e as luminárias) para fornecer valores de iluminância para cada ponto de interesse na malha. Isso pode ser realizado apenas no plano de trabalho (2D) ou em vários planos paralelos entre as fontes de luz e o plano de trabalho (3D).

3.2 Padrões e métricas de normas

O principal objetivo dos padrões dirigidos a projetos de iluminação é definir as necessidades de iluminação necessárias para garantir um nível mínimo aceitável, respeitando a segurança e o conforto dos usuários nos ambientes de iluminação artificial. Este trabalho propõe que os projetos gerados pelo sistema ELCAutoD-EA devam estar de acordo com as principais normas internacionais da área.

A sociedade de engenheiros de iluminação da América do Norte (IESNA) tem várias publicações sobre o tema, sendo uma importante referência na ciência da iluminação e suas aplicações(IESNA, 2000). Conceitos abordados no manual de referência *Lighting Handbook Reference & Application* foram amplamente utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

Outra referência importante, neste campo, são os padrões europeus a partir dos quais nos dirigimos para a versão atual do espanhol (REGULAMENTO..., 2008). Essas normas têm o objetivo de estabelecer condições técnicas para a concepção, execução e manutenção de instalações de iluminação exterior. Eles também estão preocupados, entre outras questões, com a melhoria da eficiência energética, bem como a limitação da poluição luminosa e redução da luz intrusiva ou irritante.

A ABNT NBR 5101 (ABNT, 2012), que rege sobre as instalações de iluminação pública no Brasil, fixa alguns requisitos considerados como o mínimo necessário para iluminar vias públicas destinadas ao tráfego de pedestres e veículos.

Um projeto de iluminação, para ser considerado bom, deve ter o compromisso entre a qualidade da iluminação e a eficiência energética fornecida pela instalação desejada. Para esse efeito, o presente trabalho separa os dois conceitos que podem ser utilizados para comparar os desempenhos de diferentes projetos de iluminação: a uniformidade da iluminação (global e geral) e a taxa de eficiência de energia.

3.2.1 Iluminação uniforme

A uniformidade da iluminação é uma quantidade calculada que pretende representar a qualidade da distribuição da iluminação em um dado domínio. É desejado um bom nível de uniformidade para evitar zonas de sombras fortes e garantir o conforto e segurança para as práticas que serão desenvolvidas na área a ser iluminada.

Essa uniformidade pode ser alcançada a partir dos índices de valores mínimos, máximos e de iluminação média calculada sobre a respectiva malha do plano de trabalho da área de interesse. A literatura mostra algumas maneiras diferentes para calcular essa medida. A mais utilizado é conhecida como uniformidade global U_0 (IESNA, 2000; ABNT, 2012; RABAZA et al., 2013), que é obtida pela divisão do valor da mínima pela média dos valores da iluminância e é apresentado na Equação (5). A outra é a uniformidade geral (ou extrema) U_g , que é a divisão do valor mínimo pelo máximo dos valores de iluminância (REGULAMENTO..., 2008) apresentada na equação (6). Note-se que (IESNA, 2000) também menciona a possibilidade de calcular o inverso da uniformidade geral (divisão do valor máximo pelo mínimo).

$$U_0 = \frac{E_{min}}{E_{av}} \quad (5)$$

$$U_g = \frac{E_{min}}{E_{max}} \quad (6)$$

em que E_{min} é o valor mínimo calculado para a iluminação no plano de trabalho da malha; E_{av} é a média dos valores de iluminação; e E_{max} é o máximo dos valores da iluminação.

Para espaços públicos exteriores, as normas recomendam uma média de $30lx$. Maiores níveis de iluminação podem ser desejáveis quando a área em questão pode ser utilizada para tarefas visuais que requerem uma maior percepção de detalhes. Além disso, a variação dos níveis de iluminação não devem ser superiores do que $1/3$ da média ideal, para mais ou menos (IESNA, 2000).

Por exemplo, a Comissão Internacional de Iluminação (CIE) (EUROPEAN COMMISSION., 2013) afirma que um projeto de iluminação exterior deve ter uma iluminação mínima média de $20lx$ e uma uniformidade mínima global de 0,4 (para algumas finalidades o valor poderia ser de 0,35). A ABNT também coloca estes valores como mínimos.

3.2.2 Classes de eficiência energética

A eficiência energética (ε) de uma instalação de iluminação pode ser calculada pela equação (7):

$$\varepsilon = \frac{A \times E_{av}}{Pow} \quad (7)$$

onde A é a área da superfície a ser iluminada [m^2]; E_{av} é a iluminância média [lx]; e Pow é o total de energia elétrica instalada [W].

A avaliação da eficiência energética (I_ε) de uma instalação de iluminação é então definida como a razão entre a sua eficiência energética por um valor de eficiência energética de referência (ε_R) com respeito à iluminação média obtida pela concepção da iluminação, como mostrado na Equação (8). Este valor de referência pode ser obtido a partir de (REGULAMENTO..., 2008, ea-01, table 3).

$$I_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_R} \quad (8)$$

Para simplificar a interpretação dos dados do índice de eficiência energética, um sistema de classificação foi desenvolvido. As normas espanholas (REGULAMENTO..., 2008) apresentam um sistema de rotulagem do consumo de energia alinhado com os rótulos de classificação projetado em primeiro lugar para os eletrodomésticos. É definida uma escala de sete níveis, começando com a classe A (uma instalação mais eficiente com um consumo de energia mais baixo) até classe G (uma instalação menos eficiente, com um maior consumo de energia). O índice de consumo de energia (ice) usado como um

Tabela 3 – *Etiqueta de eficiência energética para uma instalação de iluminação (REGULAMENTO..., 2008).*

Energy class	Energy Consumption Index
A	$ECI < 0.91$
B	$0.91 \leq ECI < 1.09$
C	$1.09 \leq ECI < 1.35$
D	$1.35 \leq ECI < 1.79$
E	$1.79 \leq ECI < 2.63$
F	$2.63 \leq ECI < 5.00$
G	$ECI \geq 5.00$

mecanismo para localizar a que classe uma determinada instalação pertence é igual ao inverso do índice de eficiência de energia, como pode ser visto na equação (9)..

$$ECI = \frac{1}{I_\varepsilon} \quad (9)$$

Após o cálculo do ICE para um determinado projeto de iluminação, a tabela 3 fornece sua classe energética.

3.3 Algoritmos genéticos

O núcleo do sistema proposto é um algoritmo evolutivo baseado em algoritmos genéticos (AG) a partir de (HOLLAND, 1975) e (GOLDBERG, 1989). Um algoritmo genético, para solução de problemas de otimização, utiliza técnicas inspiradas na evolução natural Darwiniana, como mutações, seleção e cruzamentos que ocorrem em uma população de indivíduos. Dentro de uma população AG, cada indivíduo representa um candidato para a solução do problema investigado (GOLDBERG, 1989). Na estrutura do AG, a população inicial começa com os indivíduos sendo escolhidos aleatoriamente, e por meio de operadores genéticos, a cada nova geração, os indivíduos evoluem para soluções e se espera uma maior aptidão (ou soluções de melhor qualidade). O algoritmo termina quando atingir um determinado critério de parada (por exemplo, um número máximo de gerações).

Os AE são heurísticas que não asseguram a obtenção do melhor resultado possível em todas as execuções. Eles encontram boas soluções, mas não necessariamente a melhor ou a mesma todas as vezes. É a competição entre os indivíduos que determina as soluções obtidas pelo processo de sobrevivência do mais apto, em que os melhores indivíduos tendem a sobreviver (MITCHELL, 1996).

Os AG são recomendados quando não houver um algoritmo exato para resolver o problema ou quando o tempo computacional for muito grande para que o processo exato consiga ser realizado com sucesso. Eles não são processos puramente estocásticos, mas sim uma busca direcionada no espaço de soluções (FOGEL, 2005). Um dos grandes problemas dos AG é a convergência prematura, que corresponde a convergência precoce da população que, inicialmente, foi gerada de forma aleatória em uma população com baixa diversidade genética possuindo genes similares. Quando uma população tem baixa diversidade genética, ela só consegue evoluir por mutações aleatórias(GOLDBERG, 1989).

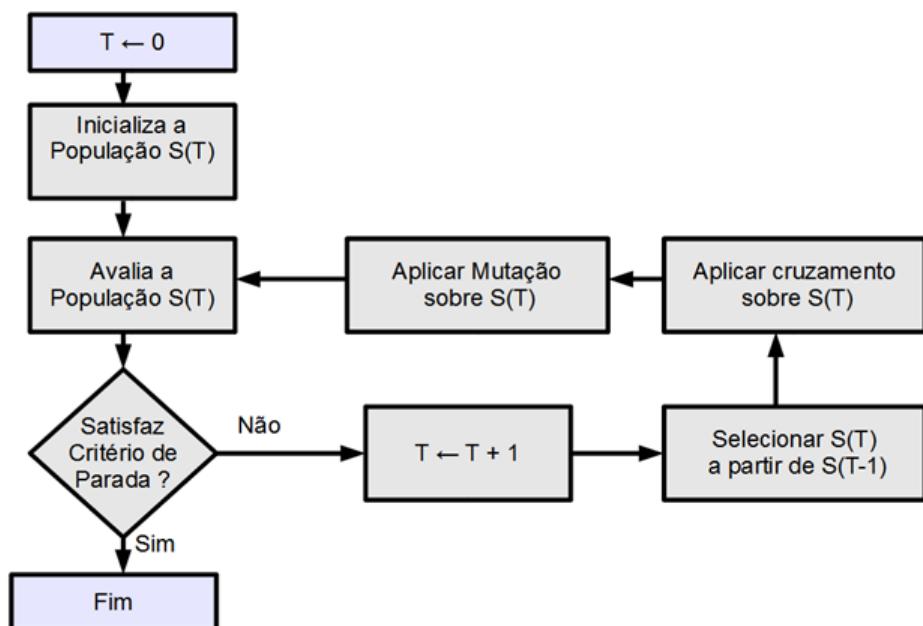


Figura 6 – Algoritmo dos AG típicos (MITCHELL, 1996).

Na fase inicial, é gerada uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos que representam possíveis soluções do problema. Depois, durante o processo evolutivo, essa população é avaliada: para cada indivíduo é dado um valor refletindo sua habilidade de resolução do problema. Esse valor é utilizado pelo processo de seleção dos indivíduos que serão mantidos. Os indivíduos mantidos podem sofrer modificações a partir de mutações e do processo de reprodução por meio do cruzamento (*crossover*), quando a recombinação genética gera descendentes para a próxima geração. Os processos de seleção, mutação e reprodução são repetidos até que uma solução satisfatória seja encontrada, sendo que deverá ser decodificada para ser utilizada na prática (MITCHELL, 1996). O esquema de um AG é mostrado na Figura 6.

A codificação do cromossomo e a função de avaliação são os pontos principais para a construção de um AG eficiente. Em problema de otimização, cada solução do problema deve ser representada na forma de uma estrutura de dados. A função de avaliação julga a qualidade da solução que está sendo apresentada por um cromossomo, sem armazenar qualquer tipo de informação sobre as técnicas de resolução do problema. Em seguida,

devem ser definidos os operadores genéticos de seleção, cruzamento, mutação e estratégias de elitismo. A codificação do cromossomo, a função de avaliação e os demais operadores devem ser escolhidos de acordo com as características intrínsecas do problema. Antes de aplicar o algoritmo genético para a solução de problema de otimização, vários parâmetros devem ser especificados, tais como tamanho da população, probabilidade de cruzamento, probabilidade de mutação, dentre outros (MICHALEWICZ, 1996).

Quando utilizados no contexto da otimização, os AG apresentam algumas diferenças em relação às técnicas clássicas de programação matemática (GOLDBERG, 1989):

- ❑ Trabalham com uma codificação para as soluções potenciais;
- ❑ Não necessitam de informações adicionais, como derivadas sobre a função objetivo. Ela pode possuir simultaneamente variáveis reais, lógicas e inteiras, ser não convexa e não diferencável;
- ❑ A busca é diversificada, pois empregam-se técnicas de transição probabilísticas sobre um conjunto de soluções;
- ❑ Tem menor probabilidade de apresentar como solução um ponto ótimo local, sendo mais adequadas para trabalhar com problemas multimodais;
- ❑ A função objetivo tem grande flexibilidade, apresentando bom desempenho para grande escala de problemas reais.

3.3.1 Representação de um cromossomo

Uma boa representação do cromossomo é de fundamental importância para o sucesso do algoritmo genético. Ela consiste em traduzir a informação do problema de maneira viável a ser trabalhada pelo computador. Quanto mais aderente ao problema, maior a qualidade dos resultados obtidos. A representação do cromossomo deve ser o mais simples possível sem deixar de considerar as restrições e condições impostas pelo problema (LINDEN, 2012).

A representação do cromossomo como vetor de números binários de tamanho fixo, torna a implementação simples e rápida, mas existem casos em que este modelo não é o mais natural e nem o mais apropriado. Nesses casos, são indicados outros tipos de representação do cromossomo.

3.3.2 Geração da população inicial

A inicialização da população, geralmente, é feita por meio de escolha aleatória independente para cada indivíduo da população. De modo geral, deve-se garantir a diversidade dos indivíduos, garantindo que os indivíduos estejam uniformemente distribuídos por todo

o espaço de busca. O tamanho da população indica o número de indivíduos em cada população e, em geral, permanece constante durante a evolução e deve garantir boa diversidade de soluções. A população não pode ser muito grande, pois influencia diretamente no custo computacional devido ao número de avaliações de aptidão dos indivíduos (GOLDBERG, 1989). Segundo Linden (2012), apesar do tamanho da população ser importante, não tem uma relação com a melhora do desempenho dos AG.

3.3.3 Avaliação da população

A avaliação de um determinado indivíduo se dá utilizando a função de aptidão, que é a função que parametriza a qualidade da solução potencial que esse indivíduo representa. Ela só julga a qualidade da solução que está sendo apresentada por aquele indivíduo, sem armazenar qualquer tipo de informação sobre as técnicas de resolução do problema. A escolha da função de aptidão é, na maioria das aplicações, uma etapa crítica do processo. A função de aptidão e a codificação do indivíduo possuem relação direta com o domínio do problema (GOLDBERG, 1989).

3.3.4 Métodos de seleção

O método de seleção de pais deve simular a seleção natural que atua sobre as espécies biológicas, os pais mais aptos geram mais filhos que os demais. Os AG devem ser capazes de identificar os indivíduos mais aptos para que esses tenham uma maior probabilidade de permanecer na população durante o processo de evolução (LINDEN, 2012).

3.3.4.1 Seleção proporcional ou método da roleta

A implementação desse método é realizada a partir de um mecanismo de roleta pelo qual se divide em N partes, onde N corresponde ao número de indivíduos da população. O tamanho de cada uma das partes é proporcional ao valor da aptidão do indivíduo. A roleta é então girada N vezes, e a cada uma delas o indivíduo indicado pelo ponteiro é selecionado e inserido na nova população (MITCHELL, 1996).

3.3.4.2 Seleção por *Ranking*

A seleção por *ranking* é dividida em duas etapas. Na primeira, as soluções são ordenadas de acordo com seus valores da função de avaliação, em ordem crescente se o propósito for maximizar a função de avaliação, ou em ordem decrescente caso o objetivo seja minimizá-la. Estando a lista ordenada, a cada indivíduo é atribuído um novo valor da função de avaliação equivalente à sua posição no *ranking*. Na segunda fase, um procedimento similar à seleção proporcional é aplicado. Quanto melhor a posição do indivíduo no *ranking*, maior sua chance de ser selecionado. Esse tipo de seleção é uma derivação da

seleção proporcional que inibe que indivíduos com altos valores de aptidão forcem uma rápida convergência genética (MITCHELL, 1996).

3.3.4.3 Seleção por Torneio

Esse tipo de seleção promove um torneio entre um grupo de N indivíduos selecionados aleatoriamente a partir da população atual, em que N é maior que 2. Assim, o indivíduo com o maior valor de aptidão no grupo é selecionado (MITCHELL, 1996).

3.3.4.4 Elitismo

A utilização de métodos de seleção com o elitismo preserva as melhores soluções encontradas na geração atual para a próxima geração. Uma quantidade N dos melhores indivíduos da população atual é copiada para a nova geração, os outros são gerados normalmente a partir do método de seleção escolhido (LINDEN, 2012).

3.3.5 Operadores genéticos

Os operadores genéticos são responsáveis pela evolução da população através das gerações. Os AG básicos têm dois operadores genéticos: cruzamento e mutação.

3.3.5.1 Operador Cruzamento

O cruzamento realiza a construção de novos indivíduos derivados da troca de material genético de dois indivíduos selecionados, conforme Figura 7 ,combinando informações de maneira que exista uma probabilidade razoável de que os novos indivíduos produzidos sejam melhores que seus pais. O operador de cruzamento é o responsável pela busca direcionada que é uma das características dos AG(GOLDBERG, 1989).

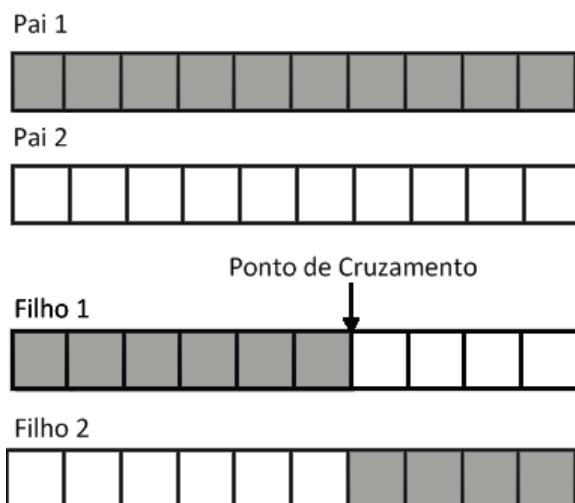


Figura 7 – Operador cruzamento (GOLDBERG, 1989).

3.3.5.2 Operador Mutação

A mutação é efetuada alterando o valor de um determinado gene de um indivíduo selecionado com determinada probabilidade, conforme Figura 8, denominada probabilidade de mutação, ou seja, vários indivíduos da nova população podem ter um ou mais genes alterados aleatoriamente, prevenindo que a população se torne saturada com indivíduos similares. A operação de mutação aumenta a diversidade da população fazendo com que haja maior varredura do espaço de busca. Ela é aplicada em geral com probabilidade baixa, pois caso contrário o AG tende a se comportar como um algoritmo de busca aleatória (GOLDBERG, 1989).

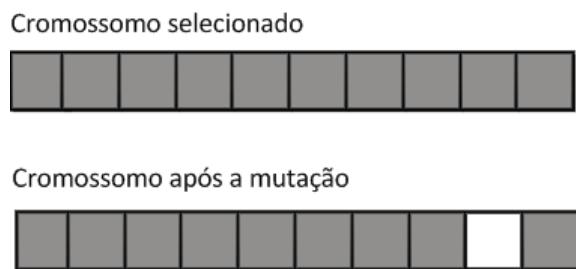


Figura 8 – *Operador Mutação (GOLDBERG, 1989)*.

3.3.6 Parâmetros dos algoritmos genéticos

Os parâmetros dos AG são grandezas que influenciam muito no desempenho dos mesmos. Os mais utilizados são: tamanho da população, o número de gerações, a probabilidade de cruzamento e a mutação. O número de parâmetros em um AG não é fixo, dependendo das escolhas específicas de um dado projeto. No caso de a escolha do método de seleção ser o torneio é necessário informar também qual a quantidade ou percentagem de indivíduos que vão participar de cada torneio. Se a escolha for pelo método da roleta, não há a necessidade de se adicionar outro parâmetro (MICHALEWICZ, 1996).

3.3.6.1 Tamanho da população

O tamanho da população indica o número de indivíduos (cromossomos) em cada população e normalmente se mantém constante durante a evolução.

3.3.6.2 Número de gerações

Indica a quantidade de novas populações (novas gerações) que será gerada até que o algoritmo genético termine a execução.

3.3.6.3 Probabilidade de cruzamento

A probabilidade de cruzamento é uma grandeza percentual do número de indivíduos que realizam o cruzamento em relação ao número total de indivíduos escolhidos no processo de seleção.

3.3.6.4 Probabilidade de mutação

A probabilidade de mutação indica a quantidade de mutação em relação ao número total de indivíduos escolhidos no processo de seleção.

3.3.7 Algoritmos genéticos paralelos

Os Algoritmos Genéticos Paralelos (AGPs) são classificados em 3 tipos básicos, sendo eles o modelo mestre escravo, o modelo granularidade fina também conhecido como modelo celular e o modelo granularidade grossa ou modelo de ilhas (LUQUE; ALBA, 2011). Além desses, existem modelos híbridos que são combinações desses modelos.

3.3.7.1 Modelo Mestre Escravo

O modelo Mestre Escravo (CHIPPERFIELD; FLEMING, 1996) apresentado na Figura 9 possui uma população única e global fornecendo a forma mais simples de paralelismo (SHENFIELD; FLEMING, 2014). Ela é controlada pelo processo mestre que a distribui para os escravos apenas a função de avaliar a aptidão dos indivíduos em paralelo. É muito comum essa implementação paralela de AGs por ser de fácil execução, pois a aptidão de um indivíduo não depende do restante da população. A comunicação ocorre somente nos momentos em que a população é enviada aos escravos e no retorno dos valores das aptidões calculadas ao mestre. Esse modelo é muito utilizado quando a função de avaliação da aptidão tem alto custo computacional, tornando o tempo de comunicação entre mestre e escravos insignificante quando comparado com o tempo gasto na avaliação da aptidão (LUQUE; ALBA, 2011). Embora esse tipo de estratégia não explore todo o paralelismo inerente ao algoritmo evolucionário, melhorias substanciais no desempenho podem ser alcançadas.

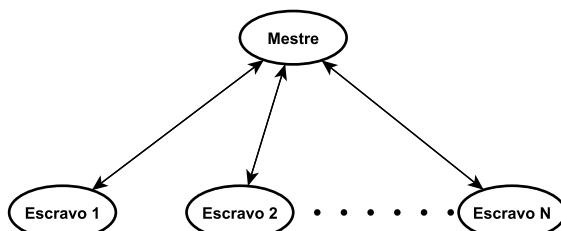


Figura 9 – Paradigma de comunicação mestre escravo (CHIPPERFIELD; FLEMING, 1996).

3.3.7.2 Modelo de granularidade fina

O modelo de granularidade fina (LUQUE; ALBA, 2011) apresentado na Figura 10, possui população única e, espacialmente, estruturada formando um reticulado retangular de duas dimensões, em que existe um indivíduo por ponto do reticulado. Cada indivíduo está vinculado a um processador e a avaliação da aptidão dos indivíduos pode ser executada simultaneamente para todos eles. A seleção e o cruzamento são restritos a uma pequena vizinhança ao redor de cada indivíduo. As vizinhanças se sobrepõem e, eventualmente, as características de um bom indivíduo podem se propagar pela população. Essa classe de AGPs também é chamada de modelo de difusão, porque a difusão de boas características através da população é análoga à difusão aleatória de partículas em alguns fluidos.

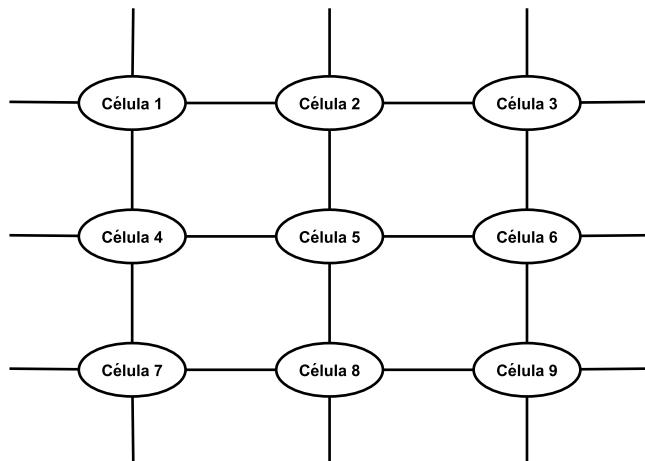


Figura 10 – Algoritmo evolucionário de granulação fina (LUQUE; ALBA, 2011).

3.3.7.3 Modelo de granularidade grossa

O modelo de granularidade grossa (LUQUE; ALBA, 2011) é apresentado na Figura 11. Esse modelo também é conhecido como modelo de Ilhas. Ele divide a população em subpopulações que executam em paralelo o algoritmo de um AG convencional com a adição opcional de rotinas que implementam a migração de indivíduos entre as populações locais (FOGARTY; HUANG, 1991). São modelos difíceis de se controlar devido a sua complexidade, pois cada um dos parâmetros a serem configurados influencia na eficiência do algoritmo evolucionário. A divisão da população implica a definição do número de subpopulações, o tamanho das subpopulações, a frequência da migração, o número de migrantes e destinação, os métodos de seleção dos migrantes e a forma como os que chegam são inseridos na população local. Esse modelo produz um grau de isolamento geográfico na busca pela divisão da população acima em subpopulações e permite que cada uma

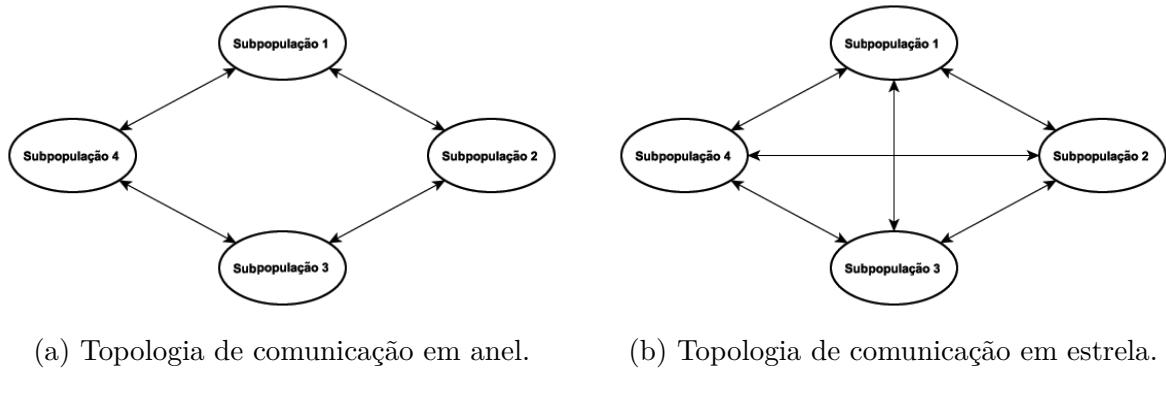


Figura 11 – *Algoritmo evolucionário paralelo em ilhas (RIVERA, 2001).*

evoluía separadamente. Periodicamente, a migração ocorre para permitir um intercâmbio entre subpopulações (RIVERA, 2001). AGPs desse modelo também são conhecidos como Algoritmos Genéticos Distribuídos. A topologia da comunicação entre as subpopulações é parte da estratégia de migração dos AGPs e essa topologia é mapeada sobre alguma rede física (LUQUE; ALBA, 2011) podendo ser qualquer coisa, desde a topologia em anel mostrado na Figura 11a até uma topologia totalmente interligada em que a migração ocorra entre cada elemento da subpopulação, como mostrado na Figura 11b. Vários autores demonstraram que a utilização de múltiplas subpopulações interligadas por algum mecanismo de migração pode melhorar a convergência do algoritmo para uma variedade de problemas (GROSSO, 1985; STARKWEATHER; WHITLEY; MATHIAS, 1991).

Os valores para os parâmetros evolutivos aumentam a complexidade, pois cada parâmetro influencia na eficiência do algoritmo e na qualidade da solução encontrada.

Frequência de migração: A troca de indivíduos entre subpopulações ocorre a intervalos de gerações definidos ou com dada probabilidade para decidir a cada geração se a migração ocorre ou não.

Taxa de Migração: Esse parâmetro determina o número de indivíduos que participam da migração. O valor desse parâmetro pode ser dado em valor absoluto ou em valor percentual do tamanho da população.

Seleção dos Migrantes: A forma como os indivíduos que emigram são selecionados é definida por esse parâmetro. Podem ser escolhidos os melhores ou a escolha pode ser aleatória.

Posicionamento dos Migrantes: Esse parâmetro define como os indivíduos que migram são colocados na sua subpopulação de destino. Podem substituir os piores indivíduos ou os escolhidos de forma aleatória.

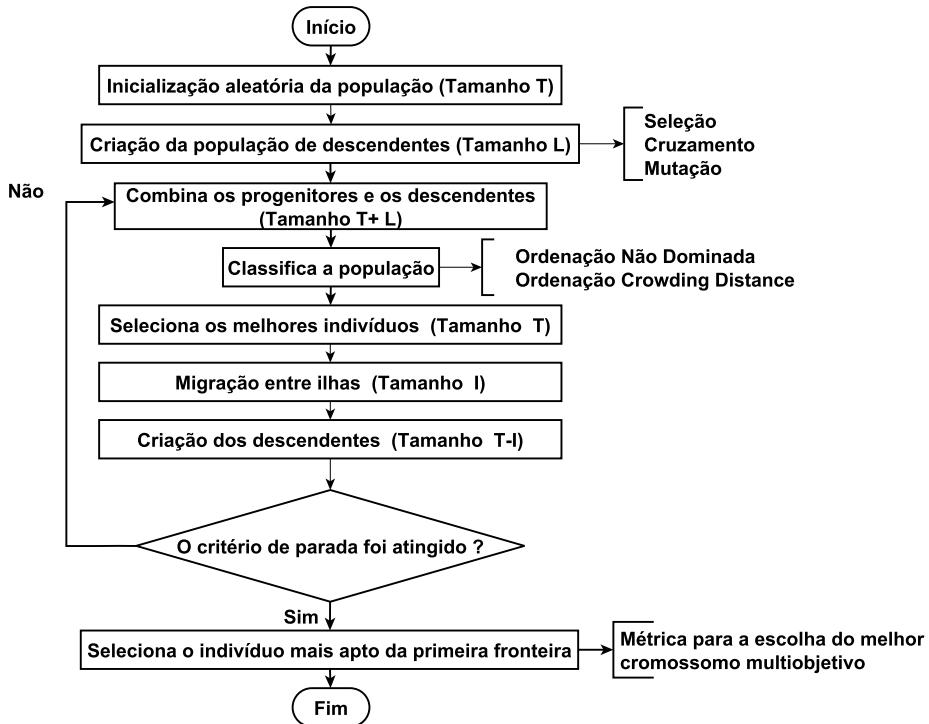


Figura 12 – Fluxograma para NSGA-II (DEB et al., 2002).

Topologia de Migração: Esse parâmetro define a vizinhança de cada subpopulação, ou seja, as sub-populações para as quais dada subpopulação pode enviar (ou receber) indivíduos. Cada subpopulação pode ter valores diferentes de parâmetros, caracterizando os chamados modelos heterogêneos.

3.3.8 Um algoritmo genético multiobjetivo rápido elitista: NSGA-II

Algoritmos evolucionários multiobjetivo (ZHOU et al., 2011; ZAVALA et al., 2014) são heurísticas amplamente utilizados para lidar com problemas de otimização cujo conjunto de soluções viáveis é constituído por elementos que preencham a dois ou mais objetivos. A melhora de um objetivo pode levar ao desarranjo dos outros. Por exemplo, neste trabalho, a busca de uma boa eficiência energética pode facilmente prejudicar a qualidade de iluminação de uma área.

Uma estratégia multiobjetivo amplamente utilizada é o NSGA-II (DEB et al., 2002; SHAYGAN et al., 2014; KAMJOO et al., 2015; ROUT; ACHARYA, 2015). Usando o conceito de dominância de Pareto e frentes de Pareto ótimas, esse algoritmo fornece esquema eficiente para classificar a aptidão individual, a fim de permitir a decisão de quando um indivíduo é melhor do que outro. O fluxograma NSGA-II é apresentado na Figura 12.

O algoritmo de ordenação NSGA-II tem duas etapas principais (DEB et al., 2002):

a ordenação *fast non-dominated* que distribui a população de soluções candidatas em fronteiras separadas com relação a aptidão individual para cada objetivo; e o *crowding-distance* que evita a convergência prematura da população a partir de um esquema para manter a sua diversidade. Isso é conseguido através da atribuição de cada indivíduo da mesma frente em um valor no que diz respeito ao seu respectivo grau de isolamento. Quanto mais isolado é o indivíduo em uma determinada fronteira, melhor ele é classificado. Um exemplo de cálculo *crowding-distance* é dado na Figura 13.

3.3.8.1 Algoritmos de ordenação *Non-dominated*

No esquema de tipo *fast Non-dominated*, para cada indivíduo (solução candidata) p , dentro de uma população de candidatos P de indivíduos de tamanho T , são determinados os seguintes:

- n_p : o número de candidatos em P que domina p (dominância de Pareto),
- S_p : conjunto de candidatos em P que domina p , e
- f : a que fronteira que p pertence.

Primeiro, o conjunto P é percorrido e cada indivíduo $p \in P$ é comparado com o objetivo de determinar a quantidade de indivíduos que dominam p (n_p) e para identificar indivíduos dominados por p (registrado em S_p). No final, cada indivíduo p com $n_p = 0$ é colocado dentro da primeira fronteira(fronteira #1).

Cada indivíduo p , que é colocado dentro de uma fronteira $\#f$ (o Pareto ótimo está em $f = 1$) tem um conjunto de indivíduos dominados ($S - p$). Todo indivíduo $q \in S_p$ tem n_q decrementada. No caso em que $n_q = 0$, o indivíduo q é colocado na fronteira $\#f + 1$. Esse procedimento é realizado de forma recursiva, até que todos os indivíduos da população original sejam colocados em alguma fronteira.

3.4 Programação paralela remota

Várias aplicações exigem grandes quantidades de processamento de dados. O uso de supercomputadores fortemente acoplados é uma solução, porém possuem alto custo, inviabilizando muitos projetos. A alternativa mais utilizada são os *clusters*, sistemas fracamente acopladas que podem processar tarefas paralelas de forma transparente,ou seja, apresentando ser um único sistema para o usuário(ROCHA, 2003).

3.4.1 Cluster

O *cluster* tem como objetivo aumentar o desempenho das aplicações que necessitam de alto poder de processamento. Ele é composto por um conjunto de computadores

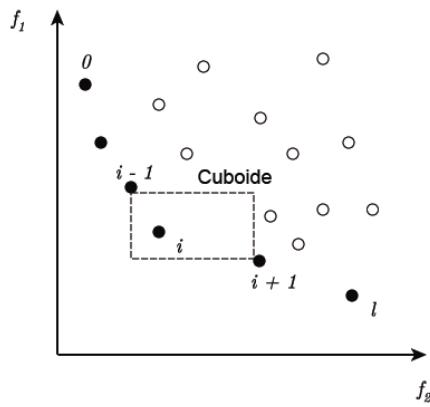


Figura 13 – Cálculo do crowding-distance. Os pontos marcados em círculos preenchidos são soluções da mesma fronteira e são do tipo não dominados (DEB et al., 2002).

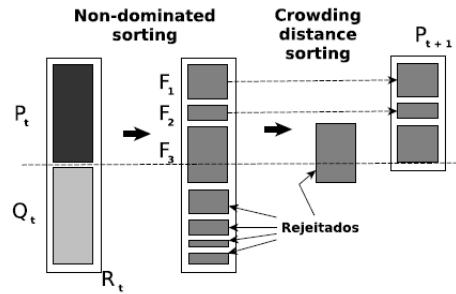


Figura 14 – Processo do NSGA-II (DEB et al., 2002).

em rede, permitindo processamento em larga escala utilizando o processamento paralelo. Dessa forma, podemos distribuir as tarefas de execução de um programa em diversos computadores, ficando assim cada um responsável pela execução de uma parte(PITANGA, 2004).

Segundo PARHAMI (2005), os *clusters* possuem um melhor desempenho para aplicações de granulosidade grossa, pois a necessidade de quantidades expressivas de troca de informações entre os nós causa um alto tráfego na rede prejudicando o seu desempenho.

Para as aplicações de granulosidade grossa, que exigem um número grande de processamento, a utilização do *cluster* é a alternativa recomendada pela maioria dos autores. Nesse caso, cada nó recebe determinada quantidade de dados que passam a ser processados de maneira independente. As trocas de informação ocorrem de maneira a não afetar o desempenho do *cluster*.

O *cluster Beowulf* criado em 1994, foi idealizado pelos pesquisadores da NASA Thomas Sterling e Donald J. Becker, e é voltado à computação paralela, com a finalidade de processar as informações espaciais que a entidade recolhia. Ele não exige uma arquitetura específica ou máquinas homogêneas, é um agrupamento de computadores que formam um supercomputador paralelo baseado em rede de computadores(ROCHA, 2003).

Um *Cluster Beowulf* tem as seguintes características(PARHAMI, 2005):

- ❑ Conexão entre os nós, que pode ser feita por meio de *ethernet* ou algum outro tipo de rede local.
- ❑ Deve haver um nó mestre chamado de *front-end* que é o responsável pelo controle dos nós escravos, monitoramento das falhas, direcionamento da carga de processamento e também funciona como interface para o mundo exterior. Ele possui placa-mãe, microprocessador, memória, disco rígido, placa de rede, monitor de vídeo, placa de vídeo, teclado e mouse.
- ❑ Vários nós escravos que são chamados de *back-end* e que possuem apenas placa-mãe, microprocessador, memória, disco rígido e placa de rede.
- ❑ O sistema operacional deve conter todas as ferramentas necessárias para a configuração do *cluster*.

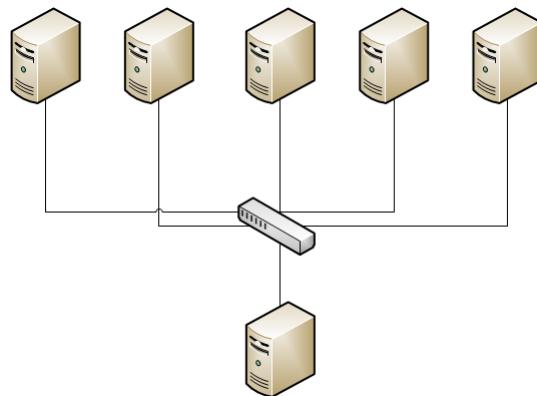


Figura 15 – Arquitetura de um *Cluster* (PARHAMI, 2005).

O sistema é construído usando componentes de *hardware* largamente comercializados, não possuindo nenhum componente de *hardware* desenvolvido especialmente para um propósito específico e é, trivialmente, reproduzível. Também são utilizadas bibliotecas para comunicação em rede, como *Parallel Virtual Machine* (PVM) e *Message Passing Interface* (MPI).

Como os sistemas de *software* são de livre distribuição, o projeto *Beowulf* foi criado usando o paradigma mais recente de *Pile-of-PCs* (PoPC) (ROCHA, 2003):

- ❑ Uso de componentes disponíveis no mercado;
- ❑ Processadores dedicados, ao invés de usar tempo ocioso de estações;
- ❑ Rede de sistema privada (*system area network – SAN*);
- ❑ Nenhum componente feito sob encomenda, de modo a facilitar a replicação;

- ❑ E/S escalável;
- ❑ Base de *software* disponível livremente;
- ❑ Uso de ferramentas de computação distribuídas, disponíveis livremente com alterações mínimas.

As vantagens são:

- ❑ Nenhum fornecedor possui os direitos sobre o produto;
- ❑ Sistemas podem ser construídos usando componentes de diversas origens, graças ao uso de interfaces padrão, tais como *IDE*, *PCI* e *SCSI*;
- ❑ Pode-se tomar vantagem das rápidas evoluções tecnológicas, permitindo adquirir sistemas mais recentes, melhores, a menores preços, capazes de continuar rodando o mesmo *software*;
- ❑ Os sistemas podem ser montados e modificados ao longo do tempo, de acordo com as necessidades e recursos (inclusive financeiros) do usuário, sem depender de configurações disponíveis de um vendedor.

A grande vantagem do sistema *Beowulf* está no fato de que sistemas com diferentes arquiteturas podem fazer parte do mesmo *cluster*, desde sistemas de alto desempenho até computadores de baixo poder de processamento de modo a acrescentar poder de computação barata ao *cluster*(PITANGA, 2004).

3.4.2 Programação paralela

A Engenharia passou por uma grande transformação nos últimos anos devido ao nível de desenvolvimento tecnológico. Os engenheiros gastam mais e mais tempo na frente de um *notebook*, uma estação de trabalho ou um supercomputador paralelo e menos tempo no laboratório prático. A velha estratégia de “tentativa e erro” foi substituída por “simular e analisar” em diversas áreas tecnológicas, tais como aplicações aeroespaciais, a síntese de novos materiais, *design* de novos fármacos, processamento de *chips*, microfabricação, entre outros (KIRBY; KARNIADAKIS, 2003).

Segundo Kirby e Karniadakis (2003), a nova nanotecnologia será baseada, principalmente, em cálculos de grande escala e experimentos numéricos. Os métodos de análise científica e projeto de engenharia estão mudando continuamente, afetando a nossa abordagem aos fenômenos que estudamos e a grande gama de aplicações.

Embora exista grande quantidade de sistemas de *software* disponíveis para ser usada quase como uma “caixa-preta”, para se trabalhar em novas áreas, são exigidos um bom conhecimento dos fundamentos e um grande domínio das novas e eficazes ferramentas de trabalho.

3.4.2.1 Programação Sequencial

Um programa é considerado programação sequencial quando é visto como uma série de instruções sequenciais que devem ser executadas num único processador.

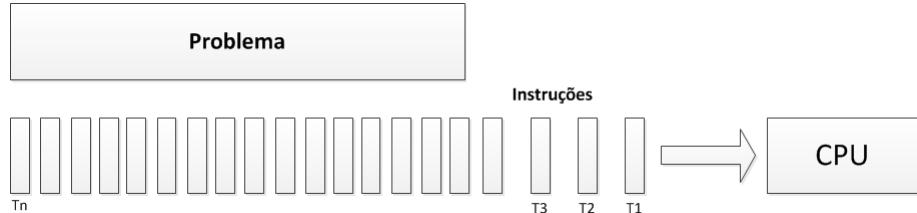


Figura 16 – *Divisão dos processos de forma sequencial (KIRBY; KARNIADAKIS, 2003).*

3.4.2.2 Programação Paralela

Um programa é considerado paralelo quando é visto como um conjunto de partes que podem ser resolvidas concorrentemente. Cada parte é igualmente constituída por uma série de instruções sequenciais, mas que no seu conjunto podem ser executadas simultaneamente em vários processadores. Atualmente, muitas aplicações exigem o desenvolvimento

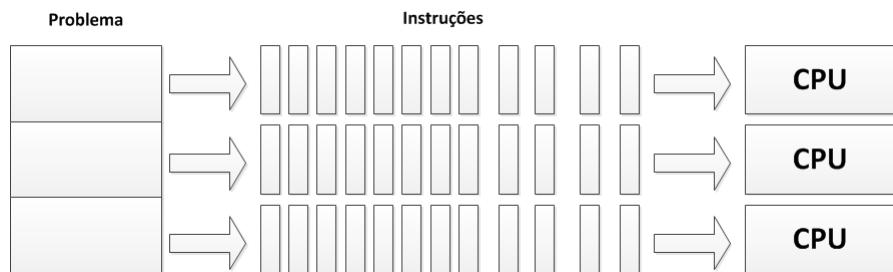


Figura 17 – *Divisão dos processos de forma paralela (KIRBY; KARNIADAKIS, 2003).*

de computadores cada vez mais rápidos. Essas aplicações ou requerem um grande poder de computação ou o processamento de grandes quantidades de informação. A programação paralela reduz o tempo necessário para solucionar um problema permitindo que problemas mais complexos e de maior dimensionalidade sejam resolvidos com maior facilidade e admite utilizar recursos computacionais não disponíveis localmente ou subaproveitados e ultrapassar limitações de memória quando a memória disponível num único computador é insuficiente para a resolução do problema(TANENBAUM, 2007).

Paralelismo Implícito

O paralelismo é implícito quando cabe ao compilador e ao sistema de execução (KIRBY; KARNIADAKIS, 2003):

- Detectar o paralelismo potencial do programa;

Tabela 4 – Classificação da arquitetura de um computador ou conjunto e computadores (FLYNN, 1972).

	Dados Individuais	Múltiplos Dados
Única Instrução	SISD	SIMD
Múltiplas Instruções	MISI	MIMD

- ❑ Atribuir as tarefas para execução em paralelo;

- ❑ Controlar e sincronizar toda a execução.

Esse tipo de paralelismo libera o programador dos detalhes da execução paralela, dando a solução mais geral que não consegue ser eficiente para todos os casos(KIRBY; KARNIADAKIS, 2003).

Paralelismo Explícito

O paralelismo diz-se explícito quando cabe ao programador(KIRBY; KARNIADAKIS, 2003):

- ❑ Anotar as tarefas para execução em paralelo;
- ❑ Atribuir (possivelmente) as tarefas aos processadores;
- ❑ Controlar a execução, indicando os pontos de sincronização;
- ❑ Conhecer a arquitetura dos computadores de forma a conseguir o máximo desempenho (aumentar localidade, diminuir comunicação, etc).

Esses recursos computacionais podem incluir:

- ❑ Um único computador com múltiplos processadores;
- ❑ Um número arbitrário de computadores ligados por rede;
- ❑ A combinação de ambos.

A taxonomia de Flynn (FLYNN, 1972) classifica a arquitetura dos computadores segundo duas dimensões independentes. A primeira dimensão é o número de fluxos de instruções que uma máquina pode executar simultaneamente e a segunda é a quantidade de fluxos de dados que são processados em um mesmo instante de tempo. Considera-se que cada dimensão pode ter duas opções, único fluxo ou vários fluxos, dando um total de quatro combinações conforme tabela 4.

- ❑ SISD: Computadores de fluxo único de instruções e dados presentes na arquitetura dos computadores com um único processador. Apenas uma instrução e um fluxo de dados são processados a cada momento.
- ❑ SIMD: Computadores de fluxo único de instruções e fluxo múltiplo de dados. Eles permitem que uma mesma instrução seja feita sobre um conjunto de dados. É um tipo de arquitetura paralela usadas quando o problema tem um alto padrão de regularidade dos dados como no caso do processamento digital de imagem. Todas as unidades de processamento executam a mesma instrução a cada momento, mas cada unidade de Processamento trabalha em um fluxo de dados diferentes.
- ❑ MISD: Constituída por uma *pipeline* de unidades de processamento independentes que operam sobre um mesmo fluxo de dados, enviando os resultados de uma unidade para a próxima. Cada unidade de processamento executa instruções diferentes a cada momento.
- ❑ MIMD: Arquitetura paralela em que cada unidade de processamento executa instruções diferentes a cada momento e cada unidade de processamento pode operar sobre um fluxo de dados diferente.

É possível classificar a arquitetura MIMD em duas categorias de acordo com o tipo de compartilhamento de memória (JOHNSON, 1988):

- ❑ Fortemente acoplada: sistemas em que existe um único espaço de endereçamento compartilhado por todos os processadores. Nesse caso, a comunicação entre diferentes processadores ocorre de forma implícita a partir de instruções de escrita e leitura em posições de memória.
- ❑ Fracamente acoplada: cada processador tem seu próprio, e privativo, espaço de endereçamento. Aqui, a comunicação entre processos só é possível por meio de primitivas de troca de mensagens como *send* e *receive*.

3.4.3 Serviço Web

Um requisito básico de qualquer sistema de informática de grande porte é a integração com sistemas baseados em tecnologias distintas. Os serviços *Web* possuem arquitetura que possibilita aplicações desenvolvidas em diferentes plataformas sejam interoperáveis, permitindo que aplicações possam enviar e receber dados no formato XML - *eXtensible Markup Language*.

O World Wide Web Consortium (W3C) é a instituição responsável pela padronização dos serviços *Web*. As bases para a construção de um serviço *Web* são os padrões XML(*eXtensible Markup Language*), SOAP (*Simple Object Access Protocol*) e WSDL(*Web*

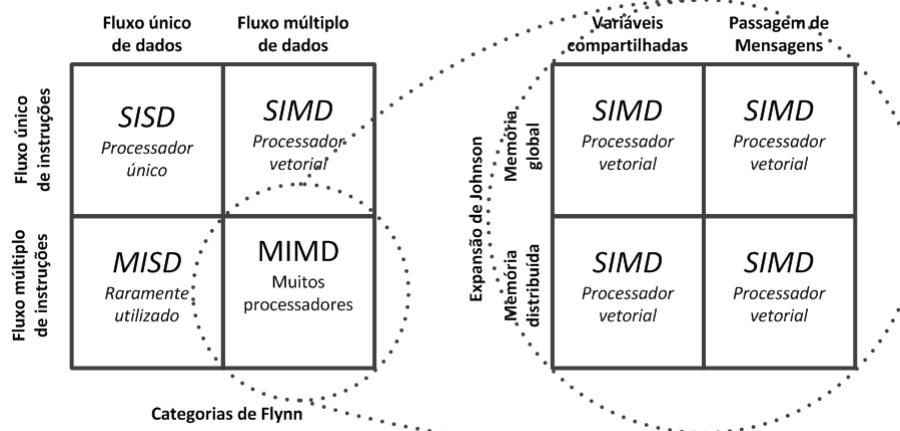


Figura 18 – Taxonomia de Flynn com a expansão de Jhonson (FLYNN, 1972).

*Service Description Language). O transporte dos dados, normalmente, é realizado via protocolo HTTP(*Hypertext Transfer Protocol*), os dados são transferidos no formato XML, e encapsulados pelo protocolo SOAP.*

Segundo o W3C (2013), um serviço *Web* define-se como: um sistema de *software* projetado para suportar a interoperabilidade entre máquinas sobre rede.

Os serviços *Web* estão disponíveis sobre internet de uma forma normalizada trazendo agilidade para os processos e eficiência na comunicação entre diferentes sistemas. Toda e qualquer comunicação passa a ser dinâmica e principalmente segura. A aplicação pode invocar outra para executar tarefas mesmo que as duas aplicações estejam em diferentes sistemas e escritas em linguagens diferentes, ou seja, a aplicação cliente pode utilizar todos os recursos fornecidos pelo serviço *Web*.

Os serviços interativos da *Web*, podem ser acessados por outras aplicações usando o protocolo SOAP (*Simple Object Access Protocol*). A principal diferença em relação a outros componentes como o DCom(Descrição do significado) é a padronização do XML para troca de informações, fazendo com que a comunicação deste ultrapasse as barreiras dos *Firewall* impostos para segurança das redes. A única coisa que trafega é o XML usando a porta 80 (padrão) em conjunto com o já conhecido HTTP e o SOAP, que cuida do transporte dos dados (W3C, 2013).

Para troca de informação entre a aplicação e um *WebServices*, é necessário que essa aplicação conheça o funcionamento do mesmo. Isso é feito por meio da leitura do WSDL, que é um documento ou “contrato” em XML que contém todas as regras do *WebService*. A UDDI é uma espécie de páginas amarelas de *WebServices*, cujo objetivo é facilitar encontrá-los.

As bases para a construção de um serviço *Web* são os padrões XML e SOAP. O transporte dos dados é realizado normalmente via protocolo HTTP ou HTTPS para conexões seguras (o padrão não determina o protocolo de transporte). Os dados são transferidos no formato XML, encapsulados pelo protocolo SOAP.

Segundo W3Schools (2013), em meados da década de 1990, o W3C começou a trabalhar em uma linguagem de marcação que combinasse a flexibilidade da SGML(*Standard Generalized Markup Language*) com a simplicidade da HTML. O princípio do projeto era criar uma linguagem que pudesse ser lida por *software*, e integrar-se com as demais linguagens de forma independente do *hardware* e da plataforma utilizada. Sua filosofia seria incorporada por vários princípios importantes, sendo eles:

- ❑ Projetado para transportar e armazenar dados;
- ❑ Separação do conteúdo dos dados com a sua formatação;
- ❑ Simplicidade e legibilidade, tanto para humanos quanto para computadores;
- ❑ As Tags XML não são predefinidas. Você deve definir suas próprias tags;
- ❑ Criação de arquivos para validação de estrutura (chamados DTDs);
- ❑ Interligação com diversos tipos de bancos de dados permitindo que um banco de dados, a partir de uma aplicação consiga escrever um arquivo XML e outro banco de dados qualquer que rode em qualquer *hardware* ou plataforma consiga ler esses dados;
- ❑ Foco em uma melhor estrutura da informação, e não na aparência desta, criando documentos com dados de forma hierárquica, como se vê, frequentemente, em documentos de texto formatados, imagens vetoriais ou bancos de dados.

SOAP (*Simple Object Access Protocol*) é um protocolo para troca de informações estruturadas em plataforma descentralizada e distribuída. Ele se baseia na Linguagem de Marcação Extensível (XML) para seu formato de mensagem e, normalmente, baseia-se em outros protocolos da Camada de aplicação, mais notavelmente em Chamada de Procedimento Remoto (RPC) e Protocolo de Transferência de Hipertexto (HTTP), para negociação e transmissão de mensagens. O SOAP pode formar a camada base de uma pilha de protocolos de serviço *Web*, fornecendo um *framework* de mensagens básico sob o qual os serviços *Web* podem ser construídos. Esse protocolo baseado em XML consiste de três partes: um envelope, que define o que está na mensagem e como processá-la, um conjunto de regras codificadas para expressar instâncias do tipo de dados definidos na aplicação e uma convenção para representar chamadas de procedimentos e respostas(W3C, 2013).

Geralmente, servidores SOAP são implementados utilizando-se servidores HTTP, embora isso não seja uma restrição para funcionamento do protocolo. As mensagens SOAP são documentos XML que aderem à especificação fornecida pelo órgão W3C.

WSDL(*Web Services Description Language*) é um documento simples escrito em XML utilizado para descrever e localizar os serviços *Web*, especificando como cada operação ou

método está disponível. Usando WSDL, um serviço *Web* pode descrever tudo sobre o que ele faz e como ele faz e como os consumidores desse serviço *Web* poderão usá-lo (W3C, 2013). O WSDL torna mais fácil de escrever e manter os serviços, proporcionando uma abordagem mais estruturada para definir interfaces de serviços *Web*, reduzindo a quantidade de código que um aplicativo cliente deve implementar.

UDDI (*Universal Description, Discovery and Integration*) é um serviço de diretório pelo qual empresas podem publicar e buscar por serviços *Web*.

Para a aplicação tirar proveito do serviço *Web*, devemos seguir três passos (WEB..., 2001):

- ❑ Publicar: para ser acessível, a descrição dos serviços precisa ser publicada para que as aplicações clientes possam localizá-los;
- ❑ Localizar: na operação de busca, o solicitante do serviço recupera uma descrição do serviço diretamente ou faz consultas ao serviço de publicação para o tipo de serviço que deseja;
- ❑ Vincular: eventualmente, um serviço precisa ser invocado. Na operação de ligação do serviço, o programa solicitante invoca ou inicia uma interação com o serviço *Web* em tempo de execução, usando para a ligação os detalhes obtidos na operação de localizar.

Segundo Tidwell, Snell e Kulchenko. (2001), as funções na arquitetura de um serviço *Web* são:

- ❑ Provedor de serviços: é o proprietário do serviço a ser oferecido, em termos de arquitetura é a plataforma que hospeda o serviço.
- ❑ Solicitante do Serviço: é a aplicação que está procurando e invocando ou iniciando uma interação com um serviço. O serviço solicitante pode ser um programa com ou sem interface com o usuário.
- ❑ Publicação do serviço: Aqui, são guardadas as descrições publicadas pelos provedores de serviços. Elas podem ser pesquisadas por solicitantes do serviço, que irão obter informações para a utilização do mesmo. Os serviços, estaticamente ligados aos solicitantes, podem enviar a descrição diretamente a eles a partir de arquivos.
- ❑ Serviço: Quando um serviço *Web* é uma interface descrita por uma descrição do serviço, a sua implementação é o serviço. Um serviço é um *software* modular implementado em rede e acessível à multiplataforma, a qual existe para ser invocada ou interagir com um solicitante do serviço.

- ❑ Descrição do serviço: A descrição do serviço contém os detalhes da interface e da execução do serviço. Isso inclui os seus tipos de dados, operações, informações e localização na rede. Também pode incluir categorização e outras informações para facilitar a descoberta e utilização dos solicitantes de serviços.

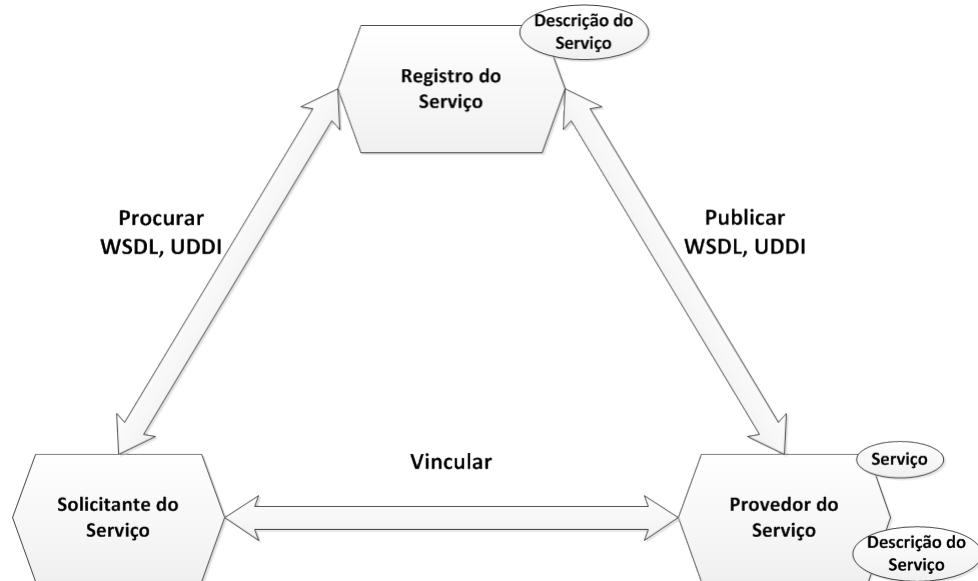


Figura 19 – Elementos de um serviço Web (TIDWELL; SNELL; KULCHENKO., 2001).

Produzido pela fundação Apache, o *Axis* é um conjunto de ferramentas escrito em Java, que tem como objetivo fornecer uma infraestrutura para a implementação e manipulação de mensagens que utilizam o protocolo SOAP. Além dessa funcionalidade, o Axis disponibiliza outros componentes que auxilia no desenvolvimento de serviço Web (APACHE SOFTWARE FOUNDATION, 2013):

- ❑ Um servidor de serviço Web simples com suporte HTTP, que pode ser instalado sobre aplicações Apache Tomcat;
- ❑ Um amplo suporte à linguagem de descrição de serviço Web;
- ❑ Ferramentas que geram automaticamente classes Java a partir da especificação WSDL;
- ❑ Ferramentas que geram especificações WSDL em classes Java e realizam a monitorização de pacotes TCP/IP.

O Axis possui as seguintes características (APACHE SOFTWARE FOUNDATION, 2013):

- ❑ Velocidade: o *Axis* utiliza um analisador para conseguir um aumento em sua velocidade em relação às versões anteriores do Apache SOAP;

- ❑ Flexibilidade: A arquitetura *Axis* oferece flexibilidade para a inclusão de extensões de cabeçalhos, gerenciamento de sistemas, entre outros;
- ❑ Estabilidade: Define um conjunto de interfaces publicadas que sofrem poucas alterações;
- ❑ Implantação orientada a componentes: possibilita a reutilização de manipuladores a fim de criar padrões para processamento de aplicações;
- ❑ Arquitetura de transporte: transporte de mensagens SOAP sobre vários protocolos como SMTP, FTP, etc.

3.4.4 Aplicação cliente

As aplicações clientes são sistemas de *software* que enviam e recebem requisições para outros computadores que rodam os serviços *Web*. Uma vez que essas requisições são enviadas, é identificado o serviço que está sendo requisitado, o serviço é executado e, finalmente, a resposta é devolvida para quem pediu.

Uma das vantagens é a independência de linguagem, ou seja, uma aplicação cliente implementada em Java pode consumir um serviço *Web* implementado em qualquer linguagem como o C# ou Python, pois o XML garante a comunicação padronizada. A aplicação cliente pode conter todos os recursos de uma aplicação comum. A diferença é que alguns métodos não são implementados naquela, e sim consumidas a partir de um serviço *Web* na internet.

O consumo de serviço *Web* é muito utilizado possibilitando que os diversos sistemas possam compartilhar informações e o poder computacional de forma transparente e segura.

3.5 Considerações finais do capítulo

O presente trabalho é multidisciplinar, nele são utilizados conceitos que vão da iluminação a programação paralela, passando por algoritmos evolucionários multiobjetivo, *custer* de computadores, *Web service* e aplicações cliente. Aqui foi mostrado todo o arcabouço teórico necessário para o bom entendimento do trabalho. [MM1]?

CAPÍTULO 4

Soluções desenvolvidas para programação paralela remota

Este capítulo discute e justifica a ideia de utilizar *cluster* de computadores para trabalhar com a criação de projetos de iluminação exterior.

O *software* do projeto é dividido em três partes. A parte principal é o AE, em que se utiliza a linguagem C++ com a biblioteca MPICH2 executada em um *cluster Beowulf* com 5 servidores Intel Xeon E5504. Cada computador tem 8 núcleos @2,00 GHz, 4GB de memória RAM e sistema operacional Ubuntu 10.04LTS(kernel 2.6.32). No *frontend* do *cluster* também roda o serviço *Web* que faz a transferência de dados entre o *cluster* e o programa cliente que é uma aplicação em que o usuário final manipula os dados. O Serviço *Web* foi construído em Java, utilizando o Apache eXtensible Interaction System (AXIS) que é um *framework* de código aberto, baseado na linguagem Java e no padrão eXtensible Markup Language (XML), utilizado para construção de um serviço *Web* no padrão Simple Object Access Protocol (SOAP).

4.1 *Cluster* de computadores

A tecnologia de inicialização Preboot Execution Environment (PXE) foi adotada para a inicialização de todos os computadores do *cluster*. Essa tecnologia permite a inicialização usando a interface da placa de rede sem a dependência da disponibilidade de dispositivos de armazenamento, como disco rígido ou algum sistema operacional instalado.

O compartilhamento de arquivos dentro do *cluster* é realizado usando o Network File System (NFS), o qual permite que um diretório virtual seja compartilhado. É preciso compartilhar */home* e */usr/local* para que todos os arquivos e configurações de usuários possam ser acessadas por todos os computadores do *cluster*.

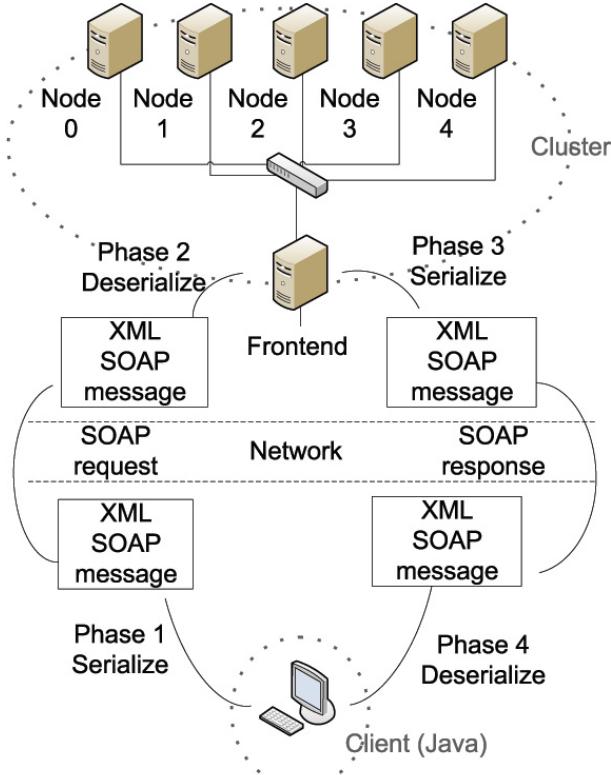
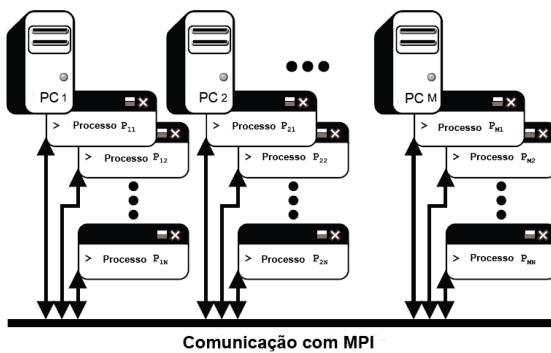


Figura 20 – Integração cliente-Cluster via serviços Web

4.2 Programação paralela

Para rodar o programa nos vários núcleos do *cluster*, foi utilizada a biblioteca Message Passing Interface (MPI), a qual permite que vários processos paralelos possam trabalhar simultaneamente para um objetivo comum, sendo que o meio de comunicação entre os processos é a troca de mensagens. Essa ideia é ilustrada na Figura 21.

Figura 21 – Esquema de $(M \times N)$ processos MPI de M nós trabalhando juntos.

Vários processos MPI podem ser executados em processadores diferentes, e esses processos se comunicam a partir da infraestrutura fornecida pelo MPI. Quase tudo no MPI pode ser resumido na ideia simples de mensagem enviada e mensagem recebida (KIRBY; KARNIADAKIS, 2003).

Este projeto utiliza a MPICH2 que é uma biblioteca de alto desempenho e altamente portátil (IMPLEMENTATION..., 2012).

Ao rodar AE construído em C/C++ com a biblioteca MPI, são criados 40 processos, sendo alocado um processo em cada núcleo do *cluster*. O processo zero sempre roda no *front-end* e, por isso, foi designado como o processo principal.

A arquitetura utilizada na programação paralela do AE é o modelo granularidade grossa, também conhecido como modelo de Ilhas. Esse modelo divide a população total em populações locais que executam em paralelo o AE com a adição de rotinas que implementam a migração de indivíduos entre as populações locais.

A importância de o processo principal ser executado pelo *front-end* se deve ao fato de que possui:

- ❑ Todos os periféricos de entrada e saída do *cluster*;
- ❑ O serviço *Web* que é quem interliga o *cluster* a outros sistemas via *Web*.

O processo zero se comunica com o serviço *Web* por meio de arquivos texto. É ele que faz a leitura dos arquivos no disco rígido. Utilizando o *MPI_Bcast* que é uma rotina a qual permite o processo enviar dados, de imediato, para todos os outros processos do grupo, o processo zero envia os dados para que o AE possa rodar em todos os núcleos.

4.3 Serviços *Web*

O serviço *Web* é um aplicativo distribuído, cujos componentes podem ser implantados e executados em dispositivos distintos. Por exemplo, o serviço pode consistir de vários componentes de código, cada um hospedado em um servidor separado, e o serviço *Web* pode ser consumido em computadores pessoais, equipamentos portáteis e outros dispositivos (KALIN, 2009).

O SOAP forma a camada base de uma pilha de protocolos de serviços *Web*, oferecendo uma estrutura básica de mensagens, sobre a qual os serviços *Web* podem ser construídos. Esse protocolo baseado em XML consiste de três partes: um envelope, que define o que está na mensagem e como processá-las, um conjunto de regras de codificação para expressar instâncias de tipos de dados definidos pelo aplicativo, e uma convenção para representar chamadas de procedimentos e respostas.

O SOAP tem três características principais: extensibilidade (segurança e WS-roteamento estão entre as extensões em desenvolvimento), neutralidade (SOAP pode ser usado sobre qualquer protocolo de transporte, tais como HTTP, SMTP, TCP, ou JMS) e Independência (Soap permite qualquer modelo de programação) (KALIN, 2009).

O serviço *Web* desenvolvido funciona como uma camada de integração entre o cliente Java e o programa C/C++ utilizando a biblioteca MPI que é executada no *cluster* de

computadores. Ele foi desenvolvido utilizando a linguagem Java devido à sua portabilidade e ao fato de ser uma ferramenta de desenvolvimento livre e, portanto, não requer a compra de licenças.

No sistema proposto, a aplicação cliente utiliza o serviço *Web* para enviar e receber informações do *front-end* que é o computador principal do *cluster*. Ao receber os parâmetros da aplicação cliente, o serviço *Web* inicia a execução do AE que foi construído em C/C++ passando os parâmetros necessários para o seu funcionamento.

O serviço *Web*, a partir da utilização de *threads*, fica esperando o programa em C++ terminar de rodar o AE. Ao fim da execução, o programa envia para o serviço *Web* os resultados que são repassados ao programa cliente.

Dados recebidos pelo serviço *Web*:

- ❑ Curvas fotométricas das luminárias escolhidas;
- ❑ Área a ser iluminada;
- ❑ Área onde podem ser fixados postes;
- ❑ Lâmpadas escolhidas;
- ❑ Conjunto de lâmpadas e luminárias compatíveis;
- ❑ Postes escolhidos;
- ❑ Percentagem da população que fará cruzamento;
- ❑ Percentagem da população que fará mutação;
- ❑ Tamanho da população;
- ❑ Número de gerações;
- ❑ Iluminação ideal;
- ❑ Tolerância aceita no processo de iluminação;
- ❑ Tipo de migração;
- ❑ Percentagem da população que fará a migração;
- ❑ Tipo de seleção;
- ❑ Caso o tipo de seleção seja o torneio, será repassada a percentagem de elementos que participarão deste. Também será enviado um valor para determinar o mínimo de elementos que poderão participar;
- ❑ Percentagem da população que participará do elitismo.

O dado enviado como resposta pelo serviço Web é um cromossomo que contém:

- lista de pares (poste, conjunto luminária-lâmpada);
- Posição em que cada poste será fixado;
- Ângulo de rotação de cada luminária (β) em relação ao poste no plano horizontal.

4.4 Cliente Java

A aplicação cliente é dividida em duas partes principais, uma dedicada ao registro de dados, e a outra dedicada ao desenvolvimento de projetos de iluminação pública otimizada.

4.4.1 Manipulação de dados

Na parte referente ao cadastro de dados, Figura 22, é possível manipular (incluir, apagar e modificar) os seguintes dados:

- Tipos de poste;
- Tipos de lâmpadas;
- Tipos de luminárias;
- Área a ser iluminada.

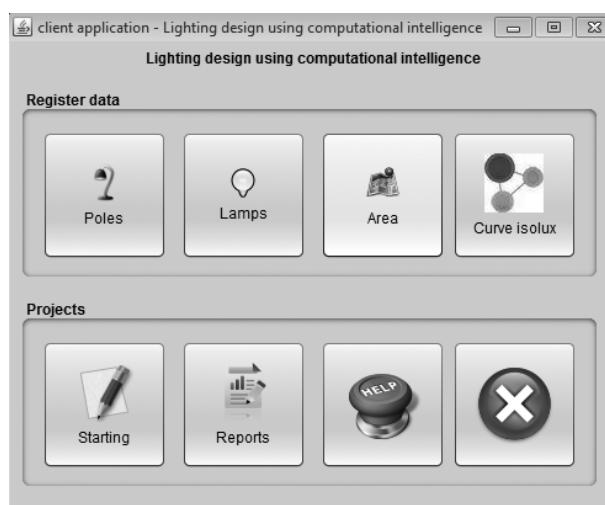


Figura 22 – Programa Java cliente.

4.4.1.1 Manipulação de tipos de postes

Os postes, Figura 23, têm os seguintes parâmetros que podem ser manipulados:

- Descrição do poste;
- Altura de montagem da lâmpada no poste em relação ao plano de trabalho.

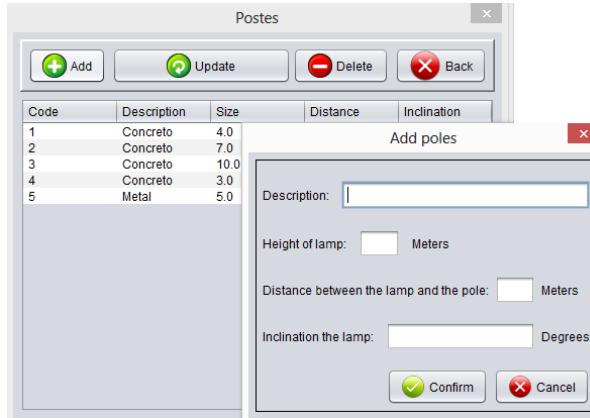


Figura 23 – Manipulação de dados do Poste.

4.4.1.2 Manipulação de tipos de lâmpadas

As lâmpadas, Figura 24, têm os seguintes parâmetros que podem ser manipulados:

- Nome da lâmpada;
- Nome do fabricante;
- Tipo de lâmpada;
- Potência da lâmpada em Watts;
- Fluxo luminoso em Lumens;
- Comprimento da lâmpada em milímetros;
- Diâmetro da lâmpada em milímetros;
- Tipo de base da lâmpada.



Figura 24 – Manipulação de dados das lâmpadas.

4.4.1.3 Manipulação do tipo de luminárias

As luminárias, Figura 25, têm os seguintes parâmetros que podem ser manipulados:

- Nome da luminária;
- Comprimento da lâmpada em milímetros;
- Diâmetro da lâmpada em milímetros;
- Tipo de base da lâmpada suportada pela luminária;
- Tipos de lâmpadas suportadas;
- Curva fotométrica da luminária.

A curva fotométrica é importada automaticamente pelo sistema cliente e deve ser fornecida pelo fabricante da luminária em um arquivo texto com extensão IES.

4.4.1.4 Manipulação das áreas a serem iluminadas

As áreas a serem iluminadas, Figura 26, podem ser cadastradas informando as seguintes características:

- Área total a ser iluminada;
- Áreas onde não pode haver a fixação de postes.

Um dos motivos em que o sistema proposto utilize o método ponto a ponto para o cálculo da iluminação e não o método dos fluxos está justamente no fato de que os postes não podem ser fixados em qualquer lugar, e sim em áreas previamente definidas.

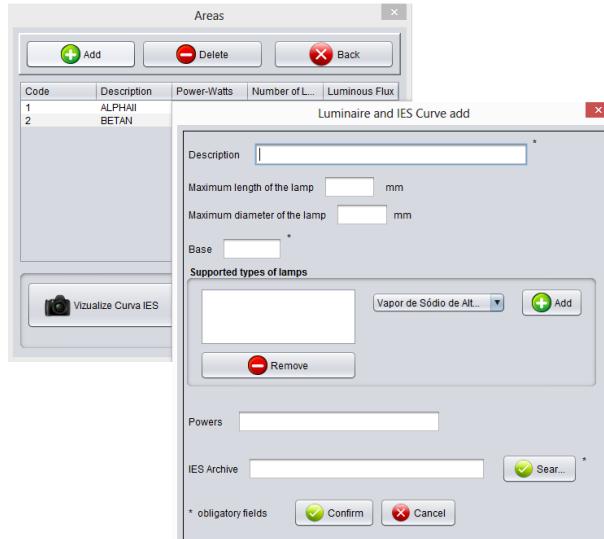


Figura 25 – Manipulação de dados da luminária.

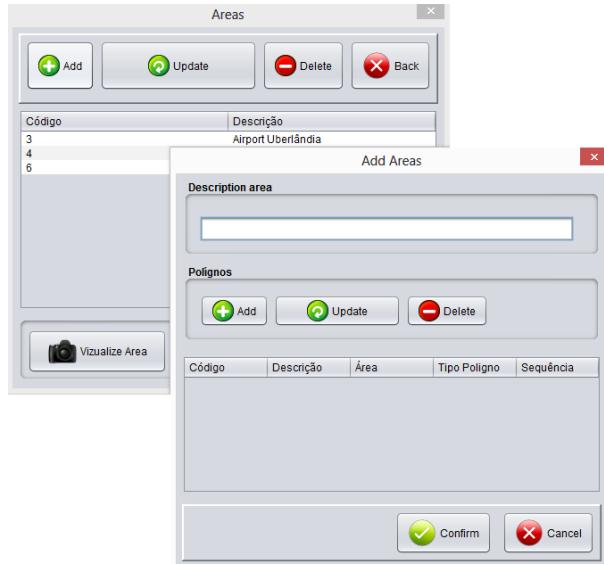


Figura 26 – Manipulação de dados da área a ser iluminada.

4.4.2 Projeto de iluminação otimizada de áreas externas

Para a construção de um projeto de iluminação, construíram-se duas áreas de trabalho em que os parâmetros do AE, tipos de migração, material a ser utilizado, área a ser iluminada e iluminação desejada com sua tolerância são inicializados.

4.4.2.1 Parâmetros do projeto

Nesta parte, conforme mostrado na Figura 27 , o usuário escolhe os postes, lâmpadas e luminárias que estão disponíveis para serem utilizados no projeto. Todos os dados acima mencionados devem ter sido cadastrados previamente. O programa faz a verificação de compatibilidade entre as lâmpadas e as luminárias, permitindo o uso apenas dos conjuntos que são compatíveis. Também é escolhida a área que será utilizada no projeto, além da

iluminação ideal com sua respectiva tolerância.

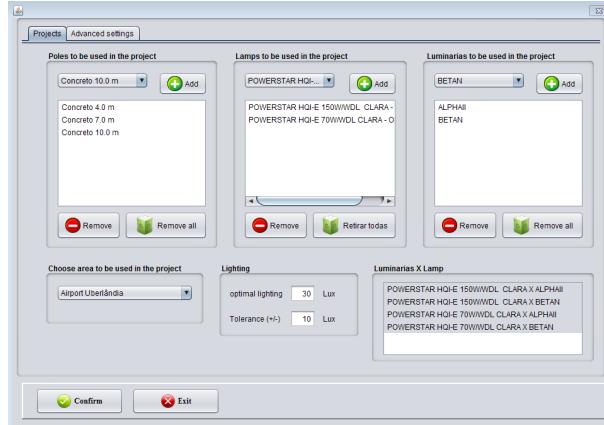


Figura 27 – Entrada de dados para a construção do projeto de iluminação.

4.4.2.2 Parâmetros da configuração avançada

Os parâmetros contidos neste formulário, conforme mostrado na Figura 28, já vêm previamente configurados. São valores que permitem melhor desempenho para a maioria dos projetos. A pré-configuração é ideal para usuários que queiram utilizar o *software* sem se preocupar com parâmetros do AE e da topologia de migração. O usuário poderá configurar os seguintes parâmetros:

- Taxa de cruzamento;
- Taxa de mutação;
- Número de gerações;
- Tamanho da população;
- Tipo de seleção (roleta ou torneio), caso o método escolhido seja o torneio, o usuário poderá escolher o tamanho do torneio;
- A percentagem de indivíduos que irão participar do elitismo determinando também o número mínimo de participantes;
- Tipo de migração (aleatório ou em anel).

4.5 Considerações finais do capítulo

O cliente Java com suporte de serviços *Web* permite usabilidade melhor do que usar a aplicação diretamente no *cluster*. Nota-se que o tempo de execução é independente do *hardware* do cliente. A abordagem apresentada permite aos usuários trabalhar facilmente

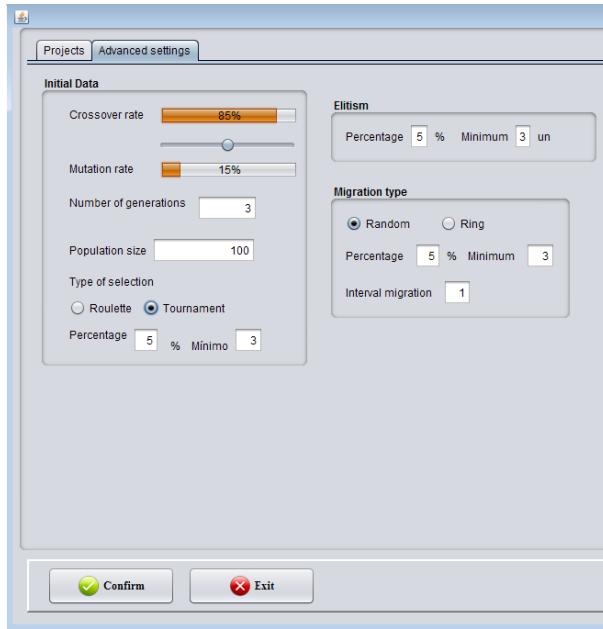


Figura 28 – Formulário para configuração avançada do projeto.

com um *cluster* de alto desempenho sem as desvantagens relacionadas à complexidade de sua operação. Além disso, o uso de clientes *Web* e *cluster* de computadores transforma qualquer demanda de projeto em uma experiência cotidiana, ou seja, o usuário pode remotamente dar entrada nos dados relacionados, pedir que o sistema construa o projeto e recebê-lo depois de alguns minutos sem ter que ficar esperando o resultado. O usuário pode definir os materiais (por exemplo, altura dos postes, lâmpadas, luminárias) com os quais ele deseja trabalhar, bem como configurar o *layout* da área (definindo subáreas restritivas ao posicionamentos dos postes de iluminação), iluminância média desejada (com tolerância), e parâmetros relacionados com o AE paralelo.

Projetistas profissionais e pesquisadores também poderão se beneficiar desse aplicativo cliente. Uma das vantagens desse aplicativo é que ele é conectado a um banco de dados, para guardar os resultados anteriores a partir de ensaios do AE. Esses resultados que foram armazenados no banco de dados podem ajudar os pesquisadores a entender melhor o funcionamento do AE a partir da utilização da estatística.

CAPÍTULO 5

Algoritmo Evolucionário proposto

Um projeto de iluminação tem número ótimo indeterminado de fontes de luz no campo de visão. Para garantir uma maior varredura em um campo de quase infinitas soluções, precisamos de cromossomos com características especiais. O sistema proposto é uma variante dos algoritmos genéticos clássicos (HOLLAND, 1992; GOLDBERG, 1989) e utiliza, neste trabalho, um genótipo de tamanho variável para representar uma solução candidata. Características do Algoritmo Evolucionário (AE) desenvolvido:

- ❑ É baseado em Algoritmos Genéticos;
- ❑ Arquitetura paralela *multiple instructions multiple data (MIMD)* fracamente acoplada: uso do modelo *coarse-grained* (granularidade grossa), também conhecido como modelo de ilhas, com implementação em um *cluster* de computadores;
- ❑ A Migração entre as ilhas é realizada depois de um determinado número de gerações. Os elementos que sofrerão migração são escolhidos pelo método do torneio e a ilha para qual eles migram é escolhida de forma aleatória.
- ❑ Orientado para *Computer-automated design (CAutoD)* (KAMENTSKY; LIU, 1963), ou seja, diferentes indivíduos representam projetos diferentes;
- ❑ Utiliza como genótipo uma representação real bidimensional de tamanho variado (lista de listas) contendo informações de cada conjunto de iluminação (componentes), ângulo de rotação do braço do poste e respectivas posições de instalação;
- ❑ Possui operadores genéticos dedicados: a recombinação opera com lista de listas e a mutação garante a convergência em tempo infinito;
- ❑ O fenótipo de um indivíduo é o resultado da simulação do projeto de iluminação por ele representado e aplicado a uma área de interesse pré-definida;

$$c = \begin{cases} P_1L_1 & \rightarrow [(x_{11}^{(1)}, y_{11}^{(1)}), \beta^{(1)}], [(x_{11}^{(2)}, y_{11}^{(2)}), \beta^{(2)}] \\ P_1L_2 & \rightarrow \emptyset \\ \vdots & \\ P_1L_m & \rightarrow [(x_{1m}^{(1)}, y_{1m}^{(1)}), \beta^{(1)}], [(x_{1m}^{(2)}, y_{1m}^{(2)}), \beta^{(2)}], [(x_{1m}^{(3)}, y_{1m}^{(3)}), \beta^{(3)}] \\ P_2L_1 & \rightarrow \emptyset \\ P_2L_2 & \rightarrow [(x_{22}^{(1)}, y_{22}^{(1)}), \beta^{(1)}] \\ \vdots & \\ P_2L_m & \rightarrow [(x_{2m}^{(1)}, y_{2m}^{(1)}), \beta^{(1)}], [(x_{2m}^{(2)}, y_{2m}^{(2)}), \beta^{(2)}] \\ \vdots & \\ P_nL_m & \rightarrow [(x_{nm}^{(1)}, y_{nm}^{(1)}), \beta^{(1)}] \end{cases}$$

Figura 29 – Cromossomo representado por c . P_nL_m representa o par (poste, conjunto luminária-lâmpada). $(x_{nm}^{(k)}, y_{nm}^{(k)})$ é a posição no plano (eixo xy) e $\beta^{(k)}$ o ângulo da luminária em relação ao poste no plano horizontal. Todos os dados são para o k^{th} par do tipo P_nL_m .

- É multiobjetivo, ou seja, foi projetado para maximizar a qualidade de iluminação e minimizar o consumo de energia e a utilização de conjuntos de iluminação (métricas essas obtidas após a simulação de cada indivíduo);
- Com o uso do algoritmo NSGA-II (DEB et al., 2002), as aptidões multiobjetivo de cada geração de indivíduos são ordenadas utilizando os conceitos de dominância e de fronteiras de Pareto e o conceito de *crowding-distance*;
- Na última geração, o indivíduo da primeira fronteira com o melhor compromisso entre os objetivos é escolhido como solução proposta pelo algoritmo.

5.0.1 Cromossomo de tamanho variável

A solução candidata, também conhecida como o indivíduo de uma população no âmbito do algoritmo evolutivo, é representada por um conjunto de valores desconhecidos (o seu genótipo). O sistema desejado deve ser capaz de transformar essa representação em uma especificação adequada (o seu fenótipo).

O cromossomo variável proposto, é formado por um vetor principal de comprimento fixo com todas as combinações de tipos de postes e tipos de conjunto lâmpada-luminária. Cada elemento do vetor principal é associado a uma lista derivada. Essa lista tem zero, um ou muitos elementos (comprimento variável). Esses elementos representam o posicionamento do poste no projeto e o ângulo de montagem no eixo horizontal da luminária em relação ao poste conforme mostrado na Figura 29.

$$País = \left\{ \begin{array}{l} p1 = \left\{ \begin{array}{l} P_1L_1 \rightarrow [(10, 8), 0^\circ] * [(25, 13), 90^\circ] \\ P_1L_2 \rightarrow *[(22, 5), 270^\circ] [(2, 16), 180^\circ] [(2, 15), 0^\circ] \\ P_2L_1 \rightarrow * \\ P_2L_2 \rightarrow [(9, 17), 90^\circ] * \end{array} \right. \\ p2 = \left\{ \begin{array}{l} P_1L_1 \rightarrow [(2, 20), 0^\circ] [(9, 10), 270^\circ] [(1, 23), 90^\circ] * [(5, 6), 180^\circ] \\ P_1L_2 \rightarrow [(18, 5), 0^\circ] * [(21, 16), 90^\circ] [(9, 19), 90^\circ] \\ P_2L_1 \rightarrow [(12, 2), 180^\circ] * \\ P_2L_2 \rightarrow * [(8, 21), 0^\circ] [(7, 25), 270^\circ] \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Figura 30 – Cruzamento : Par de pais escolhidos (* são pontos de cruzamento).

$$Filhos = \left\{ \begin{array}{l} o1 = \left\{ \begin{array}{l} P_1L_1 \rightarrow \underbrace{[(10, 8), 0^\circ]}_{p1} \underbrace{[(5, 6), 180^\circ]}_{p2} \\ P_1L_2 \rightarrow \underbrace{[(21, 16), 90^\circ]}_{p2} [(9, 19), 90^\circ] \\ P_2L_1 \rightarrow \emptyset \\ P_2L_2 \rightarrow \underbrace{[(9, 17), 90^\circ]}_{p1} \underbrace{[(8, 21), 0^\circ]}_{p2} \underbrace{[(7, 25), 270^\circ]}_{p2} \end{array} \right. \\ o2 = \left\{ \begin{array}{l} P_1L_1 \rightarrow \underbrace{[(25, 13), 90^\circ]}_{p2} \underbrace{[(2, 20), 0^\circ]}_{p2} \underbrace{[(9, 10), 270^\circ]}_{p1} [(1, 23), 90^\circ] \\ P_1L_2 \rightarrow \underbrace{[(22, 5), 270^\circ]}_{p2} \underbrace{[(2, 16), 180^\circ]}_{p2} \underbrace{[(2, 15), 0^\circ]}_{p1} \underbrace{[(18, 5), 0^\circ]}_{p1} \\ P_2L_1 \rightarrow \underbrace{[(12, 2), 180^\circ]}_{p1} \\ P_2L_2 \rightarrow \emptyset \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Figura 31 – Cruzamento entre os pais $p1$ e $p2$ gerando os filhos $o1$ e $o2$.

5.1 Operações de cruzamento

O cruzamento é o operador genético responsável pela conversão da população para os indivíduos mais aptos. Depois de selecionar dois individuos da população pelo método do torneio como pais, percorremos os elementos de cada vetor principal e escolhemos aleatoriamente um ponto de cruzamento dentro de suas respectivas listas. Um dos descendentes vai combinar os primeiros elementos da lista de um dos pais (da esquerda para o ponto de cruzamento) com os últimos elementos das listas do outro pai (da direita para o ponto de cruzamento), respeitando a ordem do vetor principal. A Figura 30 é um exemplo de uma passagem entre os pais, gerando possíveis filhos conforme é mostrado na Figura 31.

5.2 Operações de mutação

A mutação é o operador genético responsável pela diversificação dos indivíduos possibilitando a exploração de todo o espaço de soluções. A mutação permite a mudança dos seguintes parâmetros: tipo do poste; posição de fixação do poste; ângulo de rotação do

braço do poste e conjunto de lâmpadas-luminárias. Os parâmetros são modificados de forma aleatória com 16 combinações de tipos de mutação para cada indivíduo selecionado conforme tabela 5. A porcentagem de indivíduos do total da população que passarão pelo processo de mutação é definida na aplicação cliente, sendo que o valor padrão foi definido como 15% .

Tabela 5 – Combinações de mutação : ✓, ☒ mutação realizada e não realizada respectivamente.

Tipos de combinação da mutação												
Número da combinação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	16	
Tipos de poste	☒	✓	☒	✓	☒	✓	☒	✓	☒	...	✓	
Posição de fixação do poste	☒	☒	✓	✓	☒	☒	✓	✓	☒	...	✓	
Ângulo de rotação do braço do poste	☒	☒	☒	☒	✓	✓	✓	✓	☒	...	✓	
Conjunto de lâmpada-luminária	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	✓	...	✓	

5.3 Escolha estatística da função de aptidão

Um dos fundamentos mais importantes dos AE é o cálculo da aptidão, pois ele determina a qualidade de um indivíduo como solução do problema proposto (GOLDBERG, 1989). O cálculo da aptidão retorna um valor numérico e é utilizado para a escolha dos indivíduos pela etapa de seleção dos AE.

A aptidão de um indivíduo em um determinado “ambiente” mede a sua melhor ou pior capacidade de adaptação. A adaptação do indivíduo é um importante fator apontado na teoria da seleção natural proposta por Darwin que influencia na perpetuação das espécies: os mais aptos têm maiores chances de se reproduzir e, assim, passar suas características (seus genes) para as próximas gerações (LINDEN, 2012).

Ainda segundo (LINDEN, 2012), as técnicas de seleção e avaliação em AE possuem baixo acoplamento, ou seja, um não afeta o modo como o outro trabalha. Porém, métodos refinados de avaliação podem trazer melhorias para o desempenho e eficácia do algoritmo como um todo.

AE multiobjetivos possuem a característica de otimizar dois ou mais objetivos ao mesmo tempo. Em sua função de aptidão, deve combinar duas ou mais funções objetivo e consolidá-las de modo a possibilitar o ordenamento dos indivíduos, do mais apto ao menos apto (DEB et al., 2002). A estratégia de ordenação NSGA-II é muito utilizada.

Como estudo de caso, este capítulo apresenta uma aplicação de algoritmos evolucionários multiobjetivo para a geração automática de projetos de iluminação externa.

Problemas desse tipo possuem um agravante: frequentemente, várias características desejáveis são conflitantes entre si. Por exemplo, a busca por eficiência energética pode prejudicar a qualidade de iluminação de uma área e vice-versa ou mesmo inviabilizar o atendimento do projeto às normas vigentes.

Por essas razões, iremos analisar algumas técnicas de cálculo de aptidão para problemas de iluminação de espaços externos. Serão apresentadas combinações de quatro métodos de avaliação da qualidade de iluminação e dois métodos de avaliação da economia de energia, com um total de oito variações para formulação de funções de aptidão.

A estatística possui ferramentas que podem auxiliar nesse processo de decisão, uma vez que a natureza estocástica dos algoritmos evolucionários impede comparações mais simplistas ou mesmo determinísticas. Com base nos resultados apresentados para diversas execuções de cada uma das variações de formulação para a aptidão, comparações estatísticas de médias de desempenho foram utilizadas para auxiliar no processo decisório sobre qual dessas seria a função de aptidão mais indicada. Essas comparações são possíveis a partir de testes de hipótese sobre diferença de médias (MONTGOMERY, 2011).

5.3.1 Aptidão

Um dos critérios considerados para um projeto de iluminação otimizada é a distribuição uniforme da iluminação em toda a área a ser iluminada. Nenhum ponto de pouca iluminação é desejado, devido aos padrões e questões de desconforto visual. Da mesma forma, o excesso de iluminação não é permitido, devido ao desperdício indesejado uma vez que o outro critério importante é o de economia de energia. Tópico constante nas discussões de desenvolvimento sustentável, esse critério tem sua importância tanto pelo lado econômico quanto pelo lado ambiental.

5.3.1.1 Qualidade de iluminação

Cada tipo de área externa possui uma meta ideal de iluminação ditada por normas e que influenciam o projeto. Para o caso de estudo deste trabalho, essa meta é em torno de $30lux$ (IESNA, 2000). A função de aptidão deve retornar uma melhor avaliação para os indivíduos que têm uma iluminação uniformemente distribuída em torno de $30lux$.

Para atender esses requisitos, a função de aptidão foi dividida em duas etapas. Na primeira, é realizada a avaliação da iluminância para todos os pontos discretos da área a partir de equações do método de ponto a ponto (IESNA, 2000).

A segunda etapa usa um dos quatro métodos de avaliação da qualidade de iluminação para chegar aos valores da função de aptidão. Esses métodos serão utilizados e analisados neste capítulo.

5.3.1.2 Erro

A aptidão bruta, cuja interpretação é inteiramente dependente do problema em análise, é a mais simples dos vários tipos de funções de aptidão existentes. Seu valor é o somatório das diferenças absolutas entre os valores encontrados e os respectivos valores esperados.

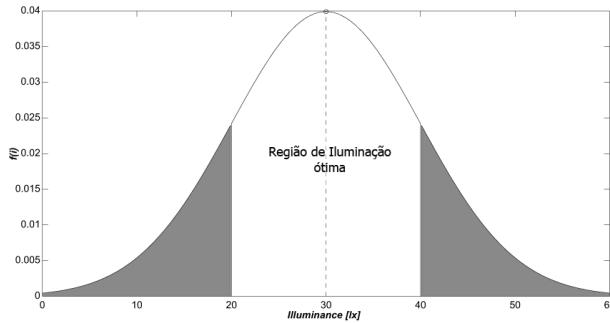


Figura 32 – Aptidão parcial em função da iluminação calculada para um determinado ponto observado.

Essa métrica precisa ser minimizada. Matematicamente, a aptidão F do indivíduo p é dada pela Equação 10.

$$F(p) = \sum_{i=1}^N |E_i - E| \quad (10)$$

5.3.1.3 Erro Quadrático

Uma alternativa à Equação 10 é o erro quadrático total (BARTLETT, 1975), dado pela Equação 11. Essa métrica precisa ser minimizada

$$F(p) = \sum_{i=1}^N (E_i - E)^2 \quad (11)$$

Para as Equações 10 e 11, N representa o número de pontos discretizados da área a ser iluminada, E_i é a iluminação obtida pelo método ponto a ponto do ponto i e E é a iluminação desejada.

5.3.1.4 Filtro “passa faixa”

Uma função similar a de uma distribuição normal, como se apresenta na Figura 32, também será analisada.

A curva apresentada na Figura 32 é dada pela equação 12.

$$f(i) = \frac{1}{2\pi\sigma} \exp\left[-\frac{(E_i - E)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (12)$$

em que $f(i)$ é a aptidão parcial de um único ponto da região de dados discretos; E_i é a iluminância calculada no ponto observado i , e é calculada pelo método ponto a ponto; E é a iluminação ideal (neste caso, 30 lux) e σ é o desvio padrão de uma distribuição normal (nesse caso, ele é obrigado a ser igual à tolerância desejada de 10 lux). Depois, todos os resultados são resumidos, conforme apresentado na Equação 13.

$$F(p) = \sum_{i=1}^N f(i) \quad (13)$$

em que $F(p)$ é a aptidão total do indivíduo p da população atual, N é o número total de pontos da área discretizada, e $f(i)$ é a aptidão de um único ponto da região. Nota-se que quanto mais pontos com nível de iluminância dentro do intervalo de 20 a 40 lux, maior é a aptidão. Essa métrica precisa ser maximizada.

Uniformidade A uniformidade é um dos principais critérios utilizados para avaliar a qualidade de uma iluminação. Ao utilizar esse critério, quanto maior for a uniformidade de uma área, melhor será a qualidade de iluminação (maximização). A uniformidade global da instalação é dada pela Equação 14.

$$U_0 = \frac{E_{min}}{E_{av}} \quad (14)$$

em que E_{min} é a iluminância mínima e E_{av} é a iluminância média da área a ser iluminada.

Economia de Energia Para trabalhar com o critério de economia de energia, duas métricas são investigadas. A primeira e mais simples entre elas é o cálculo da potência instalada. Já a segunda consiste no cálculo do índice de consumo de energia de um indivíduo tendo como base a área a ser iluminada, a iluminação média obtida, a potência instalada (calculados de acordo com o projeto a ser desenvolvido) e a eficiência energética de referência, cujo valor é dado pelas normas de iluminação (REGULAMENTO..., 2008).

Potência Instalada Essa métrica faz o cálculo da potência instalada que precisa ser minimizada, ou seja, quanto menor, mais eficiente será o cromossomo no quesito economia de energia.

$$Pow = \sum_{i=1}^T P_i \quad (15)$$

Em que Pow é a potência total instalada P_i é a potênciada unidade de iluminação i e T é o total de unidades de iluminação.

Índice de Consumo de Energia O índice de consumo de energia (ICE), usado para localizar a classe que determinada instalação pertence (Tabela I), é igual ao inverso do índice de eficiência de energia, como pode ser visto na Equação 16.

$$ICE = \frac{1}{I_\epsilon} \quad (16)$$

A avaliação da eficiência energética (I_ϵ) de uma instalação de iluminação é definida pela razão entre a sua eficiência energética e um valor de eficiência energética de referência (ϵ_R), conforme Equação 17.

$$I_\epsilon = \frac{\epsilon}{\epsilon_R} \quad (17)$$

Tabela 6 – Etiqueta de eficiência energética para uma instalação de iluminação (reproduzido a partir de (REGULAMENTO..., 2008)).

Classe energética	Índice de consumo de energia
A	$ICE < 0,91$
B	$0,91 \leq ICE < 1,09$
C	$1,09 \leq ICE < 1,35$
D	$1,35 \leq ICE < 1,79$
E	$1,79 \leq ICE < 2,63$
F	$2,63 \leq ICE < 5,00$
G	$ICE \geq 5,00$

A eficiência energética (ϵ) de uma instalação de iluminação pode ser calculada pela equação 18

$$\epsilon = \frac{A \times E_{av}}{Pow} \quad (18)$$

em que A é a área da superfície a ser iluminada [m^2]; E_{av} é a iluminância média [lx]; e Pow é o total de energia elétrica instalada [W].

5.3.1.5 Abordagem estatística

Uma abordagem estatística se faz necessária para legitimar a comparação de possíveis combinações de aptidão. Começando pela caracterização dos dados, um teste de normalidade, e.g. Kolmogorov-Smirnov (KIRBY; KARNIADAKIS, 2003), se faz necessário. O teste de Bartlett (BARTLETT, 1975) também é importante para inferir se dois conjuntos de dados seriam homoscedásticos (mesma variância) ou heteroscedásticos (variâncias distintas) entre si. O cálculo estatístico de diferença entre duas médias com variâncias desconhecidas é dado pela Equação 19, se os processos são heteroscedásticos, e pela Equação 20, se homoscedásticos.

$$IC(\mu_a - \mu_b)_{1-\alpha} = \bar{X}_a - \bar{X}_b \mp t_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{s_a^2}{n_a} - \frac{s_b^2}{n_b}}$$

$$v = \left[\frac{\left(\frac{s_a^2}{n_a} + \frac{s_b^2}{n_b} \right)^2}{\frac{(s_a^2)^2}{n_a-1} + \frac{(s_b^2)^2}{n_b-1}} \right] \quad (19)$$

$$IC(\mu_a - \mu_b)_{1-\alpha} = \bar{X}_a - \bar{X}_b \mp t_{\frac{\alpha}{2}} \times s_p \sqrt{\frac{1}{n_a} + \frac{1}{n_b}}$$

$$v = n_a + n_b - 2 \quad (20)$$

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_a - 1)s_a^2 - (n_b - 1)s_b^2}{v}}$$

Em que \bar{x}_a e \bar{x}_b são as estimativas das médias das populações a e b ; s_a^2 e s_b^2 são as variâncias amostrais de a e b ; n_a e n_b os tamanhos das amostras a e b ; v é o número de graus de liberdade da textitt-Student; $t_{\alpha/2}$ é o valor dado pela inversa da função de distribuição cumulativa (icdf) t -*Student*; e α é o nível de significância para o experimento.

Para possibilitar a análise estatística, foram definidas as seguintes variáveis de resposta: uniformidade global média dentre todas as execuções; iluminação média, índice de classe médio e consumo médio (potência instalada), esses três calculados dentre as execuções que atingiram o mínimo de uniformidade ditado pelas normas (no caso, uniformidade $\geq 0,40$).

5.3.2 Método

A comparação de diferentes métodos de avaliação de indivíduos para o algoritmo evolucionário multiobjetivo proposto irá aumentar a performance deste.

5.3.2.1 Parâmetros e dados utilizados

Note que foram utilizados 1000 indivíduos e 70 gerações nos testes a seguir.

As lâmpadas disponíveis para o A.E. possuem 100, 150, 250 e 400 Watts. Os postes têm altura entre 5, 7, 10 e 12 metros. A luminária hipotética utilizada foi apresentada na Figura 5 do capítulo 3. Deve-se ressaltar que o algoritmo evolucionário desenvolvido escolherá dentre os materiais selecionados quais serão utilizados na constituição de um indivíduo.

Para testar o impacto das variações de avaliação escolhidas no desempenho do algoritmo evolucionário, uma área desafiadora foi selecionada para estudo de caso: um dos estacionamentos privados existentes no aeroporto de Uberlândia (Brasil). Essa área possui *layout* não trivial, ou seja, irregular e com várias subáreas importantes nas quais a colocação de postes de iluminação é proibida. A Figura 33, confeccionada em três tons de cinza, apresenta o esquema simplificado dessa área: o tom mais escuro corresponde à região externa onde a iluminação não é necessária; o tom intermediário indica a área onde é permitida a fixação de postes; e o tom mais claro indica onde essa fixação é proibida.

5.3.2.2 Estudo para formulação da aptidão

Para que os testes comparativos pudessem ser realizados, foram desenvolvidas oito variações para o cálculo de aptidão multiobjetivo para o mesmo algoritmo evolucionário (ver Tabela 7), ou seja, oito aplicações foram desenvolvidas, as quais diferem na escolha de critérios.

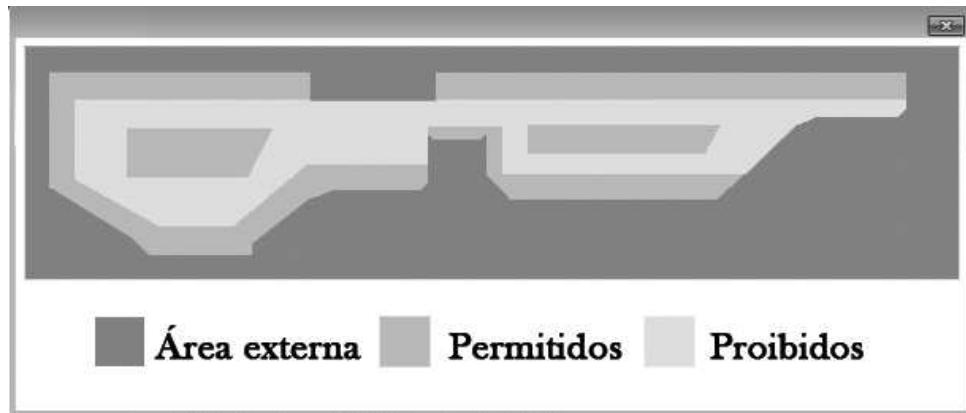


Figura 33 – Estudo de caso, estacionamento com formato irregular de $3.500m^2$.

Tabela 7 – Identificação das oito variações de aptidão (AE) relativa aos critérios qualidade de iluminação e eficiência energética.

		Eficiência energética	
		Potência Instalada	Índice de Consumo Energético
Qualidade de iluminação	ERRO	AE 01	AE 02
	ERRO QUADRÁTICO	AE 03	AE 04
	GAUSSIANA	AE 05	AE 06
	UNIFORMIDADE	AE 07	AE 08

5.3.2.3 Seleção do melhor indivíduo

Um algoritmo evolucionário usando NSGA-II não encontra um “melhor” indivíduo, mas sim um conjunto de melhores indivíduos com compromissos diferentes de desempenho em cada um dos dois critérios (qualidade de iluminação e eficiência energética). Esse conjunto é chamado de primeira fronteira (DEB et al., 2002) devido à teoria de soluções ótimas de Pareto. Observa-se, para um determinado problema, a existência de um número infinito de soluções que se encaixam na definição de Pareto ótimo (ou soluções não dominadas). No entanto, para o sistema desenhado pelos autores para a construção automatizada de projetos de iluminação exterior, optou-se pela sugestão de uma melhor solução como projeto final, em vez de apresentar todas as soluções na primeira fronteira como em outras aplicações que utilizam dominância de Pareto.

Uma métrica foi desenvolvida para integrar o desempenho em todos os critérios. Nota-se que essa métrica de desempenho global é aplicada apenas aos indivíduos (soluções de projeto) presentes na primeira fronteira ao final de cada execução do algoritmo evolucionário proposto. A métrica, apresentada nas Equações 21 e 22, pode ser utilizada em

problemas com critérios concorrentes (minimização e maximização).

$$A_v(i) = \frac{\min(F^1(1 : N))}{F^1(i)} + \frac{\min(F^2(1 : N))}{F^2(i)} \quad (21)$$

$$A_v(i) = \frac{F^1(N)}{\max(F^1(1 : N))} + \frac{\min(F^2(1 : N))}{F^2(i)} \quad (22)$$

onde $A_v(i)$ é a métrica proposta aplicada ao indivíduo i ; $F^1(i)$ é a aptidão do indivíduo i para o critério de qualidade de iluminação; $F^2(i)$ é a aptidão do indivíduo i para o critério de eficiência energética; $\max(F^1(1 : N))$ é a máxima aptidão F^1 encontrada entre os N indivíduos que pertencem à primeira fronteira; $\min(F^1(1 : N))$ e $\min(F^2(1 : N))$ são as mínimas aptidões F^1 e F^2 , respectivamente, encontradas entre os N indivíduos que pertencem à primeira fronteira.

As variações *AE 01*, *AE 02*, *AE 03* e *AE 04* trabalham com a Equação 21, pois tentam minimizar os dois objetivos do algoritmo evolucionário. Já as variações *AE 05*, *AE 06*, *AE 07* e *AE 08* utilizam a Equação 22, pois tentam maximizar um dos objetivos e minimizar o outro.

5.3.3 Resultados e discussão

Para obter os resultados, cada aplicação foi executada 161 vezes, sendo a primeira execução de cada algoritmo descartada. Os dados obtidos após as execuções foram: o percentual dos casos em que o AE conseguiu uma uniformidade global maior ou igual a 0,40; a uniformidade global média de todas as execuções; o consumo médio (potência instalada), o erro absoluto em relação à iluminação média desejada (neste caso, 30 lux) e o índice de eficiência energética das execuções dos casos com a uniformidade global média maior ou igual a 0,40. Os resultados obtidos são apresentados na TABELA 8

A TABELA 9 apresenta os desvios padrão da uniformidade (todas as execuções), do consumo, do erro absoluto referente à iluminação ideal e do índice de eficiência energética (os três últimos para as execuções que conseguiram uma uniformidade global igual ou superior a 0,40).

Observando os dados obtidos na TABELA 8, algumas variações podem ser descartadas. Devido ao baixo desempenho para conseguir respostas que satisfaçam o mínimo exigido em normas, *AE 01* pode ser descartada (somente 16% das execuções atingiram o mínimo). *AE 07* e *AE 08* também foram descartadas devido ao seu altíssimo consumo em relação ao das outras variações. Na média, o consumo de *AE 07* é aproximadamente o dobro das demais e o de *AE 08* é aproximadamente o triplo.

Após os descartes, têm-se que somente *AE 02*, *AE 03*, *AE 04*, *AE 05* e *AE 06* são objetos de análise. Essas variações conseguiram uma iluminação média muito próxima da desejada, isto é, menos de 1 lux na média e no desvio padrão do erro absoluto, o que poderia ser classificado como desprezível para o conforto visual de seres humanos. Logo,

Tabela 8 – Respostas médias calculadas após 160 execuções de cada variação.

	Todas execuções		Execuções que atingiram a meta		
	Alcançam a meta	Uniformidade média	Consumo	Erro Absoluto	Índice
			médio	médio (ref. 30 lux)	de classe médio
<i>AE 01</i>	16%	0,13	2606 W	0,51 lux	1,28
<i>AE 02</i>	65%	0,42	2615 W	0,96 lux	1,28
<i>AE 03</i>	54%	0,38	2548 W	0,85 lux	1,31
<i>AE 04</i>	56%	0,41	2579 W	0,89 lux	1,29
<i>AE 05</i>	65%	0,42	2507 W	1,04 lux	1,32
<i>AE 06</i>	50%	0,38	2542 W	1,15 lux	1,31
<i>AE 07</i>	56%	0,46	5889 W	44,77 lux	1,39
<i>AE 08</i>	100%	0,71	8812 W	83,58 lux	10,11

Tabela 9 – Desvio padrão calculado após 160 execuções de cada variação.

	Todas execuções		Execuções que atingiram a meta	
	Uniformidade		Consumo	Erro Absoluto
			(ref. 30 lux)	Índice de classe
<i>AE 01</i>	16%	0,13	2606 W	0,51 lux
<i>AE 02</i>	65%	0,42	2615 W	0,96 lux
<i>AE 03</i>	54%	0,38	2548 W	0,85 lux
<i>AE 04</i>	56%	0,41	2579 W	0,89 lux
<i>AE 05</i>	65%	0,42	2507 W	1,04 lux
<i>AE 06</i>	50%	0,38	2542 W	1,15 lux
<i>AE 07</i>	56%	0,46	5889 W	44,77 lux
<i>AE 08</i>	100%	0,71	8812 W	83,58 lux

a iluminação média deixa de ser uma variável de resposta útil para comparações. Elas obtiveram ainda bons resultados nos respostas médias de uniformidade global, consumo de energia e índice de eficiência energética, o que dificulta uma comparação visual simples.

Por apresentarem desempenhos experimentais próximos, o uso do método estatístico de diferença entre duas médias (MONTGOMERY, 2011) foi indicado para determinar qual AE apresenta evidências estatísticas de melhor desempenho em cada resposta. Como as respectivas respostas analisadas por este trabalho passaram no teste de *Kolmogorov-Smirnov* para detecção de normalidade dos dados, esse método se torna viável. O intervalo de confiança de 95% foi considerado, gerando um nível de significância $\alpha = 0,05(1 - 0,95)$.

Algoritmo 1 Construção de tabelas de comparação

- 1: Inicialize a população
 - 2: **while** a condição de parada não é atingida **do**
 - 3: Calcule a aptidão de cada indivíduo da população
 - 4: Selecione os pais
 - 5: Execute o cruzamento
 - 6: Execute a mutação
 - 7: Avalie os resultados
 - 8: Selecione os sobreviventes para compor a nova geração
 - 9: **end while**
-

Utilizando as Equações 19 e 20 e as Tabelas 8 e 9 com os dados integralizados dos experimentos, foram geradas as Tabelas VII, VIII e IX. A construção dessas tabelas basearam-se na aplicação do Algoritmo 1 aos valores de uniformidade, consumo e índice de eficiência energética (as variáveis de resposta) presentes nas Tabelas 8 e 9.

Os valores das tabelas possuem os seguintes significados para cada um dos quesitos analisados:

- 1 : O AE da linha é maior que o AE da coluna;
- 1: O AE da linha é menor que o AE da coluna;
- 0: Não temos evidências estatística que suportem afirmar que o AE da linha é diferente do AE da coluna, com 95% de confiança.

Para a Tabela 10, as melhores avaliações devem ser dos AE que apresentam o menor valor e para as Tabelas 11 e 12 as melhores avaliações são dos AE que apresentam os maiores valores.

No contexto de dominância de Pareto, um elemento domina outros se ele for melhor que os demais em um critério e não for pior que eles em nenhum dos outros critérios. Esse conceito foi estendido para o que será chamado de “dominância estatística” de Pareto.

Na dominância estatística de Pareto, dado duas soluções a e b , diz-se que a domina b ($a \prec b$) com certa confiança se as seguintes condições forem satisfeitas:

Tabela 10 – Comparação entre os algoritmos evolucionários no critério consumo médio (Minimização).

CONSUMO MÉDIO	<i>AE 02</i>	<i>AE 03</i>	<i>AE 04</i>	<i>AE 05</i>	<i>AE 06</i>
<i>AE 02</i>	0	1	1	1	1
<i>AE 03</i>	-1	0	-1	1	0
<i>AE 04</i>	-1	1	0	1	1
<i>AE 05</i>	-1	-1	-1	0	-1
<i>AE 06</i>	-1	0	-1	1	0

Tabela 11 – Comparação entre os algoritmos evolucionários no critério uniformidade global (Maximização).

UNIFORMIDADE GLOBAL	<i>AE 02</i>	<i>AE 03</i>	<i>AE 04</i>	<i>AE 05</i>	<i>AE 06</i>
<i>AE 02</i>	0	1	1	-1	1
<i>AE 03</i>	-1	0	-1	-1	1
<i>AE 04</i>	-1	1	0	-1	0
<i>AE 05</i>	1	1	1	0	1
<i>AE 06</i>	-1	-1	0	-1	0

Tabela 12 – Comparação entre os algoritmos evolucionários no critério de eficiência energética (Maximização).

ÍNDICE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	<i>AE 02</i>	<i>AE 03</i>	<i>AE 04</i>	<i>AE 05</i>	<i>AE 06</i>
<i>AE 02</i>	0	-1	-1	-1	-1
<i>AE 03</i>	1	0	1	-1	0
<i>AE 04</i>	1	-1	0	-1	-1
<i>AE 05</i>	1	1	1	0	0
<i>AE 06</i>	1	0	1	0	0

Tabela 13 – Dominância estatística de Pareto aplicada aos dados das tabelas 10, 11 E 12.

VARIAÇÕES DE APTIDÃO	QUANTOS DOMINA	QUAIS SÃO POR ELA DOMINADOS
<i>AE 02</i>	1	\emptyset
<i>AE 03</i>	1	<i>AE 06</i>
<i>AE 04</i>	2	\emptyset
<i>AE 05</i>	0	<i>AE 02, AE 03, AE 04, AE 06</i>
<i>AE 06</i>	2	<i>AE 04</i>

Tabela 14 – Classificação nas fronteiras de Pareto.

FRONTEIRA	ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS
01	<i>AE 05</i>
02	<i>AE 02, AE 03</i>
03	<i>AE 06</i>
04	<i>AE 04</i>

- podemos afirmar pelos indícios estatísticos que a solução *a* é superior a *b* em pelo menos um critério;
- não existe evidência estatística de que a solução *a* é diferente da solução *b* para os demais critérios.

Aplicando os conceitos da dominância estatística de Pareto aos dados das Tabelas 10, 11 e 12 encontram-se os dados presentes na Tabela 13. Para cada variação estudada, têm-se quantas outras a domina e quais são por ela dominadas.

Aplicando o conceito de *fast non-dominated sort* aos dados da Tabela 13, foi construída a Tabela 14 que classifica as variações de aptidão multiobjetivo nas suas respectivas fronteiras de Pareto.

Dessa maneira, percebe-se que o ***AE 05***, cuja função de aptidão multi-objetivo é composta pela equação do tipo gaussiana (qualidade de iluminação) e pela somatória das potências instaladas de todas as fontes de iluminação (economia de energia), possui fortes evidências estatísticas de que é a que possibilita gerar os melhores resultados, com 95% de confiança.

5.4 Considerações finais do capítulo

O núcleo do sistema proposto (núcleo do algoritmo evolutivo) é uma variante dos algoritmos genéticos (apresentado em (HOLLAND, 1975; GOLDBERG, 1989)) alterando a ideia de representação dos indivíduos. Na representação tradicional, o indivíduo é constituído de vetores de tamanho constante, já em nossa proposta um novo cromossomo é utilizado, bem como novos operadores genéticos apropriados, a fim de manter a estrutura do projeto moldável ao ser iniciado, robusto contra modelos inválidos e genéricos, possibilitando ao usuário diferentes opções. O indivíduo é representado por um vetor de listas, que é a estrutura de dados que representa o genótipo do candidato para o projeto desejado.

Foi apresentado um método de avaliação estatístico (diferença de médias) que possibilitou a comparação de diferentes funções de aptidão no desempenho de um algoritmo evolucionário multiobjetivo para projetos automatizados de iluminação externa.

A progressão da pesquisa apresentada na presente tese baseia-se nos resultados mostrados neste capítulo. Com isso, foi possível a escolha consciente do método de avaliação de aptidão mais propício para melhorar o desempenho do algoritmo proposto.

Dentre as variações propostas, o método utilizado apresenta evidências estatísticas suficientes para indicar, com 95% de confiança, a melhor combinação multiobjetivo: qualidade de iluminação a partir de função do tipo gaussiana e eficiência energética com base na contabilização de potência instalada.

Foi apresentado, também, o conceito de *dominância estatística de Pareto* que, integrado aos intervalos de confiança para diferenças de médias, mostrou-se efetivo no auxílio do processo decisório para formulação da função de aptidão mais indicada ao problema apresentado.

CAPÍTULO 6

Aplicação em caso de estudo para a análise de viabilidades

Os fabricantes de luminárias normalmente fornecem as curvas fotométricas relacionadas aos seus catálogos de produtos. Alguns deles também fornecem através do seu site os arquivos de dados fotométricos relacionadas no formato IES. Usando os dados fotométricos a partir de uma luminária específica, a iluminação de qualquer ponto no plano de trabalho pode ser calculada. Na verdade, esses arquivos fornecem valores de intensidade luminosa em vários ângulos discretos, mas é possível calcular um valor para um ângulo intermediário utilizando estratégias de interpolação.

Para evitar interpolações e, como parte dos esforços de simplificação, um único tipo de luminária hipotética foi considerado nesta fase da pesquisa, concebido como uma luminária para iluminação direta (100% de sua produção é direcionada para o plano inferior). A distribuição da intensidade luminosa tem a forma de uma esfera, podendo ser descrita por uma função contínua. Analisando planos de trabalhos paralelos podemos dizer que a luminária hipotética tem uma distribuição da intensidade luminosa isotrópica. Nos planos perpendiculares ao plano de trabalho ela tem a aparência de um círculo. A curva fotométrica IES para esta luminária hipotética é mostrada na figura 34.

Quando montamos um lâmpada nesta luminária hipotética, sua respectiva Intensidade

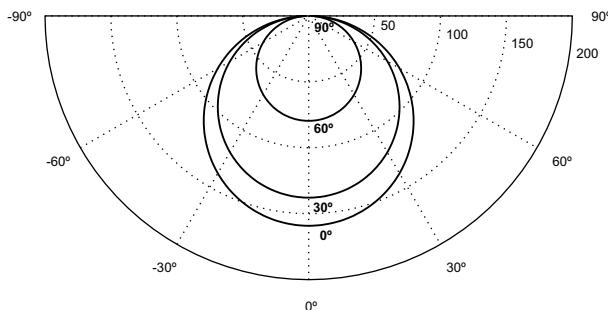


Figura 34 – Curva fotométrica da luminária isotrópica, unidade em cd/1000 lm.

luminosa I , em candelas, são dadas em função do ângulo γ .

$$I(\gamma, \phi) = \frac{\Phi}{4\pi} \left(\frac{1 + \cos 2\gamma}{\cos \gamma} \right) \quad (23)$$

onde Φ é o fluxo luminoso em lumens ; γ é o ângulo vertical; e ϕ é o ângulo horizontal. Note que I é independente de ϕ , Ou seja, é isotrópica através dos planos paralelos a uma área iluminada. A intensidade luminosa máxima ocorre na direção do foco da luminária, ou seja onde $\gamma = 0^\circ$ rad, uma vez que a luminária hipotética só poderá ser instalada paralela ao chão.

6.1 Parâmetros do algoritmo evolucionário

Para executar o sistema, os seguintes parâmetros são sugeridos por padrão, sendo que alguns podem ser modificados por usuários experientes em algoritmos evolucionários.

- ❑ Modelo paralelo: de Granularidade Grossa (também conhecido como modelo de ilhas);
- ❑ Modelo de migração: aleatório (todas as ilhas ligadas) - taxa de migração de 1% ocorrendo a cada 10 gerações;
- ❑ Probabilidade de cruzamento : 85%;
- ❑ Probabilidade de mutação : 15% ;
- ❑ Máximo número de gerações: 50;
- ❑ Tamanho da população : 20.000 (dividido em 500 indivíduos por ilha) ;
- ❑ Estratégia de classificação da aptidão: *crowding distance* dos indivíduos não dominados. ;
- ❑ Estratégia de seleção dos pais: Torneio com 1% dos indivíduos (Mínimo de 5 indivíduos) ;;
- ❑ Estratégia de redução dos indivíduos: Sobrevivência dos melhores indivíduos.

6.2 Resultados e discussão

Esta seção apresenta alguns resultados. Serão utilizadas duas áreas distintas com o objetivo de validar os projetos gerados pelo sistema proposto.

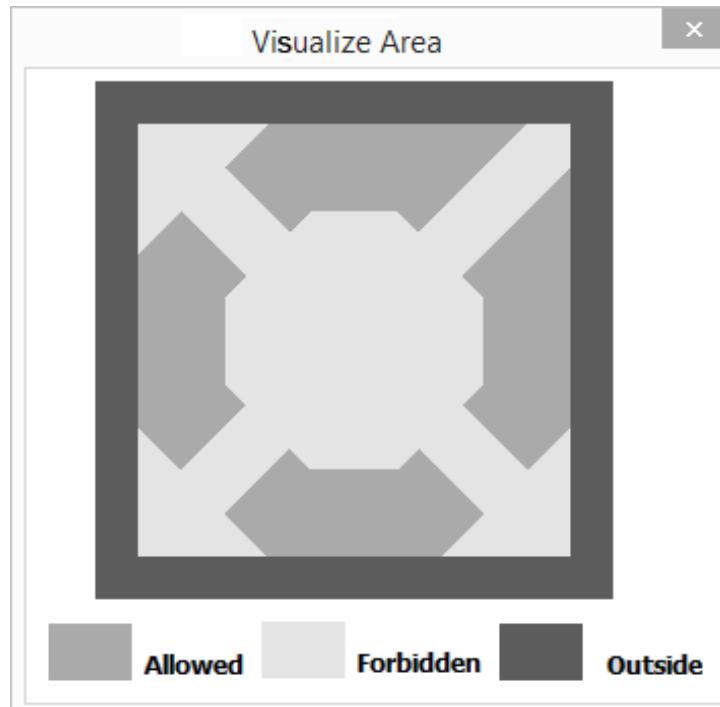


Figura 35 – Uma área quadrada de $1,600\text{ m}^2$ para ser iluminada.

6.2.1 Exemplo simples

Um exemplo simples é mostrado aqui, uma área externa de 1600m^2 ($40 \times 40\text{m}$) a ser iluminada conforme apresentado na Figura 35. O objetivo é iluminar dentro da área de interesse (minimizando a área externa que é mostrado em cinza escuro) e respeitando as normas de iluminação e os locais onde podem ser fixadas os postes de iluminação. Neste caso na área cinza clara não pode haver a fixação de postes, devendo todos eles serem fixados na área cinza.

Para fazer o projeto automatizado de iluminação exterior, foram utilizados dois métodos para efeito de comparação: o método dos lúmens e o do sistema proposto. Note-se que o método dos lúmens é um método para fontes de luz equidistante em uma dada área regular. O resultado deste processo pode ser visto como o posicionamento ideal para um conjunto de postes de iluminação dentro de zonas regulares, assumindo que toda a área está disponível para instalar as fontes de luz. O sistema ELCAutoD-EA tem uma vantagem óbvia em relação ao método dos lumens: o primeiro vai sempre respeitar restrições relacionadas ao posicionamento dos postes enquanto o ultimo não.

O método dos lumens foi aplicado na área de interesse ignorando as restrições relacionadas ao posicionamento das fontes de luz. Como estamos trabalhando com áreas externas, a reflexão da luz na parede, teto e chão foram ignoradas (taxas de reflexão igual a zero) (IESNA, 2000). O índice K do ambiente foi calculado utilizando a Equação (1) do capítulo 3 .

$$K = \frac{40 \cdot 40}{10 \cdot (40 + 40)} = 2$$

onde a área tem comprimento e largura igual a 40m; e a altura do poste é de 10m.

De acordo com a Tabela 1 do capítulo 3, para uma $K = 2$, o fator de utilização $U = 0.5$. Note-se que tanto o fator de manutenção MF e o fator do reator BF são ignoradas (considerados iguais a 1), o que significa uma instalação recentemente instalada usando reatores de referência. A opção de ignorar estes elementos não causa perdas na comparação, uma vez que também são ignoradas quando se utiliza o sistema proposto.

Finalmente, utilizando como referência a Equação (2) do capítulo 3, o número indicado de fontes de luz necessária para iluminar esta área deve ser:

$$Nl = \frac{30 \cdot 1,600}{10,200 \cdot 0.5} = 9.4$$

onde a iluminância média desejada é de 30lx (como indicado pelas normas); e as lâmpadas consideradas fornecem 10.200lm cada.

O método aplicado sugere uma distribuição equidistante de 9,4 fontes de luz. Levando em Consideração que a área de interesse é um quadrado, a melhor possibilidade neste caso, é o arredondado para baixo utilizando 9 fontes luminosas. Isto significa colocar três linhas com três postes cada de forma equidistante. A curva isolux resultante é mostrada na Figura 36. Algumas métricas de comparação para este projeto são apresentados como parte da Tabela 15.

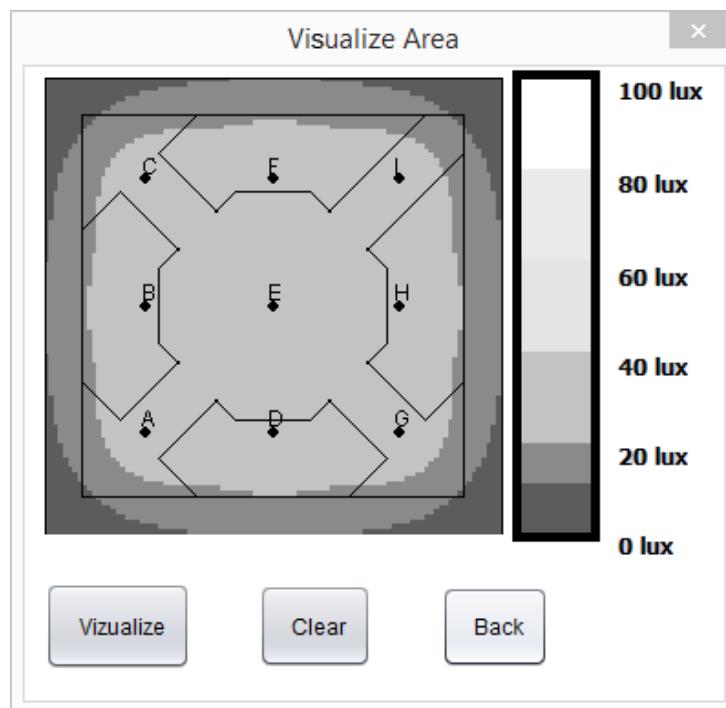


Figura 36 – Curva isolux orientada pelo método dos lumens. Observa-se que existem alguns postes de iluminação colocados em áreas proibidas.

O método dos lumens não é utilizado para áreas com formato irregular (não retangulares). Além disso, nota-se que na Figura 36 que as fontes de iluminação identificados pelas letras *A*, *C*, *E*, *G*, e *I* foram colocadas em áreas proibidas.

ELCAutoD-EA O usuário do sistema proposto pode incluir ou modificar dados básicos que incluem a altura dos postes, luminárias (com suas respectivas curvas fotométricas) e o a área onde deve ser construído o projeto de iluminação (incluindo sub áreas que podem ser colocados postes e onde isso é proibido). Nota-se que neste momento da pesquisa, o sistema funciona com uma curva fotométrica isotrópica.

Os dois objetivos que queremos otimizar é a iluminação uniforme e a eficiência energética. O sistema proposto funciona com os parâmetros padrões apresentados ao longo Seção 6.1. A única diferença é que para permitir uma melhor comparação entre os dois métodos, foi adicionado ao sistema apenas um conjunto contendo postes de 10 metros e lâmpadas de 100 Watts. (referido na tabela 19), Os mesmos utilizados pelo método dos lúmens.

A curva isolux resultante é mostrada na Figura 37. A tabela 15 contém algumas medidas de qualidade para comparar os dois resultados (método dos lúmen e o sistema proposto), mesmo desconsiderando a vantagem óbvia do ELCAutoD-EA em respeitar restrições de posicionamento dos postes.

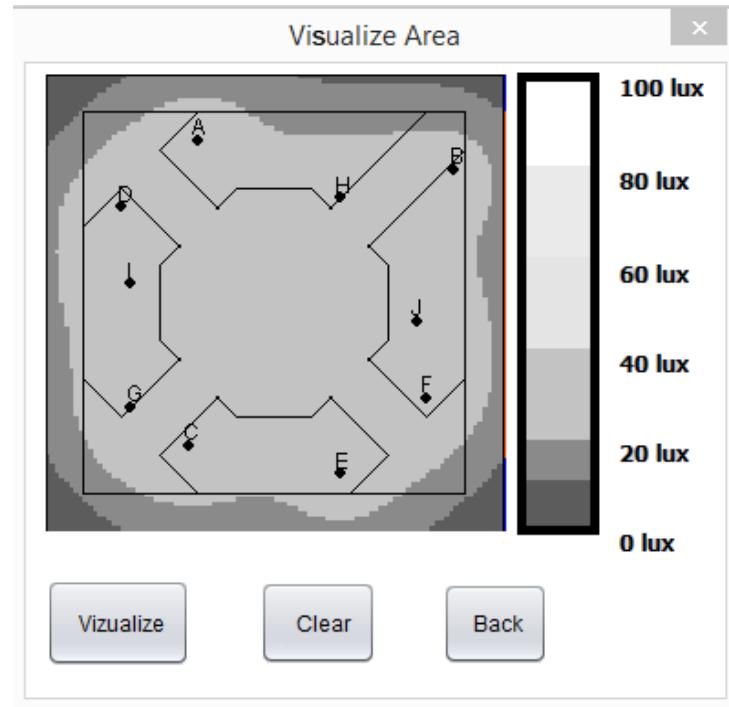


Figura 37 – Curva Isolux desde o projeto construído pelo ELCAutoD-EA.

Os dois métodos não alcançaram a média desejada de $30lx$, mas conseguiram respeitar as normas. Além disso, ambos atingiram classe energética A. Se considerarmos que o método dos lumens nos dá o compromisso ideal entre a luminosidade média desejada e

Tabela 15 – Comparação entre o método dos lumens e o ELCAutoD-EA (melhores valores de cada coluna em negrito).

Projetado por	Potência instalada consumo	Média iluminância	Uniformidade U_0	Uniformidade U_g	Energia classe
Método dos Lumens	0.9 kW	26.85 lx	0.40	0.29	A (0.63)
ELCAutoD-EA	1.0 kW	26.40 lx	0.47	0.35	A (0.78)

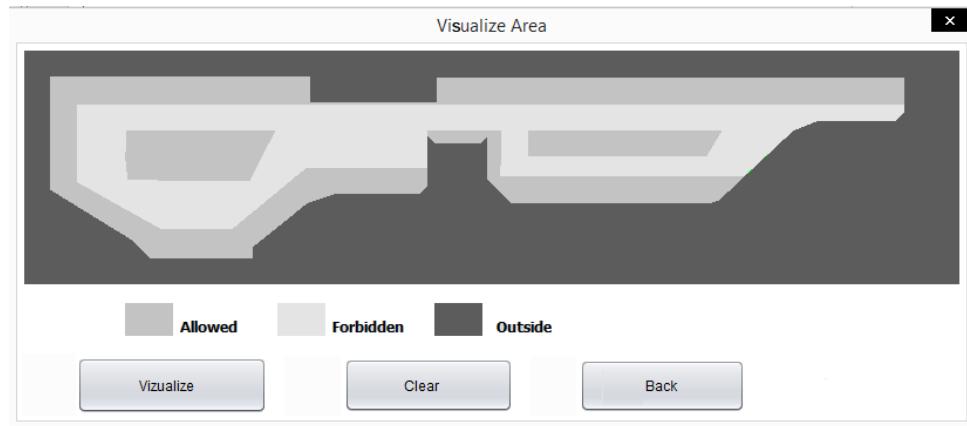


Figura 38 – Caso de estudo, Layout simplificado de um estacionamento de formato irregular $3,550 m^2$ ($160 \times 30 m$, no geral).

consumo eficiente de energia elétrica, o sistema proposto conseguiu um bom desempenho, pois utiliza apenas 11,1% a mais de energia para garantir uma uniformidade global 17,5% melhor(20,7% melhor em relação a uniformidade geral) respeitando as subáreas onde não é permitido o posicionamento de postes de iluminação (parte de restrições geométricas). Podemos dizer que ELCAutoD-EA conseguiu de fato um bom desempenho.

É importante notar que ambos os projetos automatizados (considerando o método dos lumens com um certo nível de automação) depois de gerados, podem ser melhorados com a interferência de um engenheiro especializado.

6.2.2 Áreas com formato irregular

Para testar a eficácia do sistema de ELCAutoD-EA, uma área desafiadora foi selecionada como estudo de caso. Um dos estacionamentos privados disponíveis no aeroporto de Uberlândia (Brasil) tem um textitlayout irregular e tem várias subáreas importantes onde a colocação de postes de iluminação é proibida. A Figura 38 apresenta o esquema da área simplificado. Em cinza escuro é a área externa (não sujeito a iluminação). Em cinza, as subáreas onde os postes de iluminação podem ser colocados. Em cinza claro, a subáreas onde postes de iluminação são proibidas.

A comparação é feita entre a instalação atual e o projeto gerado pelo sistema pro-

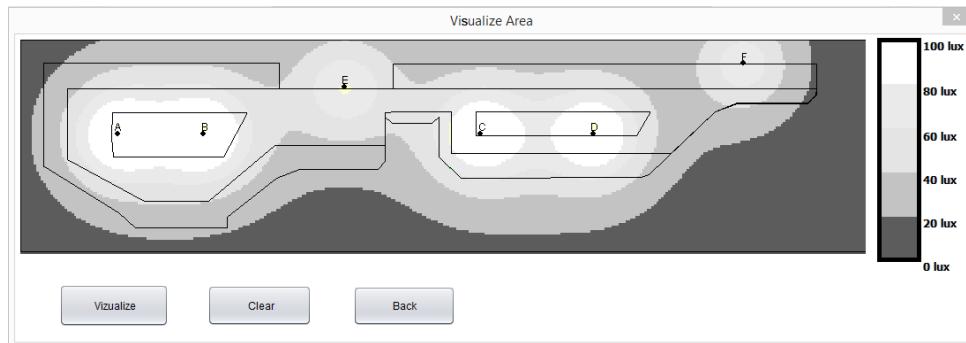


Figura 39 – Curva Isolux do projeto de iluminação exterior realizado por engenheiro especializado.

posto que utiliza algoritmos evolutivos. O verdadeiro projeto de iluminação exterior foi desenvolvido por um engenheiro especializado e experiente, com a ajuda de sistemas de *software* comerciais disponíveis, sendo mostrado na Figura 39 a curva isolux do projeto. Note-se que a curva fotométrica das luminárias foram alteradas para se ajustar a distribuição isotrópica utilizada nesta pesquisa, para efeito de comparação. O projeto utiliza seis postes de iluminação (todos com 12 m de altura), onde 4 deles tem três lâmpadas de 250 W cada e os outros dois que tem duas lâmpadas de 250 W cada.

Mais uma vez, o sistema proposto, tem os parâmetros apresentados na Seção 6.1. Para este estudo de caso, as alturas de postes de 4, 7, 10 e 12 m estavam disponíveis, bem como as luminárias cujas lâmpadas são listadas na Tabela 19. O fluxograma do algoritmo evolutivo (usando NSGA-II) foi apresentado na Figura 12 do capítulo 3. Após a execução do algoritmo evolutivo é formado um conjunto de Pareto com as melhores soluções em relação à uniformidade da iluminação e à eficiência energética. Este conjunto é chamado de primeira fronteira. O projeto vencedor que é apresentado ao usuário corresponde ao melhor cromossomo da primeira fronteira de acordo com a métrica de desempenho geral (apresentado na Seção 5.3.2.3) Para este estudo de caso, o projeto de iluminação exterior produzido pelo algoritmo evolutivo é mostrado na Figura 40.

O projeto gerado pelo algoritmo evolutivo utiliza 18 postes de iluminação com alturas de 10 e 12 m. Cada um tem uma única lâmpada de 100 W ou 150 W. A listagem completa com todos os dados do projeto gerado é mostrado na Tabela 16.

Mesmo argumentando que uma alta iluminação poderia ser bem recebida pelos usuários do estacionamento, deve-se lembrar que o objetivo da norma é garantir um bom nível de visualização para um determinado tipo de área. Nesta perspectiva, o projeto gerado por algoritmos evolutivos é melhor pois conseguiu uma média mais próxima ao desejado. Além disso, com relação à eficiência energética e a uniformidade, o sistema proposto utiliza 37,5% a menos de energia elétrica para garantir uma uniformidade 227,3% melhor (466,7% melhor, em relação a uniformidade geral) como pode ser visto na Tabela 17.

Note-se que a resposta gerada pelo sistema ELCAutoD-EA pode ser melhorada por um engenheiro especializado. Este caso ocorre principalmente quando existe a necessidade

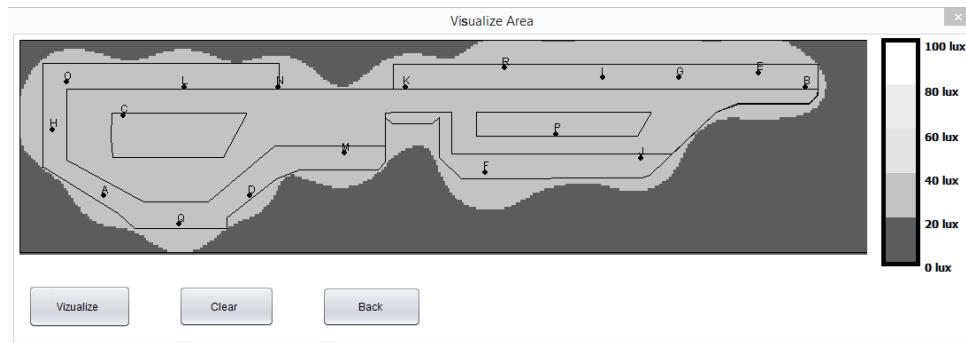


Figura 40 – Curva Isolux de um projeto de iluminação exterior evoluído pelo sistema ELCAutoD-EA

Tabela 16 – Listagem dos postes de iluminação disponíveis para o CAutoD.

ID	Lâmpada para a luminária	Poste Altura	Posicionamento coordenadas
A	NAV-E 100W SUPER 4Y	10 m	(18.0,12.0)
B	NAV-E 100W SUPER 4Y	10 m	(167.0,35.0)
C	NAV-E 100W SUPER 4Y	12 m	(22.0,29.0)
D	NAV-E 100W SUPER 4Y	12 m	(49.0,12.0)
E	NAV-E 150W SUPER 4Y	10 m	(157.0,38.0)
F	NAV-E 150W SUPER 4Y	10 m	(99.0,17.0)
G	NAV-E 150W SUPER 4Y	12 m	(140.0,37.0)
H	NAV-E 150W SUPER 4Y	12 m	(7.0,26.0)
I	NAV-E 150W SUPER 4Y	12 m	(124.0,37.0)
J	NAV-E 150W SUPER 4Y	12 m	(132.0,20.0)
K	NAV-E 150W SUPER 4Y	12 m	(82.0,35.0)
L	NAV-E 150W SUPER 4Y	12 m	(35,35)
M	NAV-E 150W SUPER 4Y	12 m	(69.0,21.0)
N	NAV-E 150W SUPER 4Y	12 m	(55.0,35.0)
O	NAV-E 150W SUPER 4Y	12 m	(10.0,36.0)
P	NAV-E 150W SUPER 4Y	12 m	(114.0,25.0)
Q	NAV-E 150W SUPER 4Y	12 m	(34.0,6.0)
R	NAV-E 150W SUPER 4Y	12 m	(103.0,39.0)

Tabela 17 – Comparação entre o projeto construído pelo engenheiro e pelo sistema ELCAutoD-EA (melhores valores de cada coluna em negrito).

Projetado por	Potência instalada consumo	Média iluminância	Uniformidade U_0	Uniformidade U_g	Energia classe
Engenheiro de iluminação ELCAutoD-EA	4.0 kW 2.5 kW	66.64 lx 27.44 lx	0.22 0.72	0.09 0.51	A (0.54) A (0.78)

Tabela 18 – *Speed-ups conseguido através de um cluster em relação a um computador com um núcleo para o projeto automatizado de iluminação exterior do estacionamento do aeroporto de Uberlândia (Brasil).*

1 núcleo		40 núcleos		<i>Speed-up</i>
Individual/núcleo	Tempo de execução [s]	Individual/núcleo	Tempo de execução [s]	
2000	2738.7	50	44.88	≈ 61×
3000	4782.4	75	68.10	≈ 70×
4000	8057.9	100	98.12	≈ 82×

de ajustar o posicionamento dos postes devido a fins estéticos.

6.2.3 Cluster, programação paralela e speed-up

Como um problema NP-Difícil, existe muitos benefícios na parallelização da otimização de multi-critérios simultaneamente, em especial quando se utiliza algoritmos evolucionários através do modelo de ilhas para alcançar *speed-up* supra-lineares (COLLET; KRÜGER; MAITRE, 2013).

A tabela 18 apresenta os *speed-ups* alcançados ao usar um *cluster* de computadores em contraste a utilização de uma única máquina com um núcleo. Como pode ser visto, o aumento da velocidade justifica a utilização do *cluster*. Nota-se que, nesta tabela, está faltando os parâmetros efetivamente utilizados no estudo de caso, porque não há memória disponível para executar 20.000 indivíduos em uma única máquina com um núcleo (500 indivíduos por ilha / núcleos usados no estudo de caso). Além disso, a velocidade teórica de *speed-up* de 40 *times* foi ultrapassada por ensaios experimentais.

Como uma aproximação, ou seja, considerando memória RAM suficiente, se o estudo de caso pudesse ser executado em uma única máquina com um núcleo e a adoção de uma regressão exponencial, o tempo de execução para 20.000 indivíduos levaria mais de 26 horas, enquanto que com 500 indivíduos por núcleo cluster a execução de 70 gerações terminaria em menos de 8 minutos. Como uma aproximação grosseira, uma regressão logarítmica aplicada ao *speed-up* mostra um aumento esperado de velocidade de aproximadamente 128× para o estudo de caso real, se comparado com a execução em um único núcleo.

6.3 Considerações finais do capítulo

Este trabalho apresenta a primeira versão do sistema ELCAutoD-EA, uma aplicação que permite realizar projetos automatizados de iluminação exterior por computador. Com o objetivo de preencher a lacuna existentes em relação a inteligência computacional nos

programas destinados a profissionais de engenharia de iluminação. Este trabalho poderá ser visto como um sistema especialista não-trivial bem sucedido. ELCAutoD-EA implementa um algoritmo evolutivo para funcionar como um sistema especialista para projetos de iluminação. Com base em diferentes entradas do usuário, este sistema apresenta uma estrutura maleável que lhe permite lidar com diferentes restrições, respeitar todas as normas aplicáveis e otimizar compromisso entre os critérios opostos (baixo consumo de energia e alta qualidade de iluminação).

Um exemplo simples foi mostrado, com o objetivo de iluminar uma área de formato retangular (um quadrado). Para comparar o desempenho do sistema proposto, os autores aplicaram o método clássico dos lúmens a esta área, a fim de alcançar o compromisso ideal entre a luminosidade média desejada e consumo de energia. Depois, algumas sub-áreas foram definidas onde o posicionamento do poste de iluminação é proibida. O sistema ELCAutoD-EA alcançou automaticamente um projeto que usa 11,1% mais energia do que o projeto obtido pelo método dos lúmens e garante uma uniformidade global a 17,5% superior. Note-se que o projeto proposto respeita restrições quanto à colocação dos postes de iluminação.

Como estudo de caso, uma área do mundo real (um parque de estacionamento do aeroporto de Uberlândia) foi escolhido. O *layout* da área é irregular e tem várias restrições quanto à colocação de postes de iluminação. O método de lúmen não poderia lidar com este caso, a instalação da iluminação foi projetada por um engenheiro especializado usando sua experiência e alguns simuladores para ajudar com a visualização da iluminação final. O sistema ELCAutoD-AE foi usado para fornecer um projeto alternativo. Ao comparar os dois modelos, o sistema proposto conseguiu uma iluminação média mais próxima das normas, enquanto o projeto implementado não o fez. Além disso, sobre a eficiência energética e uniformidade, o projeto proposto utiliza 37,5 % menos energia elétrica para garantir uma uniformidade global 227,3 % melhor. Foram alcançados uma iluminação mais uniforme e uma maior eficiência energética. A melhor qualidade de iluminação só é possível porque o sistema proposto resolve problemas de otimização multiobjetivos, o que significa que o sistema evita desperdícios de energia que muitas vezes não são claras para um engenheiro de iluminação no comando de um determinado projeto.

CAPÍTULO 7

Aplicações com elementos disponíveis comercialmente

7.1 Introdução

Como resposta aos dados inicialmente colocados pelo usuário do sistema, é preferível que a solução seja a mais simples e compacta possível. O tamanho do cromossomo tem um forte impacto no custo da instalação, uma vez que quanto maior o número de conjuntos de iluminação (postes, luminárias e lâmpadas) maior será o custo financeiro do projeto.

Com a inserção em nosso projeto de luminárias que seguem uma determinada curva IES (ou seja, não são consideradas isotrópicas) e a possibilidade de que a luminária possa sofrer rotação em torno do eixo do poste houve um aumento significativo do espaço de busca para o A.E. proposto. Essas pequenas, mas importantes modificações fizeram que nosso A.E. encontrasse boas soluções, porém com uma quantidade elevada de conjuntos de iluminação.

O efeito bloat (??) visto com muita frequência em programação genética também foi sentido nas simulações, uma vez que utilizamos cromossomos de tamanhos variáveis. Mesmo não havendo clareza quanto à sua dinâmica, grandes esforços são empreendidos no sentido de diminuir o bloat (??).

Para resolver este problema colocamos mais um objetivo em nosso algoritmo NSGA-II que é a minimização do tamanho do indivíduo.

7.2 Estudo de caso

7.2.1 Materiais

As lâmpadas utilizadas nos experimentos estão apresentadas na Tabela 19. O usuário pode escolher qualquer outro tipo de lâmpada, porém devemos ressaltar que as escolhas

Tabela 19 – Lâmpadas cadastradas para iluminação externa (O consumo e o fluxo das lâmpadas são para a temperatura de 25°C). Todas as lâmpadas listadas são fabricadas pela Osram.

Nome do produto	Consumo	Fluxo luminoso
NAV-E 100W SUPER 4Y	100	10200
NAV-E 150W SUPER 4Y	150	17000
NAV-E 250W SUPER 4Y	250	31100
NAV-E 400W SUPER 4Y	400	55500

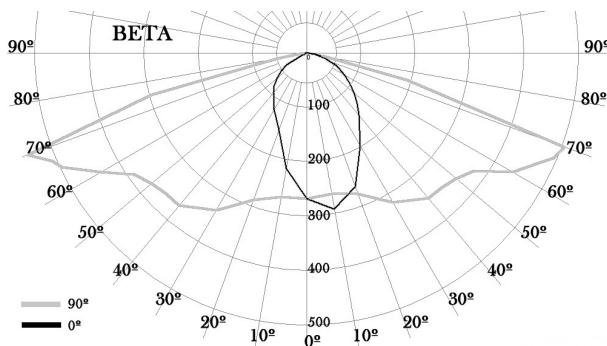


Figura 41 – Curva fotométrica da luminária BETA. (unidades em $cd/1000\ lm$)

feitas não significam que serão utilizadas no projeto. O AE poderá escolher dentre os materiais disponíveis quais serão utilizados.

O presente estudo de caso utiliza apenas uma luminária comercialmente disponível, o que permite o cálculo da iluminação de acordo com a curva IES que caracteriza a mesma. Foi escolhida para o projeto, a luminária BETA da empresa Tecnowatt, cuja curva fotométrica é apresentada na Figura 41, pois é utilizada com frequência em projetos de iluminação exterior e compatível com todas as lâmpadas disponíveis listadas na Tabela 19. Entretanto, outras luminárias poderiam ser incluídas sem prejuízo para o *software*, se for o caso.

Os postes colocados à disposição do algoritmo evolucionário têm altura de fixação das lâmpadas de 7, 10 e 12 metros. A luminária pode sofrer uma rotação no eixo horizontal de instalação de 0° a 315° em intervalos de 45°. Isso permite que as luminárias possam ser instaladas nos ângulos 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315° (0° aponta para a direita da área pré-escolhida e os ângulos são definidos no sentido horário).

A Figura 42, confeccionada em três tons de cinza, apresenta o esquema simplificado da área do estudo de caso: o tom mais escuro corresponde à região externa onde a iluminação não é necessária; o tom intermediário indica a área onde é permitida a fixação de postes; e tom mais claro indica onde essa fixação é proibida.

A união do espaço de escolha dessas composições e do espaço de diferentes possíveis

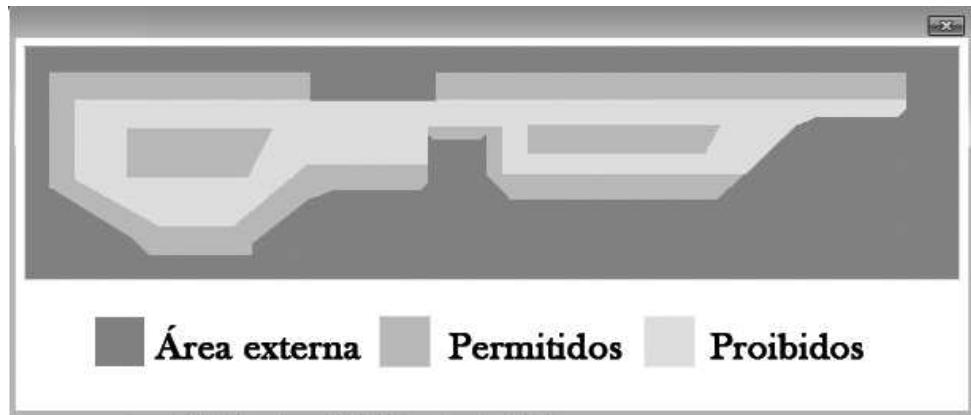


Figura 42 – Estudo de caso, estacionamento com formato irregular de $3.500m^2$.

posicionamentos dos conjuntos de iluminação formam o espaço de busca do AE.

Para ambientes externos, o IESNA (IESNA, 2000) orienta, como meta, uma iluminação média em torno de $30lx$. Portanto, para o presente estudo de caso, foi utilizada como parâmetros da função “passa-faixa”, presente na Equação 24, a média de iluminação $E = 30lx$ e o desvio-padrão $\sigma = 10lx$ (considerado aqui como uma métrica de tolerância).

7.2.2 Parâmetros do algoritmo evolucionário

Os valores definidos para os parâmetros do AE são:

- 85% de probabilidade de recombinação;
- 15% de probabilidade de mutação;
- 70 gerações;
- População de 20000 (dividido em 500 indivíduos por ilha);
- Estratégia de classificação da aptidão: *crowding distance* dos indivíduos não dominados;
- Estratégia de seleção dos pais: torneio com participação de 3 indivíduos;
- Estratégia de redução: sobrevivência dos melhores indivíduos.

7.2.2.1 Avaliação da aptidão

O sistema proposto utiliza o NSGA-II, um sistema multiobjetivo de classificação, para abordar a aptidão relativa de cada um dos indivíduos (DEB et al., 2002). A implementação do NSGA-II lida com três objetivos: a qualidade da iluminação, o total de potência instalada e o número de unidades de iluminação.

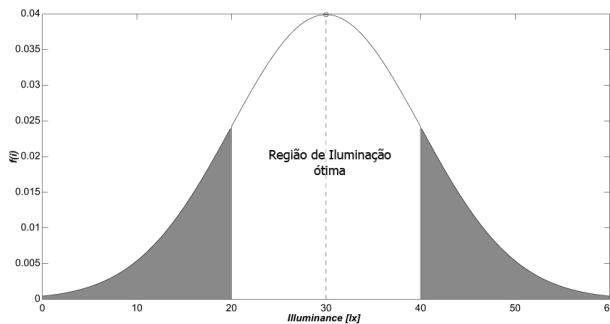


Figura 43 – Aptidão parcial em função da iluminação calculada para um determinado ponto observado, aqui nomeada “passa-faixa”.

O primeiro critério reflete o objetivo de distribuir uniformemente a iluminação sobre a área externa dentro de algum intervalo de iluminância estabelecido pelas normas. Isso é implementado da seguinte forma:

- Em primeiro lugar, a função de aptidão deve calcular a iluminância de cada ponto no plano de trabalho. Para conseguir isso, é utilizado o método ponto a ponto das informações dos conjuntos de iluminação fornecidos.
- Em seguida, é calculado o valor da função “passa-faixa”, presente na Equação 24 baseada na distribuição normal da estatística, a cada valor de iluminância (ROCHA et al., 2012). A ideia consiste em usar a iluminância exigida pelas normas como o valor médio, E , e a tolerância aceita como o valor do desvio padrão.

$$f(i) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[\frac{(E_i - E)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (24)$$

em que $f(i)$ é a aptidão parcial de um único ponto da região de dados discretos; E_i é a iluminância calculada no ponto observado i , e é calculada pelo método de ponto a ponto; E é a iluminação ideal e σ é o equivalente ao desvio padrão de uma distribuição normal. Esse critério deve ser maximizado.

Por fim, todos os valores obtidos são somados e obtém-se assim o valor de aptidão para esse critério. A curva apresentada na Figura 43 é dada pela Equação.

O segundo critério, a ser minimizado, é simplesmente a somatória da potência instalada, dada principalmente pelos tipos de lâmpadas utilizados.

O terceiro critério, o número de unidades de iluminação, também deve ser minimizado.

Assim, a implementação do NSGA-II objetiva maximizar o primeiro critério e minimizar os outros dois. Note-se que todos os critérios são simultâneos, ou seja, o problema de otimização global precisa lidar com minimizações e maximizações para obter uma distribuição da iluminação uniforme dentro dos parâmetros pré-selecionados, com o mínimo de consumo de energia elétrica utilizando o mínimo possível de unidades de iluminação. A figura 44 apresenta os dados obtidos na primeira fronteira após a execução do algoritmo NSGA-II.

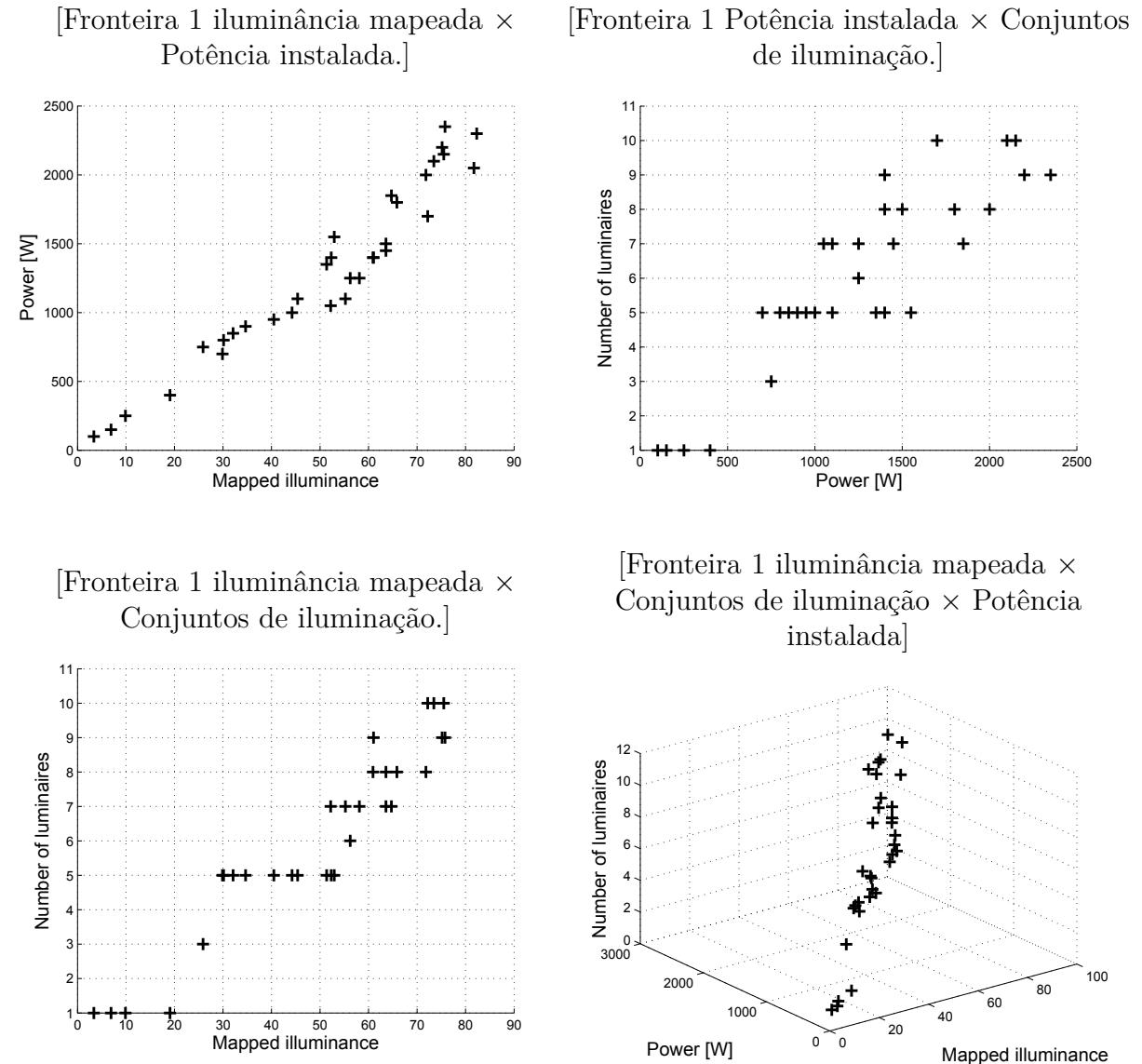


Figura 44 – Gráficos da primeira Fronteira.

7.2.2.2 Seleção do melhor indivíduo

Um algoritmo evolutivo usando NSGA-II não encontra o melhor indivíduo, mas sim um conjunto de melhores indivíduos com equilíbrios diferentes de desempenho em cada um dos três critérios (qualidade de iluminação, potência instalada e número de unidades de iluminação). Esse conjunto é chamado de primeira fronteira (DEB et al., 2002) por causa das teorias de soluções ótimas de Pareto. Além do fato de que, para um determinado problema, pode existir um número infinito de soluções que se encaixam na definição de Pareto ótimo (ou soluções não dominadas). Um sistema que queira construir projetos de iluminação exterior de forma automática precisa inferir uma solução específica para ser o projeto final.

Ao final da execução do algoritmo proposto, uma métrica foi desenvolvida para a

escolha automática do projeto com melhor compromisso entre algumas variáveis de interesse. Os projetos presentes na primeira fronteira ao final da execução (soluções ótimas de Pareto) são analisados sob a luz dessa métrica. A métrica proposta (normalizada) é apresentada na Equação 25.

$$A_v(i) = \frac{1}{5} \times \left(3 + \sum_{j=1}^5 (-1)^k \times \left(\frac{F_i^j - \min(F^{(j)})}{\max(F^{(j)}) - \min(F^{(j)})} \right) \right) \quad (25)$$

em que $A_v(i)$ é a métrica proposta aplicada ao indivíduo i ; $F_i^{(1)}$ é a resposta do indivíduo i para a diferença absoluta entre a iluminação média e a iluminação de referência (e.g. 30lx); $F_i^{(2)}$ é sua resposta para a potência instalada; $F_i^{(3)}$ é sua resposta para o número de postes; $F_i^{(4)}$ é relativo à uniformidade do indivíduo i ; $F_i^{(5)}$ é proporcional à eficiência energética (razão entre a iluminação média do indivíduo pela sua potência instalada); $F^{(j)}$ é o conjunto de valores da resposta j de todos os indivíduos na primeira fronteira ao final da execução; o fator

$$k = \begin{cases} 0, & \text{se } x = 4, 5 \\ 1, & \text{se } x = 1, 2, 3 \end{cases}$$

deve-se à necessidade de diferenciar respostas que devam ser minimizadas ($j = 1, 2, 3$) das que devam ser maximizadas ($j = 4, 5$). A métrica apresentada pode assumir valores entre 0 (pior caso) e 1 (melhor caso). Quanto maior o valor dessa métrica, melhor o compromisso entre critérios do indivíduo.

A Figura 45 apresenta valores ordenados obtidos após a aplicação métrica representada pela equação 25 para todos os indivíduos na fronteira #1 do mesmo exemplo. O sistema proposto vai eleger como o projeto vencedor um dos indivíduos da fronteira #1, que apresenta o melhor desempenho na métrica proposta.

7.3 Resultados e discussão

A Tabela 20 e a Figura 46 apresentam algumas estatísticas sobre as respostas (iluminação média, potência instalada, número de postes, uniformidade) das melhores soluções apresentadas em 30 execuções do presente estudo de caso.

Para todas as variáveis de resposta analisadas, as médias das execuções apresentadas são coerentes com o projeto. O valor das iluminações médias, por exemplo, está bem próximo dos 30lx desejados inicialmente (7,9% abaixo). A média obtida para as uniformidades das soluções de cada execução é satisfatória com relação às normas (13,6% acima).

Na maioria das execuções (75% dos casos), a potência instalada, ficou entre 2000 e 2250 W com um mínimo de 1650 W e um máximo de 2500 W. Já a quantidade de unidades de iluminação ficou entre 9 e 11, com um mínimo de 7 e um máximo de 13.

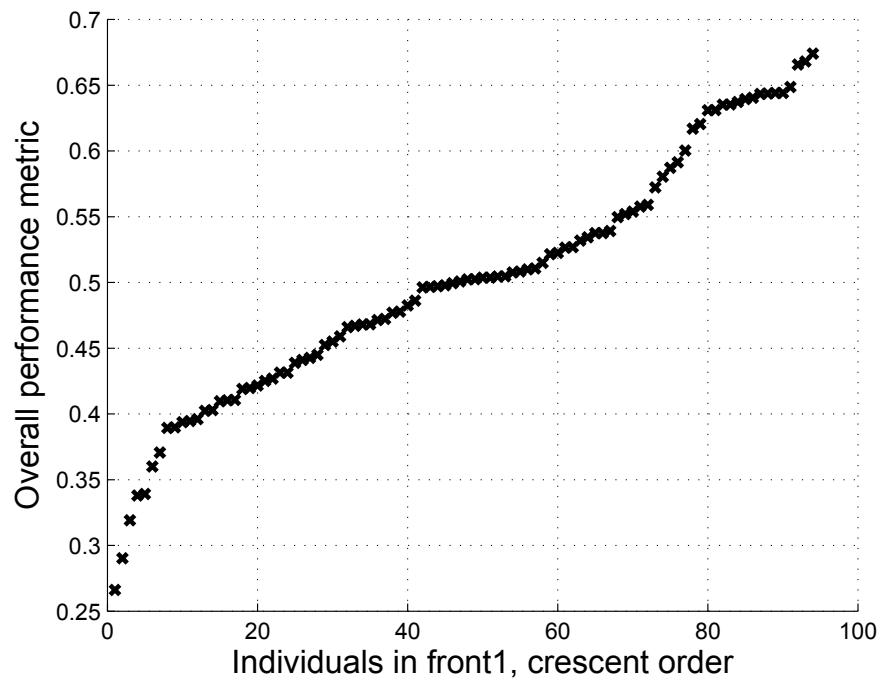


Figura 45 – Valores ordenados obtidos a partir da aplicação da métrica de desempenho global.

Tabela 20 – Estatísticas das variáveis de resposta das soluções apresentadas para cada uma das 30 execuções do aplicativo.

Estatísticas	Iluminação média[lux]	Potência instalada[W]	Número de postes	Uniformidade
Média	27,627	2115,00	9,93	0,4543
Desvio-padrão	1,780	180,59	1,48	0,0442
Coeficiente de variação	0,064	0,085	0,149	0,097
Mínimo	23,00	1650	7	0,40
1º Quatril	26,31	2000	9	0,42
Mediana	27,75	2150	10	0,45
3º Quatril	28,96	2250	11	0,47
Máximo	30,74	2500	13	0,55

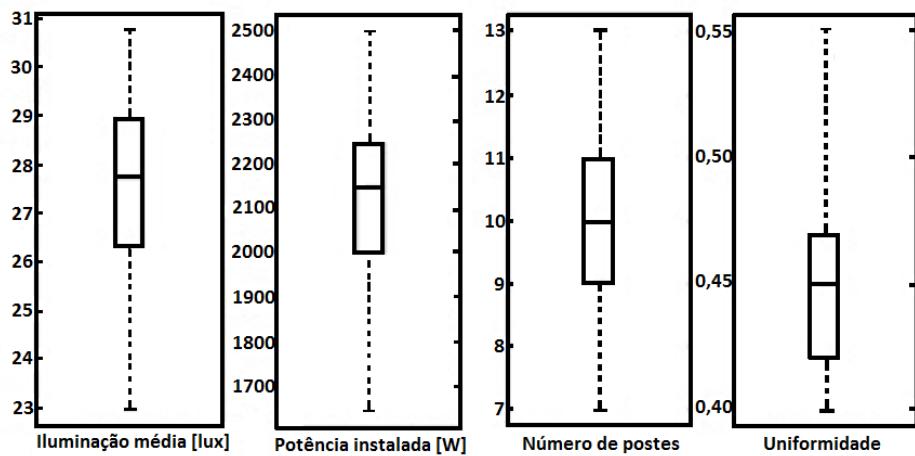


Figura 46 – Boxplots das variáveis de resposta das soluções de projeto apresentadas nas 30 execuções da aplicação.

Tabela 21 – Pior e melhor projetos apresentados dentro das 30 execuções da aplicação, de acordo com métrica dedicada que relaciona as variáveis de resposta, em comparação com o projeto de referência.

Projetos (30 execuções)	Iluminação média[lux]	Potência instalada[W]	Número de postes	Uniformidade
Pior cotado	29,66	2500	13	0,55
Melhor cotado	27,08	2000	8	0,46
Referência	75,84	4000	16	0,17*

*NOTA: Métrica comprometida devido à alta iluminação média.

Note ainda que as execuções estão convergindo para proposições de projetos similares, fato demonstrado especialmente pelos baixos coeficientes de variação (razão entre o desvio padrão e a média) apresentados em todas as respostas (três respostas abaixo de 10% e uma em 15%).

Enquanto a Tabela 21 apresenta as respostas individualizadas, a Tabela 21 apresenta soluções encontradas (projetos completos) com suas respectivas respostas. Mais especificamente, apresenta a pior e a melhor das soluções encontradas nas 30 execuções, classificadas novamente com base na métrica da Equação 25. Além disso, são apresentados os dados encontrados no projeto de referência realizado por um engenheiro competente sem apoio de sistemas de *software* de inteligência computacional.

É importante verificar que o pior e o melhor caso possuem respostas similares, o que já era esperado quando da análise das estatísticas. Também, tanto o pior quanto o melhor caso possuem todas as respostas dentro de limites razoáveis para o projeto em questão. Se comparados com o projeto de referência, destaca-se uma economia na potência

Tabela 22 – Dados do projeto de referência.

ID	Lâmpada utilizada	Luminária	Altura do poste	Ângulo de instalação	Coordenadas de posicionamento
A	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	45°	(20.7,25.0)
B	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	180°	(20.7,25.0)
C	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	225°	(20.7,25.0)
D	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	0°	(39.0,25.0)
E	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	135°	(39.0,25.0)
F	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	225°	(39.0,25.0)
G	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	45°	(98.0,25.0)
H	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	180°	(98.0,25.0)
I	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	315°	(98.0,25.0)
J	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	0°	(122.0,25.0)
K	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	135°	(122.0,25.0)
L	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	225°	(122.0,25.0)
M	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	45°	(69.0,35.0)
N	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	135°	(69.0,35.0)
O	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	45°	(154.0,40.0)
P	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	135°	(154.0,40.0)

Tabela 23 – Dados do projeto pior cotado dentre todas as melhores soluções apresentadas nas 30 execuções, classificado de acordo com métrica própria apresentada.

ID	Lâmpada utilizada	Luminária	Altura do poste	Ângulo de instalação	Coordenadas de posicionamento
A	NAV-E 100W SUPER 4Y	Beta	7 m	90°	(41.0,5.0)
B	NAV-E 150W SUPER 4Y	Beta	12 m	225°	(113.0,12.0)
C	NAV-E 150W SUPER 4Y	Beta	12 m	135°	(122.0,34.0)
D	NAV-E 150W SUPER 4Y	Beta	12 m	0°	(60.0,16.0)
E	NAV-E 150W SUPER 4Y	Beta	12 m	315°	(122.0,15.0)
F	NAV-E 150W SUPER 4Y	Beta	12 m	225°	(135.0,33.0)
G	NAV-E 150W SUPER 4Y	Beta	12 m	270°	(17.0,8.0)
H	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	270°	(158.0,33.0)
I	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	90°	(99.0,22.0)
J	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	0°	(16.0,7.0)
K	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	45°	(77.0,24.0)
L	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	45°	(37.0,30.0)
M	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	135°	(3.0,33.0)

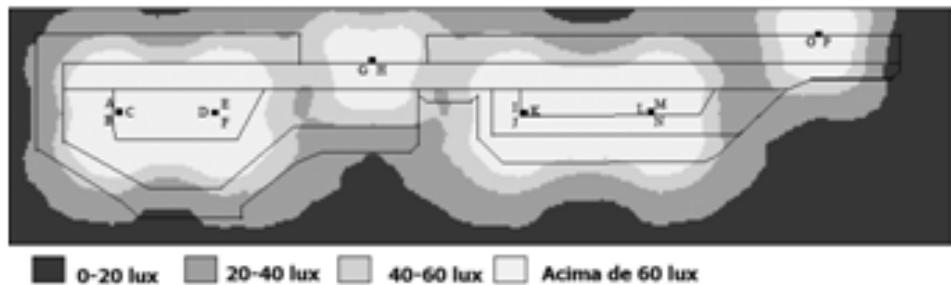
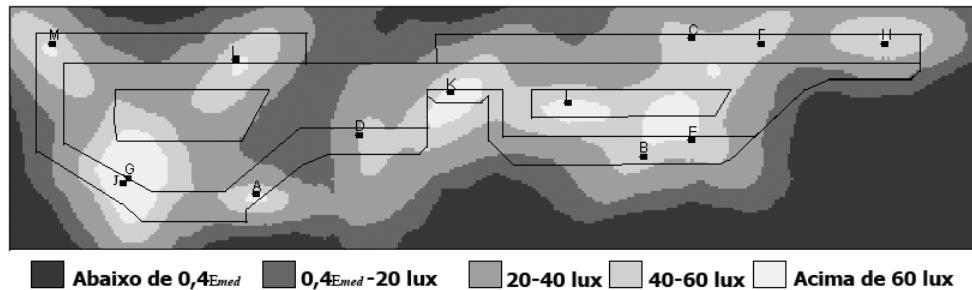
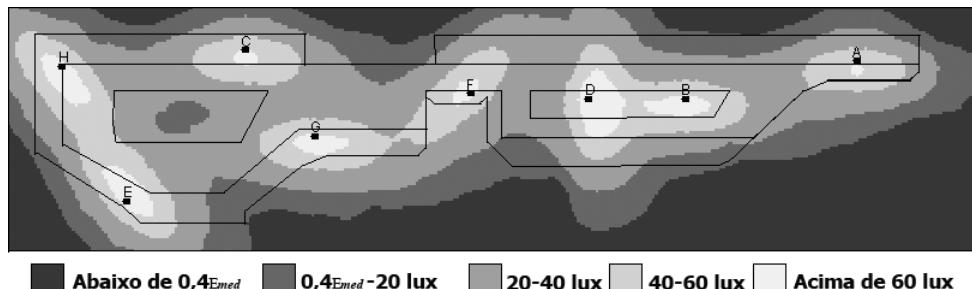
Figura 47 – *Layout* do projeto de referência.Figura 48 – *Layout* do projeto pior cotado dentre todas as melhores soluções apresentadas nas 30 execuções, classificado de acordo com métrica própria apresentada ($0,4E_{med} = 11,86lx$).Figura 49 – *Layout* do projeto melhor cotado dentre todas as melhores soluções apresentadas nas 30 execuções, classificado de acordo com métrica própria ($0,4E_{med} = 10,83lx$).

Tabela 24 – Dados do projeto melhor cotado dentre todas as melhores soluções apresentadas nas 30 execuções, classificado de acordo com métrica própria.

ID	Lâmpada utilizada	Luminária	Altura do poste	Ângulo de instalação	Coordenadas de posicionamento
A	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	90°	(153.0,30.0)
B	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	90°	(121.0,23.0)
C	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	90°	(39.0,32.0)
D	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	0°	(103.0,23.0)
E	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	315°	(17.0,4.0)
F	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	225°	(81.0,24.0)
G	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	90°	(52.0,16.0)
H	NAV-E 250W SUPER 4Y	Beta	12 m	135°	(5.0,29.0)

instalada de 37,5% no pior dos projetos e de 50% no melhor apresentado dentre todas as 30 execuções. Os números de unidades de iluminação são sempre menores do que o do projeto de referência. Com relação às uniformidades apresentadas, tanto o pior quanto o melhor caso respeitam as normas ($\geq 0,4$). O projeto de referência está em desvantagem nesse quesito apenas por uma tecnicidade: como sua iluminação média é muito alta, as áreas de menor iluminância não alcançam 40% da mesma, ou seja, a iluminação decorrente do projeto é suficiente, mas não uniforme.

As simulações de iluminação para o projeto de referência, o pior caso e o melhor caso estão representados respectivamente pelas Figuras 47, 48 e 49, e pelas tabelas 22, 23 e 24. Embora a meta desejada seja $30lx$, são aceitos pelas normas valores abaixo da meta de até 40% da iluminação média. Para as simulações apresentadas, é desejado que a iluminação esteja entre $0,4E_{med}$ e $40lx$.

7.4 Considerações finais do capítulo

Este capítulo apresenta resultados da segunda versão do sistema ELCAutoD-EA dedicado a projetos automatizados de iluminação exterior por computador. Nesta segunda versão as luminárias seguem uma determinada curva IES (ou seja, não são consideradas isotrópicas) e existe a possibilidade de que a luminária possa sofrer rotação em torno do eixo do poste.

Essas pequenas, mas importantes modificações, aumentaram de forma significativa da dimensionalidade do espaço de busca do AE proposto. Ele continuou encontrando boas soluções, porém com uma quantidade elevada de conjuntos de iluminação. Para resolver esse problema conhecido na programação genética como efeito *bloat*, foi acrescentado mais um objetivo em nosso AE que é a minimização do tamanho do indivíduo.

O projeto instalado, utilizado neste trabalho como referência, foi realizado por um engenheiro especializado, de acordo com sua experiência e com o apoio de alguns simuladores para visualização da iluminação final. O sistema ELCAutoD-AE foi usado para proporcionar um projeto alternativo. Os baixos coeficientes de variação apresentados em 30 execuções demonstram que o sistema está convergindo para projetos com métricas similares.

Ao identificar o pior e o melhor dos projetos apresentados como solução pelo sistema em todas as execuções, de acordo com a métrica de equações 25 desenvolvida para este trabalho, destaca-se uma economia na potência instalada em relação ao projeto de referência de 37,5% no pior dos projetos e de 50% no melhor apresentado entre todas as execuções. Foram alcançadas uma melhor uniformidade da iluminação e uma maior eficiência energética, além da diminuição do número de unidades de iluminação.

O sistema proposto resolve, portanto, problemas de otimização multiobjetivo, o que significa que os projetos evoluídos pelo sistema explora características das lâmpadas e

luminárias, aumenta a uniformidade da iluminação e evita desperdícios de energia que, muitas vezes, não são claras para o engenheiro de iluminação a cargo de um determinado projeto.

CAPÍTULO 8

Considerações Finais

Os AE multiobjetivo paralelos demonstraram habilidade em tratar dos mais variados problemas de otimização, fornecendo soluções próximas da solução ótima. O paralelismo inerente dos AE vem possibilitando a resolução de problemas cada dia mais complexos devido ao aumento do poder computacional dos computadores que permitem a programação paralela.

O indivíduo representado por um vetor de listas, que é a estrutura de dados que representa o genótipo do cromossomo do AE proposto, mostrou-se satisfatório. O fato de ter tamanho variável permitiu que ele se comportasse com flexibilidade e robustez, ficando totalmente aderente à solução do problema. Os operadores de cruzamento e mutação também tiveram um bom desempenho.

Para determinar a função de aptidão, foi utilizado um método de avaliação estatístico (diferença de médias) que possibilitou a comparação de diferentes opções de funções de aptidão no desempenho do AE multiobjetivo paralelo proposto com o objetivo de construir projetos automatizados de iluminação externa de forma mais eficiente.

Foi apresentado um novo conceito, chamado de *dominância estatística de Pareto* que, integrado aos intervalos de confiança para diferenças de médias, mostrou-se efetivo no auxílio do processo decisório para formulação da função de aptidão mais indicada ao problema apresentado.

A multidisciplinaridade da tese exige um esforço adicional dos pesquisadores que precisam dominar áreas que vão da iluminação à programação paralela, passando por normas de projetos, algoritmo evolucionário multiobjetivo paralelo, *cluster* de computadores, *Web service* e aplicações cliente.

Algoritmo evolucionário a partir do modelo de ilhas com a utilização de *cluster* de computadores, resultou em *speed-up* supralineares. Essa característica reforça a importância de utilizar sistemas de *software* locais interligado a *cluster* de computadores via *Web service*. Esses sistemas podem utilizar o poder dos AE sem a necessidade de realizar uma programação massiva no computador do cliente.

Os baixos coeficientes de variação apresentados em 30 execuções demonstram que o

sistema está convergindo para projetos com métricas similares. Ao identificar o pior e o melhor dos projetos apresentados como solução pelo sistema em todas as execuções, destaca-se uma economia na potência instalada em relação ao projeto de referência de 37,5% no pior dos projetos e de 50% no melhor apresentado entre todas as execuções. Foram alcançadas uma melhor uniformidade da iluminação e uma maior eficiência energética, além da diminuição do número de unidades de iluminação. As implicações desta tese vêm ao encontro dos esforços por parte de toda a sociedade na busca por soluções de iluminação mais econômicas, sustentáveis e de melhor qualidade.

De acordo com as pesquisas bibliográficas realizada pelos autores o presente trabalho é o primeiro a usar técnicas de AE para automatizar projetos de iluminação exterior por computador respeitando tanto restrições rígidas (não posicionamento de fontes luminosas em áreas proibidas e áreas com formato irregular) quanto normas aplicáveis diretamente relacionadas.

8.1 Trabalhos futuros

Este trabalho pode ter prosseguimento por meio das possíveis linhas de pesquisa, ou seja:

- Quanto ao programa, existem algumas diferenças na maneira de implementar funcionalidades a serem exploradas, como outros tipos de algoritmos de ordenação *non-dominated* em algoritmos de otimização multiobjetivo;
- Com relação ao suporte de *hardwares* que permite a programação paralela, a intenção é ligar cartões de *GPGPU* aos computadores do *cluster* e testar os ganhos de performance com programação *CUDA*;
- Em relação à aplicação em si, outras funcionalidades devem ser exploradas, como a inclusão de obstáculos fixos dentro da área a ser iluminada ou mesmo adaptar o sistema para se comunicar por meio da Internet, com base de dados adequada disponibilizada por fornecedores de material com o objetivo de facilitar o orçamento do mesmo.

Estas funcionalidades exigem um contínuo estudo sobre os AE multiobjetivo paralelos para que o mesmo continue dando suporte ao crescente aumento da dimensionalidade dos projetos a serem gerados de forma automatizada.

Referências

- IESNA, I. E. S. of N. A. (Ed.). *IESNA Lighting Handbook Reference & Application*. [S.l.: s.n.], 2000.
- ABNT, A. B. de N. T. **NBR 5101 - Iluminação pública**. 2012.
- _____. **NBR ISO/CIE 8995-1**. 2013.
- APACHE SOFTWARE FOUNDATION. **Axis users guide**. 2013. Disponível em: <<http://ws.apache.org/axis/java/index.html>>.
- BARTLETT, M. **Probability, statistics and time: a collection of essays**. [S.l.]: London: Chapman and Hall, 1975.
- BROWNLEE, A. E.; WRIGHT, J. A. Constrained, mixed-integer and multi-objective optimisation of building designs by nsga-ii with fitness approximation. **Applied Soft Computing**, v. 33, p. 114 – 126, 2015. ISSN 1568-4946. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494615002240>>.
- CARLUCCI, S. et al. Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (nsga-ii). **Energy and Buildings**, v. 104, p. 378 – 394, 2015. ISSN 0378-7788. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815301080>>.
- CASTRO, F.; ACEBO, E. del; SBERT, M. Energy-saving light positioning using heuristic search. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 25, n. 3, p. 566 – 582, 2012. ISSN 0952-1976. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095219761100220X>>.
- CHIPPERFIELD, A.; FLEMING, P. Parallel genetic algorithms. **Parallel and distributed computing handbook**, MacGraw-Hill, p. 1118–1143, 1996.
- COLLET, P.; KRÜGER, F.; MAITRE, O. Automatic parallelization of EC on GPGPUs and clusters of GPGPU machines with EASEA and EASEA-CLOUD. In: TSUTSUI, S.; COLLET, P. (Ed.). **Massively Parallel Evolutionary Computation on GPGPUs**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2013, (Natural Computing Series). p. 35–59. ISBN 978-3-642-37958-1.

- CORCIONE, M.; FONTANA, L. Optimal design of outdoor lighting systems by genetic algorithms. **Lighting Research and Technology**, v. 2003, p. 261–280, 2003.
- DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. **Evolutionary Computation, IEEE Transactions on**, v. 6; Issue 2, 2002.
- ENERGY Performance of Buildings, in: Directive 2010/31/EU. 2010. European Parliament Council.
- EUROPEAN COMMISSION. **Energy Strategy for Europe**. 2013. Disponível em: <http://ec.europa.eu/energy/index_en.htm>.
- FLYNN, M. J. Some computer organizations and their effectiveness. **IEEE Transactions on computer**, c-21, p. 948–960, 1972.
- FOGARTY, T.; HUANG, R. Implementing the genetic algorithm on transputer based parallel processing systems. In: SCHWEFEL, H.-P.; MÄNNER, R. (Ed.). **Parallel Problem Solving from Nature**. Springer Berlin Heidelberg, 1991, (Lecture Notes in Computer Science, v. 496). p. 145–149. ISBN 978-3-540-54148-6. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BFb0029745>>.
- FOGEL, D. B. **Evolutionary computation: toward a new philosophy of machine intelligence**. third edition. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2005.
- GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. [S.l.]: Addison-Wesley Longman, 1989. (Artificial Intelligence). ISBN 9780201157673.
- GROSSO, P. B. Computer simulations of genetic adaptation: Parallel subcomponent interaction in a multilocus model. University of Michigan, 1985.
- HOLLAND, J. Adaptation in natural and artificial systems. The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence**. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1992. ISBN 0262082136.
- HORNBY, G. S.; LOHN, J. D.; S., L. D. Computer-automated evolution of an x-band antenna for nasa's space technology 5 mission. **Evolutionary Computation 19**, v. 19, n. 1, p. 1–23, 2011.
- IMPLEMENTATION of MPICH2. 2012. Disponível em: <<http://www.mcs.anl.gov/research/projects/mpich2/>>.
- JOHNSON, E. E. Completing an mimd multiprocessor taxonomy. **ACM SIGARCH Computer Architecture News**, v. 16 Issue 3, p. 44–47, 1988.
- KALIN, M. **Java Web Services Up And Runnin**. [S.l.]: O'Reilly & Assoc, 2009.
- KAMENTSKY, L.; LIU, C. Computer-automated design of multifont print recognition logic. **IBM Journal of Research and Development**, 1963.

- KAMJOO, A. et al. Multi-objective design under uncertainties of hybrid renewable energy system using nsga-ii and chance constrained programming. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 74, p. 187 – 194, 2015. ISSN 0142-0615.
- KIRBY, R. M.; KARNIADAKIS, G. **Parallel Scientific Computing in C++ and MPI: A Seamless Approach to Parallel Algorithms and their Implementation.** [S.l.]: Cambridge, 2003.
- LI, Y. et al. Computational intelligence and simulation caud of homogeneous charge microwave ignition greener internal combustion engines. **International Conference on Accounting and Information Technology.**, 2010.
- Lighting Europe. **Eco-lighting project: Preliminary Background Report.** Boulevard A. Reyers 80, 1030 Brussels., 2013.
- LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos.** [S.l.]: Ciência, 2012.
- LUQUE, G.; ALBA, E. **Parallel Genetic Algorithms Theory and Real World Applications.** [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + data structures = evolution programs.** 3rd. ed. New York: Springer-Verlag, 1996.
- MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms.** Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1996.
- MONTGOMERY, D. C. **Estatística aplicada e probabilidade para Engenheiros.** [S.l.]: Livros técnicos e científicos, 2011.
- OSRAM. **Manual Luminotécnico prático.** [S.l.], 2013. Disponível em: <http://www.osram.com.br/osram_br/ferramentas-e-servicos/servicos/downloads/index.jsp>.
- PACHAMANOV, A.; PACHAMANOVA, D. Optimization of the light distribution of luminaries for tunnel and street lighting. **Engineering Optimization**, v. 40(1), p. 47–65, 2008.
- PARHAMI, B. **Computer Architecture: From Microprocessors to Supercomputers.** [S.l.]: OXFORD USA TRADE, 2005.
- PITANGA, M. **Construindo supercomputadores com Linux.** [S.l.: s.n.], 2004.
- RABAZA, O. et al. A simple method for designing efficient public lighting, based on new parameter relationships. **Expert Systems with Applications**, v. 40, n. 18, p. 7305 – 7315, 2013. ISSN 0957-4174.
- REGULAMENTO de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07. 2008. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de Espana.
- RELATÓRIO da Administração 2010. 2010. Disponível em: <http://celgd.celg.com.br/arquivos/financeiro/2010/CELGD_DEMONSTRACOES_2010.pdf>.
- RELUZ., P. N. de Conservação de E. E. B. **PROCEL RELUZ : manual de instruções.** 2004.

- RIVERA, W. Scalable parallel genetic algorithms. **Artificial Intelligence Review**, Kluwer Academic Publishers, v. 16, n. 2, p. 153–168, 2001. ISSN 0269-2821. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A%3A1011614231837>>.
- ROCHA, H. X. et al. Green public lighting design solved by a remote Genetic Algorithm application. In: **2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications**. IEEE, 2012. p. 1–6. ISBN 978-1-4673-2411-3. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6453113>>.
- ROCHA, J. M. G. **CLUSTER BEOWULF: ASPECTOS DE PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO**. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, 2003.
- ROUT, P. K.; ACHARYA, D. P. Fast physical design of {CMOS} {ROs} for optimal performance using constrained nsga-ii. **{AEU} - International Journal of Electronics and Communications**, v. 69, n. 9, p. 1233 – 1242, 2015. ISSN 1434-8411. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841115001399>>.
- SHAYGAN, M. et al. Spatial multi-objective optimization approach for land use allocation using nsga-ii. **Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of**, IEEE, v. 7, n. 3, p. 906–916, 2014.
- SHENFIELD, A.; FLEMING, P. J. Multi-objective evolutionary design of robust controllers on the grid. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 27, p. 17 – 27, 2014. ISSN 0952-1976. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197613001899>>.
- SILVA, M. L. d. **Illuminação Simplificando o Projeto**. [S.l.]: Ciência Moderna, 2009.
- SOFTWARE IESviewer. 2012. Disponível em: <<http://www.photometricviewer.com>>.
- STARKWEATHER, T.; WHITLEY, D.; MATHIAS, K. Optimization using distributed genetic algorithms. In: SCHWEFEL, H.-P.; MÄNNER, R. (Ed.). **Parallel Problem Solving from Nature**. Springer Berlin Heidelberg, 1991, (Lecture Notes in Computer Science, v. 496). p. 176–185. ISBN 978-3-540-54148-6. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BFb0029750>>.
- TANENBAUM, A. S. **Sistemas Distribuídos: Princípios e Paradigmas**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2007.
- TIDWELL, D.; SNELL, J.; KULCHENKO., P. **Programming Web Services with SOAP**. [S.l.]: O'Reilly, 2001.
- W3C. **Web of Services**. 2013. Disponível em: <<http://www.w3.org/standards/webofservices/>>.
- W3SCHOOLS. **Introduction to XML**. 2013. Disponível em: <http://www.w3schools.com/xml/xml_whatis.asp>.
- WEB Services Conceptual Architecture (WSCA 1.0). 2001.
- ZAVALA, G. R. et al. A survey of multi-objective metaheuristics applied to structural optimization. p. 537–558, 2014.

ZHOU, A. et al. Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. **Swarm and Evolutionary Computation**, v. 1, n. 1, p. 32 – 49, 2011. ISSN 2210-6502. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210650211000058>>.

ZOU, J.; LI, L. Optimization of luminous intensity distribution of roadway lighting luminaire based on genetic algorithm. **Second WRI Global Congress on Intelligent Systems**, v. 1, p. 327–330, 2010.