

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
OTIMIZAÇÃO DE CÁLCULO LUMINOTÉCNICO DE INTERIORES
BASEADO EM ALGORITMO GENÉTICO**

ANA LAURA PINHEIRO RUIVO MONTEIRO

DM 27/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANA LAURA PINHEIRO RUIVO MONTEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
OTIMIZAÇÃO DE CÁLCULO LUMINOTÉCNICO DE INTERIORES BASEADO
EM ALGORITMO GENÉTICO**

DM 27/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil

2019

ANA LAURA PINHEIRO RUIVO MONTEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
OTIMIZAÇÃO DE CÁLCULO LUMINOTÉCNICO DE INTERIORES BASEADO
EM ALGORITMO GENÉTICO**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Emília de Lima Tostes.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil
2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

M772d Monteiro, Ana Laura Pinheiro Ruivo
Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para
otimização de cálculo luminotécnico de interiores baseado em
algoritmo genético. / Ana Laura Pinheiro Ruivo Monteiro. — 2019.
XIII, 80 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Maria Emília de Lima Tostes
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal
do Pará, Belém, 2019.

1. Algoritmo Genético. 2. Cálculo Luminotécnico. 3.
Ferramenta Computacional. 4. Retorno Financeiro. 5.
DIALux. I. Título.

CDD 621.31098115

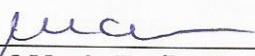
**“DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
OTIMIZAÇÃO DE CÁLCULO LUMINOTÉCNICO DE INTERIORES BASEADO EM
ALGORITMO GENÉTICO”**

AUTORA: ANA LAURA PINHEIRO RUIVO MONTEIRO

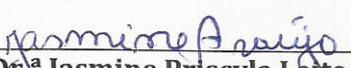
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 17/09/2019

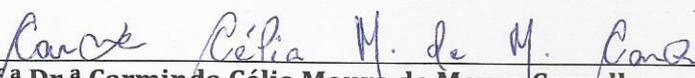
BANCA EXAMINADORA:



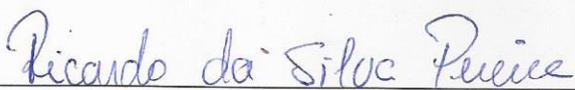
Prof.^a Dr.^a Maria Emília de Lima Tostes
(Orientadora - PPGEE/UFPA)



Prof.^a Dr.^a Jasmine Priscyla Leite de Araújo
(Avaliadora Interna - PPGEE/UFPA)



Prof.^a Dr.^a Carminda Célia Moura de Moura Carvalho
(Avaliadora Externa ao Programa - FEEB/UFPA)



Eng. Dr. Ricardo da Silva Pereira
(Avaliador Externo ao Programa - FEM/UFPA)

VISTO:

Prof.^a Dr.^a Maria Emília de Lima Tostes
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

A minha família por todo incentivo e ajuda para
que isso se tornasse possível.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar saúde e muita força para superar todas as dificuldades.

Aos meus pais, Maria Regina e Edilson Monteiro, e minha tia Lourdes Ruivo, por todo o amor que me deram, além da educação, ensinamentos e apoio.

A minha orientadora Prof.^a Dr.^a Maria Emília de Lima Tostes, pelo tempo que dedicou a me ajudar durante o processo de realização deste trabalho.

Ao Gabriel Vianna pela paciência, dedicação e ensinamentos que possibilitaram que eu realizasse este trabalho.

Agradeço de forma especial ao Everton Leandro e seus pais, Marinete Guedes e Amiraldo do Amaral, por todo apoio e incentivo diário ao meu crescimento pessoal, profissional e emocional.

A todos os meus amigos do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA), em especial ao Prof. Dr. Edinaldo Pereira por todos os conselhos e incentivos dados a mim desde a graduação, ao André Felipe por todo amor, carinho e amizade construída nesses últimos anos, e a equipe do Laboratório de Qualidade de Energia pela agradável convivência e apoio, especialmente a Luana Albuquerque que não mediu esforços para me ajudar sempre que necessário.

Aos meus amigos Michael Stevens, Antônia Cristina, Pedro Paulo e Caio Felipe e minha prima Ana Carolina Ruivo pela motivação e apoio incansável ao longo de todo este percurso.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA pela oportunidade de crescimento profissional e acadêmico, a todo seu corpo docente, além da direção e administração, que me proporcionaram as condições necessárias para que eu alcançasse meus objetivos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

E enfim, a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, seja de forma direta ou indireta, fica registrado aqui, o meu muito obrigada!

RESUMO

Existe no mercado uma grande quantidade de lâmpadas e luminárias que apresentam características próprias, como a quantidade de lúmens e vida útil. Deste modo, há várias combinações possíveis de lâmpadas e luminárias que podem ser empregadas como solução para adequar a iluminação de um determinado ambiente interno. O que irá diferenciar cada solução será o custo de investimento e o tempo de retorno financeiro. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta que fornece ao usuário a possibilidade de realizar estudos luminotécnicos para qualquer ambiente interno comercial, considerando múltiplos cenários e seguindo as normas estipuladas pela NBR ISO/CIE 8995-1:2013. Os estudos são realizados de forma otimizada através da execução de um Algoritmo Genético, o qual tem como função objetivo a minimização do tempo de retorno financeiro do investimento das lâmpadas e luminárias, que serão necessárias para o alcance de iluminância do ambiente. Para o desenvolvimento da ferramenta foram utilizadas planilhas eletrônicas associadas a linguagem de programação *Python* e o *PyCharm*, como ambiente de desenvolvimento. Utilizou-se o método dos Lúmens para dimensionamento luminotécnico, técnica de regressão linear simples para estimar a tarifa de energia elétrica para um período de 10 anos e Valor Presente Líquido juntamente com o *payback* descontado para análise de retorno financeiro das soluções geradas pela ferramenta. A ferramenta desenvolvida foi aplicada em quatro cenários distintos do edifício do Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON). Foram encontradas soluções válidas para todos os cenários, ou seja, um *payback* em até 10 anos, levando em consideração o investimento inicial, o consumo anual e a manutenção, quando houver. As melhores soluções foram simuladas pelo *software* DIALux como auxílio na projeção da distribuição das luminárias nos ambientes. Os aspectos descritos nesse trabalho mostram a funcionalidade e aplicabilidade dessa ferramenta, visando dar suporte ao usuário no planejamento do dimensionamento de projetos luminotécnicos, tendo sido alcançado o objetivo estabelecido, mostrando-se funcional e efetivo.

Palavras-chave: Algoritmo Genético. Cálculo Luminotécnico. Ferramenta Computacional. Retorno Financeiro. DIALux.

ABSTRACT

There is a large quantity of lamps and luminaires that present their own characteristics, such as the amount of lumens and lifetime. Thus, there are several possible combinations of lamps and luminaires that can be employed as a solution to adapt the lighting of a given indoor environment. What will differentiate each solution will be the cost of investment and the time of financial return. This work presents the development of a tool that provides the user with the possibility to carry out lighting studies for any internal business environment, considering multiple scenarios and following the regulations set by the NBR ISO/CIE 8995-1:2013. Studies are carried out in an optimized method by running a genetic algorithm, which has as objective function the minimization of time of financial return on investment of lamps and luminaires, which are necessary for the achievement of illuminance area. For the development of the tool spreadsheets were associated with the Python programming language and the PyCharm as the development software. The lumens method was used for lighting sizing, the simple linear regression technique was used to estimate the rate of electrical power for a period of 10 years and Net Present Value alongside the discounted payback for analysis of financial return of the solutions generated by the tool. The developed tool was applied in four different scenarios in the Amazon Energy Efficiency Center (CEAMAZON) building. Valid solutions for all scenarios were found, that is, a payback within 10 years, taking into consideration the initial investment, annual consumption and maintenance, if any. The best solutions were simulated by the software DIALux as an aid in the projection of the distribution of luminaires in environments. The aspects described in this work show the functionality and applicability of this tool, in order to support the user in the planning of lighting projects, having achieved the established goal, showing functionality and effectiveness.

Keywords: Genetic Algorithm. Lighting Design. Computational Tool. Payback. DIALux.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Espectro eletromagnético com destaque a luz visível em um intervalo de 380 nm a 740 nm.....	20
Figura 2.2 - Curva de sensibilidade do olho humano (radiações monocromáticas).....	21
Figura 2.3 - Curva de distribuição de intensidade luminosa em dois planos ortogonais de uma luminária de duas lâmpadas.....	22
Figura 2.4 - Representação do pé direito útil.....	25
Figura 2.5 - Exemplo de tabela de Fator de Utilização de luminária.....	26
Figura 2.6 - Passos básicos de um algoritmo genético.....	30
Figura 2.7 - Representação de cruzamento de um ponto.....	35
Figura 2.8 - Representação de cruzamento de mais pontos.....	35
Figura 2.9 - Representação de cruzamento uniforme.....	36
Figura 2.10 - Representação de operação genética de mutação.....	37
Figura 3.1 - Fluxograma de funções implementadas na construção do algoritmo.....	42
Figura. 3.2 - Diagrama Entidade Relacionamento.....	43
Figura 3.3 - Regressão Linear.....	45
Figura 3.4 - Cromossomo.....	46
Figura 3.5 - Indivíduo.....	46
Figura 3.6 - Payback.....	50
Figura 4.1 - Localização do edifício do CEAMAZON.....	55
Figura 4.2 - Planta baixa do primeiro pavimento - CEAMAZON.....	56
Figura 4.3 - Corte de planta baixa sem mobiliário - Cenário 1.....	57
Figura 4.4 - Corte de planta baixa sem mobiliário - Cenário 2.....	57
Figura 4.5 - Corte de planta baixa sem mobiliário - Cenário 3.....	58
Figura 4.6 - Corte de planta baixa sem mobiliário - Cenário 4.....	58
Figura 4.7 - Gráficos de Convergência do fitness. Evolução média da população e do melhor indivíduo.....	62

Figura 4.8 - Análise do tempo de recuperação do capital investido de melhor solução - cenário 1.	63
Figura 4.9 - Gráfico de comparação do custo anual de consumo de energia - Cenário 1.	63
Figura 4.10 - Análise do tempo de recuperação do capital investido da melhor solução - Cenário 2.	64
Figura 4.11 - Gráfico de comparação do custo anual de consumo de energia - Cenário 2.	65
Figura 4.12 - Análise do tempo de recuperação do capital investido da melhor solução - Cenário 3.	65
Figura 4.13 - Gráfico de comparação do custo anual de consumo de energia - Cenário 3.	66
Figura 4.14 - Análise do tempo de recuperação do capital investido da melhor solução - cenário 4.	66
Figura 4.15 - Gráfico de comparação do custo anual de consumo de energia - Cenário 4.	67
Figura 4.16 - Representação da distribuição das luminárias no DIALux para cada Cenário. ...	68
Figura 4.17 - Planta com as curvas isolux geradas pelo sistema de iluminação sugerido - Cenário 1.	69
Figura 4.18 - Planta com as curvas isolux geradas pelo sistema de iluminação sugerido - Cenário 2.	69
Figura 4.19 - Planta com as curvas isolux geradas pelo sistema de iluminação sugerido - Cenário 3.	70
Figura 4.20 - Planta com as curvas isolux geradas pelo sistema de iluminação sugerido - Cenário 4.	71
Figura A 1 - Dados das lâmpadas que compõem o banco de dados da ferramenta desenvolvida.	84
Figura A 2 - Dados das lâmpadas que compõem o banco de dados da ferramenta desenvolvida.	85
Figura A 3 - Dados das luminárias que compõem o banco de dados.	86
Figura A 4 - Dados utilizados referente ao sistema de iluminação instalados nos cenários. ...	87

Figura A 5 - Mapa de memória da melhor solução do cenário 1	88
Figura A 6 - Mapa de memória da melhor solução do cenário 2.	89
Figura A 7 - Mapa de memória da melhor solução do cenário 3.	90
Figura A 8 - Mapa de memória da melhor solução do cenário 4.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Dados de Entrada: Lâmpadas.....	43
Tabela 3.2 - Dados de Entrada: Luminárias.....	43
Tabela 3.3 - Estimção de Tarifa de Energia Elétrica (R\$/kWh).....	44
Tabela 3.4 - Quantitativo de lâmpadas e luminárias por C_x	46
Tabela 3.5 - Cálculo do Fluxo Luminoso Inicial.....	47
Tabela 3.6 - Cálculo da Quantidade de Luminárias e Lâmpadas.....	47
Tabela 3.7 - Cálculo do Consumo de Energia (kWh).....	48
Tabela 3.8 - Cálculo do VPL.....	49
Tabela 3.9 - Mapa de Memória.....	53
Tabela 4.1 - Dados de entrada.....	58
Tabela 4.2. Avaliação do AG configurado com 40% de taxa de mutação e 80% taxa de cruzamento.....	59
Tabela 4.3. Testes de configurações do AG.....	59
Tabela 4.4. Melhores soluções encontradas por execução.....	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Contextualização.....	14
1.2	Justificativa	15
1.3	Objetivo Geral.....	16
1.4	Objetivos Específicos	16
1.5	Estado da Arte.....	16
1.6	Principais Resultados	18
1.7	Organização do Texto	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Considerações Iniciais	20
2.2	Luminotécnica	20
2.2.1	Grandezas e Conceitos Fundamentais	20
2.2.2	Norma Técnica de Iluminação de Interiores.....	23
2.2.3	Programas Computacionais	28
2.3	Algoritmo Genético	29
2.3.1	Representação do Cromossomo	31
2.3.2	População inicial	32
2.3.3	Avaliação de Aptidão	32
2.3.4	Operadores Genéticos.....	32
2.3.5	Critério de Parada	37
2.3.6	Parâmetros dos Algoritmos	38
2.4	Regressão Linear.....	39
2.5	Considerações Finais	40
3	METODOLOGIA DO SOFTWARE	41
3.1	Considerações Iniciais	41

3.2	Padronização dos Dados	42
3.3	Estimação da Tarifa de Energia (Kwh).....	43
3.4	Execução do Algoritmo Genético	45
3.4.1	Cromossomo	45
3.4.2	Indivíduo.....	46
3.4.3	Função <i>fitness</i>	46
3.4.4	Operadores Genéticos.....	50
3.5	Avaliação das Soluções	51
3.5.1	Métricas de Avaliação	51
3.5.2	Mapa de Memória.....	52
3.6	Considerações Finais	54
4	ESTUDO DE CASO	55
4.1	Considerações Iniciais	55
4.2	Configuração do Algoritmo Genético.....	59
4.3	Resultados	60
4.4	Considerações Finais	71
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
5.1	CONCLUSÕES	73
5.2	Limitações do Trabalho	76
5.3	Trabalhos Futuros	76
5.4	Publicações	77
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE A – Dados de base utilizados para cálculo luminotécnico.....	84
	APÊNDICE B – Mapa de memória.....	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A energia é essencial para a estrutura socioeconômica de um país e, conseqüentemente, reflete diretamente no meio ambiente. Este último é alvo de preocupação da sociedade em face a necessidade de conscientização do uso racional dos recursos naturais e ações que visem o desenvolvimento sustentável. Essa preocupação reflete no avanço tecnológico com ações visando eficiência no uso da energia. Da mesma maneira, ocorre com os sistemas de iluminação, onde só a evolução dos equipamentos não é suficiente, sendo necessário que o projeto seja planejado tendo em vista o uso eficiente da energia, menores custos e que gere conforto visual (ALBUQUERQUE, 2007).

O consumo de energia tende a crescer proporcionalmente ao Produto Interno Bruto (PIB), dessa forma, todo país que busca o desenvolvimento deve exercê-lo de maneira eficiente e sustentável. Com isso, faz-se indispensável o desenvolvimento de tecnologias e ações que propiciem o uso eficiente da energia (ALBUQUERQUE, 2007).

Em ambientes de serviços, a iluminação pode representar 50% do consumo total de eletricidade, sendo utilizada, majoritariamente, em período diurno. O uso de lâmpadas que apresentam baixa eficiência irá provocar um aumento na temperatura ambiente, visto que parte da energia consumida é convertida em calor. Deste modo, nos meses mais quentes do ano o calor emitido pelo sistema de iluminação vai requerer maior uso de sistema de climatização, aumentando o consumo de energia. Logo, verifica-se que o uso de lâmpadas mais eficientes e um correto dimensionamento luminotécnico pode reduzir a fatura de energia elétrica (DEDG, 2018).

A objetivo da iluminação é a obtenção de boas condições de visão associadas à visibilidade, segurança e orientação dentro de um determinado ambiente (CEPEL, 2018). Este se correlaciona às atividades laborais e produtivas em locais como escolas, escritórios, bancos, entre outros.

A iluminação está relacionada ao conceito de sustentabilidade, que visa suprir as necessidades atuais e futuras da sociedade, e isso pode ocorrer através da maximização de proveito da luz natural e, em consequência, minimização do consumo de energia com a iluminação artificial. Alguns projetos exageram na quantidade de lâmpadas e luminárias, o que significa não só gastos extras desnecessários com materiais, como também um desperdício de

energia elétrica. Uma iluminação eficiente é aquela que oferece a quantidade de luz que satisfaça a necessidade do recinto, sem gerar despesas extras na conta de energia. Assim como a iluminação insuficiente pode deixar algumas zonas da superfície de um imóvel escuras, monótonas e desvalorizadas. Áreas com excesso de luz, especialmente a artificial, podem provocar exaustão e cansaço nos usuários.

Para que um projeto luminotécnico seja realizado é preciso seguir as orientações estipuladas pela NBR ISO/CIE 8995-1:2013 que dispõe sobre a iluminação de ambientes de trabalho: Interior. Essa norma apresenta para cada ambiente interno, o fluxo de lúmens que deve ser respeitado para evitar desperdícios de energia elétrica e mal-estar aos usuários.

1.2 Justificativa

Existe uma quantidade relevante de lâmpadas e luminárias disponíveis no mercado. Cada lâmpada apresenta característica própria, como a quantidade de lúmens que é capaz de gerar, a quantidade de horas de vida útil, temperatura de cor, etc. Existem várias combinações de lâmpadas e luminárias que podem ser utilizadas como solução para adequar a iluminação de um determinado ambiente. O que diferencia cada solução é o custo de investimento e o tempo de retorno financeiro. Além disso, achar a combinação ideal para cada ambiente pode se tornar uma tarefa árdua.

Existem diversas ferramentas no mercado que realizam o cálculo luminotécnico para ambientes internos, como *Realux*, *Dialux*, *AGI32* e o *Retscreen*, o qual também realiza análise de *payback*, que é o tempo de retorno financeiro para que o custo inicial do investimento seja recuperado. Uma vez definido um ambiente, essas ferramentas realizam o cálculo para um único cenário ou em alguns casos é possível utilizar uma quantidade limitada de cenários por vez. Caso seja de interesse do usuário realizar estudos utilizando múltiplos cenários para um mesmo ambiente, é preciso alterar os dados de entrada manualmente para cada cenário e executar um estudo, ou um número limitado de estudos, por vez, o que requer tempo e esforço.

Diante disso, esta dissertação apresenta o desenvolvimento computacional de uma ferramenta capaz de realizar múltiplos estudos luminotécnicos, para apoio na tomada de decisão do usuário na escolha pela melhor combinação de lâmpadas e luminárias para um determinado ambiente, realizando o devido cálculo luminotécnico segundo as normas vigentes e apresentando uma lista de soluções, levando em consideração o tempo de retorno financeiro do investimento e permitindo que o usuário escolha qual o sistema a utilizar em seu projeto.

1.3 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em criar uma ferramenta capaz de realizar o cálculo luminotécnico de forma otimizada para ambientes internos comerciais, via algoritmo genético, visando a minimização do *payback*.

1.4 Objetivos Específicos

- Implementar as equações para o cálculo luminotécnico;
- Estimar a tarifa de energia elétrica em um horizonte de 10 anos;
- Aplicar a ferramenta em um estudo de caso para avaliar sua eficiência;
- Realizar a análise de retorno financeiro;
- Selecionar o melhor quadro luminotécnico para o ambiente de implantação;
- Projetar, com auxílio do software DIALux, o sistema de iluminação com base nas soluções obtidas.

1.5 Estado da Arte

Existem diversos trabalhos na literatura voltados para a análise e construção de projetos luminotécnicos, e há alguns relacionados ao desenvolvimento de ferramentas e/ou sistemas computacionais que visem auxiliar o dimensionamento luminotécnico de ambientes internos e externos. A seguir, são abordados brevemente em ordem cronológica cada um destes trabalhos.

Em Marinoski *et al* (2003) foi desenvolvido um algoritmo de cálculo luminotécnico para ambientes internos com base no método de cálculo ponto a ponto. Foi utilizada a linguagem BASIC com planilhas eletrônicas e adotou-se uma metodologia com base em pesos para a interpolação das curvas de intensidade luminosa das luminárias. Foi estimado pelo algoritmo a contribuição da luz, tanto direta como indireta, em cada ponto de uma malha no plano de trabalho, assim como as paredes foram avaliadas a partir de suas refletâncias. Os dados estimados pelo algoritmo foram comparados ao resultado de medição e simulação, onde os valores de iluminância foram próximos ao encontrados nas medições, sendo necessário simulações com outras condicionantes e modelos variados de ambientes.

Souza e Bianchi (2004) desenvolveram um algoritmo para ser executado em DOS, visando realizar projetos luminotécnicos. Esse *software* foi chamado de LAMPADA, e ele apresenta um *layout* do projeto, no qual pode ser feita uma análise prévia da viabilidade econômica do mesmo, e caso o usuário deseje uma outra opção o projeto pode ser modificado

a partir de uma nova execução do programa, porém com alterações das escolhas das lâmpadas e luminárias, de maneira que seja encontrada uma disposição ideal.

Tavares (2007) realiza um estudo do uso de ferramentas de simulação computacional para projetos luminotécnicos em arquitetura a partir de simulações realizadas para o edifício do Santander Cultural, em Porto Alegre - RS, com o uso dos *softwares* ECOTECT v5.20 e Lumen Designer 2006, plataformas desenvolvidas por pesquisadores da Austrália e Colorado - EUA respectivamente. Essas ferramentas desenvolvem simulações paramétricas, possuindo diferentes especificações de entrada e saída de dados, que são usadas conforme a finalidade. Os *softwares* se adaptam melhor a determinados casos como a avaliação da quantidade e qualidade de iluminação.

Em Ramos (2008) foi utilizado o *software Energyplus* para avaliar o cálculo de iluminação natural, comparando com os dados de iluminância interna que foram calculadas por simulações realizadas pelos programas *Daysim/Radiance* e *TropLux*, além do *Energyplus*. Foi analisado também o cálculo da iluminância externa horizontal, tanto a difusa quanto a direta.

Cortez (2013) fez uso do *software* DIALux® para simular a iluminação existente no Mercado Municipal D. Pedro V, com o objetivo de avaliar esse sistema e propor alternativas para a melhora da qualidade luminotécnica e, conseqüentemente, redução dos custos energéticos. Este *software* retratou os espaços em três dimensões, permitindo a escolha das luminárias e lâmpadas desejadas.

Oliveira (2015) propõe uma ferramenta computacional para a elaboração de projetos de iluminação pública a partir de um Algoritmo Genético que além de calcular o projeto luminotécnico, testa várias possibilidades utilizando um banco de dados de luminárias comercializadas no Brasil, gerando assim, um conjunto de projetos que atendem as normas brasileiras exigidas e são classificados em função do custo de implantação de cada projeto.

Rocha (2015) trabalhou com um Algoritmo Evolucionário Multiobjetivo Paralelo para a construção de projetos de iluminação de ambientes externos com automatização por computador. Por meio desse algoritmo o usuário pode escolher as lâmpadas e luminárias que deseja utilizar, assim como a altura do poste e até mesmo o *layout* do ambiente a ser iluminado.

Plebe e Pavone (2017) propuseram um sistema com base no algoritmo evolutivo *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II), para auxiliar no projeto de iluminação de interiores a partir da otimização multiobjetiva dos critérios chave, compreendidos no projeto luminotécnico, como nível de iluminância, uniformidade e economia de energia elétrica. Foi

utilizado o *software* gráfico 3D Blender para reproduzir o espaço arquitetônico e simular os efeitos da iluminação.

Soares (2018) apresenta uma ferramenta de cálculo luminotécnico desenvolvida no *software* Matlab, a partir da ferramenta GUIDE, visando implementar uma interface gráfica para realizar o dimensionamento luminotécnico de ambientes internos e externos. Os procedimentos matemáticos foram baseados nas referências bibliográficas sobre luminotécnica, e os procedimentos computacionais em programação orientada a eventos. Foram realizadas comparações entre a interface gráfica desenvolvida com o *software* DIALux, para análise das vantagens e desvantagens do uso da ferramenta.

Pelo estudo dos trabalhos expostos, observa-se que há um conjunto de pesquisas sendo realizadas no sentido de aplicar técnicas computacionais para a efficientização de dimensionamentos luminotécnicos tanto de ambientes internos como de externos. As lacunas encontradas na maioria dos trabalhos estão correlacionadas a não análise do retorno financeiro dos sistemas de iluminação propostos pelos *softwares*, além de serem sugeridos um sistema por vez para cada ambiente, ou seja, é encontrado uma solução final e não várias possibilidades de sistemas que possam atender a necessidade luminosa do ambiente.

Nesta dissertação espera-se encontrar várias possibilidades de sistemas de iluminação que possam ser utilizados para um ambiente, de modo que abra o leque de opções para o projetista em usar aquele que mais lhe agrada, seja em função do tempo que o sistema leva para que se tenha um retorno do investimento inicial, das características físicas, entre outros, opções essas que ao serem geradas pelo algoritmo são dispostos no mapa de soluções final.

1.6 Principais Resultados

Baseado nos objetivos descritos pode-se dizer que o produto gerado por este trabalho corresponde a uma ferramenta computacional de suporte a decisão no planejamento de projetos luminotécnicos, capaz de fornecer uma lista de configurações para melhor adequar a iluminação de um ambiente interno, respeitando as normas vigentes e tendo como ênfase a análise do *payback*.

Vale ressaltar que a ferramenta computacional desenvolvida é capaz de realizar estudos para múltiplos cenários de um ambiente interno de forma prática e otimizada, apresentando os resultados obtidos ordenados de forma ascendente de acordo com o *payback* ou de acordo com o custo do investimento inicial, sendo estes, os principais diferenciais da ferramenta computacional desenvolvida em relação aos *softwares* disponíveis no mercado.

Além disso, vale destacar a etapa de estimação da tarifa de energia elétrica dentro da metodologia proposta para construção e execução da ferramenta computacional. Para a estimação da tarifa de energia elétrica é utilizada a Regressão Linear (RL), com o objetivo de prever valores futuros com base em dados de anos anteriores. Normalmente, para este cálculo é utilizado um valor fixo, como uma média aritmética.

1.7 Organização do Texto

O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira:

Cap. 2 - Fundamentação Teórica: Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos pertinentes às áreas deste trabalho, relativos à construção de projetos luminotécnicos conforme a norma vigente.

Cap. 3 - *Software*: Neste capítulo é dissertado acerca da metodologia utilizada para construção da ferramenta computacional, apresentando sua arquitetura geral e padrão de exibição dos resultados.

Cap. 4 - Estudo de Caso: Neste capítulo descreve-se o ambiente utilizado para realizar os estudos de múltiplos cenários, utilizando o módulo de otimização do *software*, apresentando os resultados obtidos para cada cenário.

Cap. 5 - Considerações Finais: Neste capítulo resumem-se os desafios da pesquisa e desenvolvimento enfrentados nesta dissertação, e por fim, são apresentadas as considerações finais sobre os resultados alcançados, bem como os possíveis trabalhos futuros advindos desta pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados alguns aspectos e conceitos importantes para o entendimento deste trabalho. Este divide-se em três seções, sendo na seção 2.2 apresentadas, de maneira sucinta, uma revisão de conceitos básicos, a norma vigente e métodos de dimensionamento luminotécnico. Na seção 2.3 são abordados os aspectos da técnica de otimização conhecida como Algoritmo Genético (AG). Por último, na seção 2.4, é apresentado o modelo teórico da técnica de regressão linear simples.

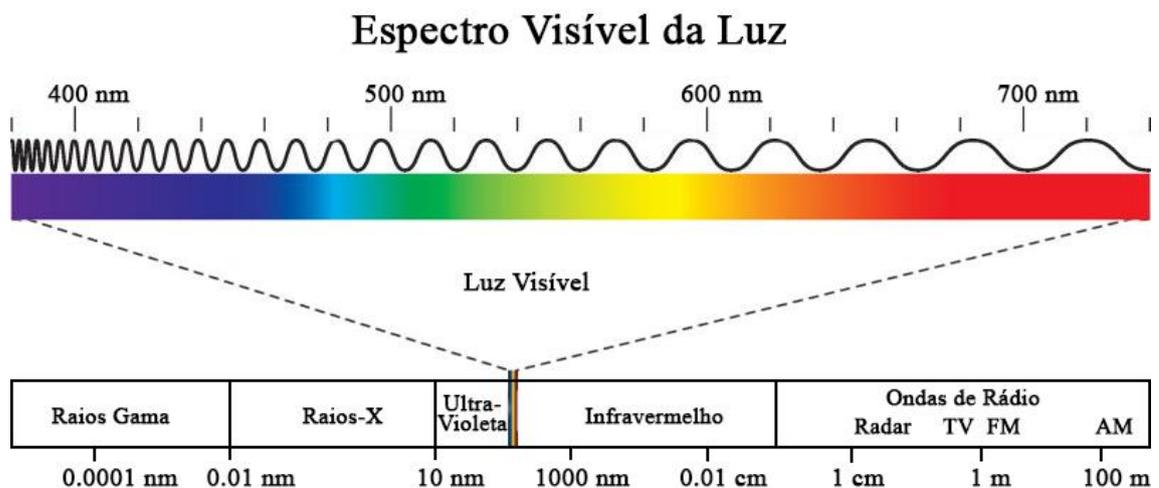
2.2 Luminotécnica

2.2.1 Grandezas e Conceitos Fundamentais

2.2.1.1 Luz

A luz é uma radiação eletromagnética de caráter ondulatório e corpuscular que está dentro do espectro visível ao ser humano. Segundo Machado (2017), a luz é a parte visível do espectro eletromagnético, que compreende desde os raios γ até as ondas longas de rádio, conforme mostra a Figura 2.1. Estas ondas eletromagnéticas apresentam comprimentos (λ) diferenciados, sendo o olho humano sensível, visualmente, à faixa entre 400 nm e 700 nm, aproximadamente.

Figura 2.1 - Espectro eletromagnético com destaque a luz visível em um intervalo de 380 nm a 740 nm.

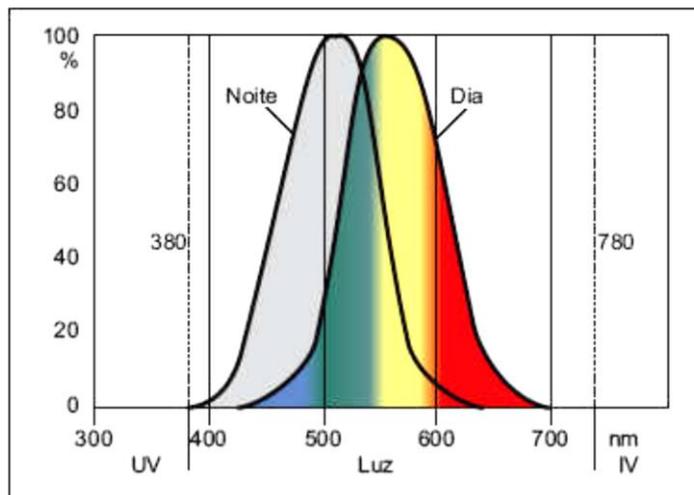


Fonte: Autor.

A Figura 2.2 apresenta a curva de sensibilidade do olho humano, onde as radiações de menor comprimento de onda apresentam maior produção da intensidade de sensação luminosa

quando se tem menor quantidade de luz (como no entardecer, noite e amanhecer), enquanto as radiações com maior comprimento de onda se comportam ao contrário (FINOCCHIO, 2010).

Figura 2.2 - Curva de sensibilidade do olho humano (radiações monocromáticas).



Fonte: OSRAM, 2018.

2.2.1.2 Fluxo Luminoso (ϕ)

O fluxo luminoso (ϕ) expressa a capacidade de um fluxo radiante (ou energético) de produzir sensação luminosa. Segundo o manual da Osram (2018), este fluxo corresponde a radiação total da fonte luminosa entre os limites de comprimento de onda de luz visível. A energia resultante emitida, sob a forma de luz, em todas as direções desse fluxo radiante é denominada de fluxo luminoso, e tem o lúmen como unidade (BOYCE, 2008).

2.2.1.3 Intensidade Luminosa (I)

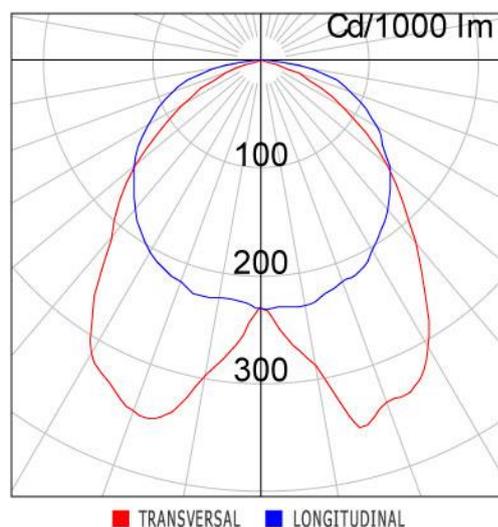
Oliveira (2015) conceitua a intensidade luminosa como a concentração de luz emitida em uma direção, considerando que a fonte de luz seja puntiforme. Essa concentração é proveniente de uma fração do fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido unitário (em esterradiano). A unidade de medida da intensidade luminosa é o lúmen por esterradiano (lm/sr) ou candela (cd).

Os valores medidos em várias direções traçam uma curva de distribuição luminosa (CDL) de uma fonte. Também chamada de curva fotométrica, a CDL é uma curva polar que apresenta a distribuição espacial da luz, emitida por uma luminária, em um plano cartesiano, tendo a distância e a intensidade luminosa como variáveis.

A Figura 2.3 exhibe um exemplo de curva fotométrica de uma luminária para lâmpadas T5, indicada para uso em ambientes onde não há necessidade de controle de ofuscamento. A distância de um ponto qualquer da curva em direção ao centro determina qual a intensidade

luminosa da fonte para o ponto de referência. Para que haja uniformização dos valores das curvas é necessário multiplicar o valor encontrado na CDL pelo Fluxo Luminoso e dividir o resultado por 1000 lm.

Figura 2.3 - Curva de distribuição de intensidade luminosa em dois planos ortogonais de uma luminária de duas lâmpadas.



Fonte: ABALUX, 2013.

2.2.1.4 Iluminância (E)

É a componente perpendicular do fluxo incidente em uma superfície por unidade de área, ou seja, a iluminância é o fluxo luminoso de uma fonte que incide sobre uma superfície que se situa a uma certa distância da fonte. A iluminância pode ser calculada em relação ao fluxo luminoso e a área de superfície (BOYCE, 2008), conforme Equação (2.1).

$$E = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta \phi}{\Delta A} \quad (2.1)$$

A unidade de medida da iluminância é expressa em lux. Um lux corresponde à iluminância de uma superfície plana de um metro quadrado de área, sobre a qual incide perpendicularmente um fluxo luminoso de um lúmen (PROCEL, 2011). Devido a não uniformidade de distribuição do fluxo luminoso em uma superfície, considera-se a média da iluminância da área.

2.2.1.5 Luminância (L)

É a intensidade luminosa que reflete de uma superfície aparente em direção ao olho humano permitindo que haja a sensação de claridade (da COSTA, 2013). A luminância pode ser calculada pela Equação (2.2), considerando a refletância (ρ) da área iluminada (BOYCE, 2008). A unidade no SI para luminância é cd/m^2 .

$$L = \frac{\rho E}{\pi} \quad (2.2)$$

2.2.1.6 Vida Útil da Lâmpada

Segundo o manual da Osram (2018), a vida útil de uma lâmpada é o número de horas decorridas ao atingir 70% da quantidade de luz inicial devido à depreciação do fluxo, somado ao efeito das respectivas queimas ocorridas no período, ou seja, 30% de redução da quantidade de luz inicial. Quanto maior for a vida útil de uma lâmpada, melhor é o sistema, devido a menor necessidade de manutenção nas instalações.

2.2.1.7 Temperatura da Cor (T)

A cor da iluminação é descrita por sua cromaticidade ou temperatura de cor, designando a cor aparente de uma fonte luminosa (da COSTA, 2013). A temperatura da cor é dada em Kelvin, sendo caracterizadas como cores frias ou quente, assim, lâmpadas com tons amarelados possuem baixa temperatura ($\leq 3000\text{K}$) e com tons azulados ou violeta possuem altas temperaturas ($\geq 4000\text{K}$). Quanto mais alta for a temperatura, mais branca é a cor da luz emitida.

2.2.1.8 Eficiência Luminosa (η)

A definição de eficiência luminosa baseia-se na noção de rendimento, sendo determinado pelo quociente entre o fluxo luminoso emitido (ϕ) por uma fonte luminosa e a potência consumida (P), como exposto na Equação (2.3). Quanto maior a eficiência luminosa de uma lâmpada e equipamentos, menor seu consumo de energia.

$$\eta = \frac{\phi}{P} \times 10 \quad (2.3)$$

2.2.2 Norma Técnica de Iluminação de Interiores

2.2.2.1 ABNT NBR ISO/CIE 8995-1

A criação de uma norma para iluminação de interiores, no Brasil, remonta ao ano de 1958 com a NBR 5413, que estabelecia os níveis de iluminamento recomendados, obtidos através de iluminação artificial. A partir disso, essa norma passou por várias atualizações nos anos de 1969, 1982 e 1992, até ser cancelada. Dispunha-se também da NBR 5382 de 1985, a qual tinha por objetivo fixar o modo pelo qual fazia-se a verificação da iluminância de interiores de áreas retangulares, através da iluminância média sobre um plano horizontal, proveniente da iluminação geral.

A Associação Brasileira de Normas Técnica elaborou uma nova norma técnica, a NBR-8995/2013 - Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1: Interior, que substituiu as normas

NBR-5382/1985 e NBR5413/1992, para adequação das condições de iluminação dos ambientes de trabalho.

Esta modificação concilia a norma brasileira com a internacional ISO/CIE8995-1: *Lighting of workplaces - Part1: Indoor*, atendendo os mesmos requisitos que são aplicados internacionalmente pelos países que aderem as normas ISO. Nesta nova versão são estipulados não apenas níveis mínimos de iluminâncias, iluminância mantida (\bar{E}_m), na área de tarefa, mas também valores máximos para ofuscamento, valores mínimos para o índice geral de reprodução de cores, recomendações de projeto para o tratamento da luz natural e recomendações quanto à manutenção (PESSOA *et al*, 2013) . Os níveis de iluminância são estipulados de acordo com a atividade a ser realizada no ambiente, desconsiderando a idade por completo, como na NBR 5413, criando ambientes que se adequam as mais diversas faixas etárias.

Essa norma aborda a separação da área de tarefa e da área de entorno, gerando uma certa economia nos custos, visto que a área de tarefa deverá ser a prioridade, sendo permitido assim, uma iluminância inferior na área de entorno imediato. Se tem também uma abordagem sobre a temperatura de cor que depende da iluminância, cores da sala e mobiliário, clima e aplicação.

Em comparação à NBR 5413, a NBR 8995-1 traz como desvantagem o encarecimento dos projetos luminotécnicos devido ao aumento quantitativo de parâmetros a serem respeitados para que se tenha conforto visual no ambiente. Os níveis de iluminância também aumentaram, conseqüentemente, um número maior de luminárias podem ser necessárias para atender aos requisitos de iluminância.

2.2.2.2 Cálculo Luminotécnico

Projetos luminotécnicos são elaborados por meio de métodos que determinam a quantidade de luminárias e equipamentos que serão essenciais para atender a iluminância ideal de um ambiente.

Os principais métodos de cálculo luminotécnico para ambientes internos são o dos lúmens, definido pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE), e ponto a ponto, que tem como base a lei de Lambert, descrevendo a iluminância como sendo inversamente proporcional ao quadrado da distância do ponto iluminado ao foco luminoso.

O método dos Lúmens é o mais empregado e considera a iluminância média do projeto, com base: nas atividades a serem desenvolvidas pelos usuários; nas refletâncias das superfícies do teto, das paredes e do piso; e dos tipos de equipamentos do sistema de iluminação (TOLEDO, 2008; PESSOA, 2013). O método ponto a ponto é aplicado quando as dimensões da fonte

luminosa forem pequenas em relação à distância ao plano a ser iluminado. Ambos os métodos podem ser estimados manualmente (KAWASAKI, 2019).

2.2.2.3 Método dos Lúmens

O método dos lúmens objetiva determinar a quantidade necessária de luminárias, para atender a iluminância média adequada. Esse é o método de cálculo mais simples considerando, para o dimensionamento, ambientes retangulares e instalação de um único tipo de luminária.

Inicialmente, o projetista precisa determinar o nível de iluminância de acordo com os valores recomendados pela norma vigente e estabelecer o modelo e potência das lâmpadas e luminárias que serão utilizadas.

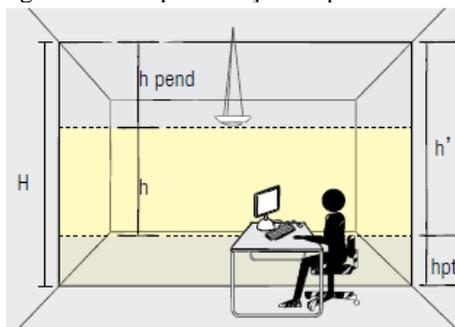
Para a luminária escolhida é preciso determinar o fator de utilização (FU). Segundo Ferreira (2010), esse fator é a razão entre o fluxo utilizado e o fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas. A mesma referência diz que esse coeficiente depende da distribuição e da absorção de luz, típicas dos componentes do sistema de iluminação; das dimensões do ambiente, expresso pelo índice do local (K); e das refletâncias das paredes, do teto e do piso.

O índice do local é uma relação dada a partir das dimensões em metros do ambiente, definido pelas Equações (2.4) para quando a iluminação for direta, e (2.5) para iluminação indireta, onde c é o comprimento e l a largura do recinto, h é o pé direito útil, dado pelo pé direito total H subtraído da altura do plano de trabalho h_{pt} e da altura da luminária h_{pend} . A distância do teto ao plano de trabalho é representada por h' , podendo ser visualizada pela Figura 2.4.

$$K = \frac{c \times l}{h(c+l)} \quad (2.4)$$

$$K = \frac{3 \times c \times l}{2 \times h'(c+l)} \quad (2.5)$$

Figura 2.4 - Representação do pé direito útil.



Fonte: OSRAM, 2018).

É recomendado o uso de cores claras nas superfícies dos ambientes para que haja uma melhor refletância da luminosidade e, conseqüentemente, aumento do rendimento do sistema. A Tabela 2.1 apresenta índices de refletância segundo (PROCEL, 2011).

Tabela 2.1 - Valores de Refletância.

SUPERFÍCIE	REFLETÂNCIA
Muito clara	70%
Clara	50%
Média	30%
Escura	10%
Preta	0%

Fonte: Autor.

O FU indica a eficiência luminosa do conjunto lâmpada/luminária/recinto (OSRAM, 2018). O valor desse fator é tabelado e apresentado pelos fabricantes das luminárias, e sua determinação é dada pelo cruzamento do K com os coeficientes de refletância do teto, das paredes e do piso, nesta ordem. A Figura 2.5 exemplifica a determinação do FU de uma luminária qualquer.

Figura 2.5 - Exemplo de tabela de Fator de Utilização de luminária.

TETO (%)	70			50			30		0
PAREDE (%)	50	30	10	50	30	10	30	10	0
PESO (%)	10			10			10		0
K	FATOR DE UTILIZAÇÃO (X0,01)								
0,60	32	28	26	31	28	26	28	26	25
0,80	38	34	31	37	34	31	33	31	30
1,00	42	39	36	41	38	36	38	36	35
1,25	46	4,0	40	45	42	40	42	40	39
1,50	48	46	44	48	45	43	45	43	42
2,00	52	60	48	51	49	48	49	47	46
2,50	54	53	51	53	52	50	51	50	49
3,00	56	54	53	55	53	52	53	52	50
4,00	57	55	55	56	55	54	54	54	52
5,00	58	56	56	57	56	55	55	55	53

Fonte: KAWASAKI, 2019.

O dimensionamento luminotécnico deve levar em consideração um fator de perdas luminosas, também chamado de fator de manutenção (FM), devido a diminuição do fluxo luminoso das lâmpadas ao longo da vida útil e ao acúmulo de poeira sobre as lâmpadas e luminárias (FERREIRA, 2010; KAWASAKI, 2019; OSRAM, 2018). A Tabela 2.2 apresenta valores sugeridos por KAWASAKI (2019) de acordo com as condições do ambiente e o período de manutenção. A NBR ISSO 8995-1 recomenda que o FM não seja inferior a 0,70.

Tabela 2.2 - Fatores de manutenção recomendados.

AMBIENTE	2.500 H	5.000 H	7.500 H
Limpo	0,95	0,91	0,88
Normal	0,91	0,85	0,80
Sujo	0,80	0,66	0,57

Fonte: Autor

Após a determinação dessas grandezas calcula-se o fluxo luminoso total a ser produzido pelas lâmpadas para um determinado ambiente, a partir da Equação (2.6), onde A é a área do recinto (m^2) e E o nível de iluminância.

$$\varphi = \frac{A \times E}{FU \times FM} \quad (2.6)$$

Determina-se o número de luminárias pela Equação (2.7), onde φ_{lp} é o fluxo luminoso da lâmpada e n é o número de lâmpadas em cada luminária.

$$N = \frac{\varphi}{n \times \varphi_{lp}} \quad (2.7)$$

Definida a quantidade de luminárias, ajusta-se o número, se necessário, para que estas possam ser distribuídas de maneira uniforme no ambiente.

2.2.2.4 Método Ponto a Ponto

Também conhecido como método das intensidades luminosas, o método ponto a ponto é utilizado quando há a necessidade de iluminação específica em um ponto da superfície, ou quando a fonte luminosa é muito pequena em relação ao plano de trabalho a ser iluminado. Esse método faz o cálculo de iluminância de qualquer ponto da superfície individualmente por meio de cálculos trigonométricos, considerando as fontes luminosas existentes neste meio, e pode ser útil para o dimensionamento de ambientes internos.

Esse método se baseia na lei de Lambert, o qual diz que a iluminância sofre variação na razão inversa do quadrado da distância da fonte à superfície a ser iluminada, podendo ser expresso pela Equação (2.8).

$$E = \frac{I}{d^2} \quad (2.8)$$

Onde:

E : Iluminância (lux);

I : Intensidade luminosa da fonte (cd);

d : Distância da fonte luminosa ao plano de trabalho (m).

Se a incidência da luz não for perpendicular ao plano do objeto, a Equação (2.8) passa a ser representada pela Equação (2.9).

$$E = \frac{I_{\alpha} \times \cos^3 \alpha}{h^2} \quad (2.9)$$

Onde:

I_{α} : intensidade luminosa no ângulo α , em cd;

h: distância vertical entre a fonte de luz e o plano do objeto.

A iluminância total pelo método ponto a ponto é a soma das iluminâncias advindas de cada fonte luminosa, cujo fecho atinge o ponto considerado. Neste método não são consideradas as refletâncias das superfícies (teto, paredes e piso) e pode ser considerado bem trabalhoso para ser executado manualmente em ambientes com várias fontes luminosas (KAWASAKI, 2019).

2.2.3 Programas Computacionais

A visualização antecipada do ambiente do projeto luminotécnico é uma das principais características da aplicação de programas de simulação computacional. Porém, este tipo de técnica precisa ter fundamentação física, tendo característica empírica, para uma apresentação eficiente da distribuição da luz no espaço a ser iluminado (CHRISTAKOU, 2004).

Inúmeros *softwares* de cálculo luminotécnico estão disponíveis no mercado provendo auxílio aos projetistas, pois realizam, em um tempo consideravelmente curto, o dimensionamento do projeto de iluminação, considerando os critérios pré-definidos do ambiente. Estes também disponibilizam ao usuário a possibilidade de estimar o consumo energético para todo o projeto de antemão. A maioria destes programas dispõem de bancos de dados e acesso a informações de luminárias e lâmpadas de fabricantes que estão disponíveis no mercado, e proporcionam um ambiente gráfico, onde é possível configurar um sistema de iluminação e distribuir todos os componentes, tendo em conta as dimensões reais dos recintos em estudo (SILVA, 2013).

Um dos *softwares* mais utilizados pelos profissionais técnicos para o dimensionamento luminotécnico é o DIALux. Este é fundamentado na norma DIN EN 12464-1 (2005), análoga à NBR 8995-1 (2013). Ele exibe os resultados de cálculo de níveis de iluminância, relatórios de densidade de potência instalada, uniformidade, quantifica o número necessário de componentes do sistema visando atingir o nível de iluminância exigido em projeto, é capaz de realizar renderização fotorrealísticas dos modelos de simulação, entre outras ferramentas disponíveis. Este programa permite que o usuário interaja com outros programas, sendo possível importar ou exportar arquivos CAD de extensões DXF, DWG, SAT, entre outros. O DIALux é um *software* livre e está disponível para *download* no site da empresa (BECK, 2016).

2.3 Algoritmo Genético

Desde o surgimento da vida na terra, a competição objetivando os meios necessários a sobrevivência foi vital na perpetuação das espécies, transmitindo para as gerações futuras características adaptativas ideais para a evolução destes grupos. Este contexto dá origem ao conceito conhecido como evolução das espécies, tendo origem no século VI a.C. com concepções primitivas conhecidas como descendência comum e transmutação entre as espécies (HAUPT; HAUPT, 2004). Porém as ideias evolutivas só ganharam destaque no meio científico no século XIX, através de Charles Darwin com a teoria que diz “A seleção natural tende apenas a tornar cada ser vivo tão perfeito ou um pouco perfeito que os demais habitantes da mesma região com os quais ele terá de lutar para sobreviver” (DARWIN, 2011). Assim, se um indivíduo tem maior aptidão para sobreviver no meio no qual está inserido, este terá maior probabilidade de gerar descendentes e conseqüentemente repassar suas características para essas novas gerações.

Com base no princípio da seleção natural e sobrevivência dos mais aptos, os algoritmos genéticos foram concebidos pelo pesquisador John H. Holland nos anos 60 com o objetivo de simular matematicamente todo o mecanismo da evolução biológica, com todas as características e vantagens desse processo (GOLDBERG, 1989). Holland foi refinando gradualmente suas ideias e em 1975 publicou o seu livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems* que é considerado uma das principais referências de Algoritmos Genéticos (AGs). Desde então, os AGs vêm sendo utilizados nas mais variadas áreas como em: processamento de imagens; modelagem e identificação de sistemas; filtros para cancelamento de ruídos; robótica; e seleção de parâmetros de redes neurais (LUCASIU; KATEMAN, 1993).

Os AGs são algoritmos de otimização estocásticos que trabalham de forma “aleatória orientada” de acordo com regras probabilísticas baseadas numa analogia com os mecanismos da genética natural (ÁVILA, 2002). É um método robusto no qual o processo biológico aumentará as chances de sobrevivência dos indivíduos mais aptos em um ambiente específico, conservando as melhores características desses na geração seguinte.

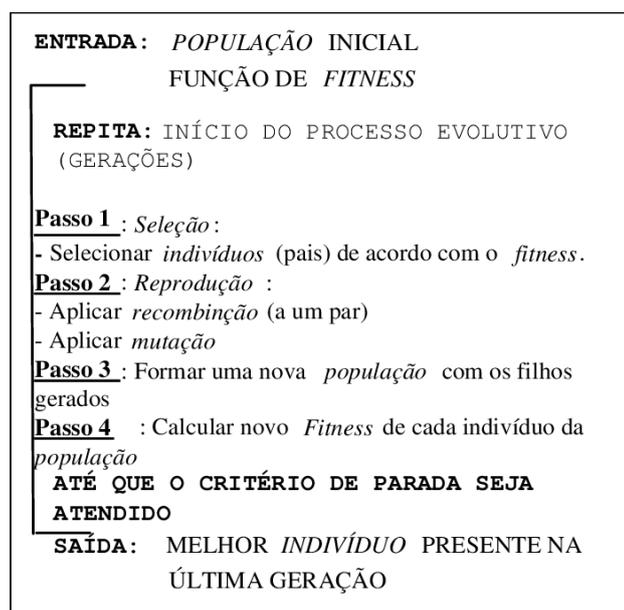
A seguinte terminologia é utilizada quando se trabalha com AG (COELHO, 2013):

- Indivíduo: uma possível solução para o problema, composto por um ou mais cromossomos;
- Gene: a unidade básica do cromossomo que define uma característica. Cada cromossomo tem certo número de genes, onde cada um descreve uma variável do problema (OLIVEIRA, 2015);

- Alelos: valores que um gene pode assumir;
- Genótipo: informação que o cromossomo representa para solucionar o problema, está presente na estrutura de dados que engloba os genes de um indivíduo;
- Fenótipo: é o resultado do processo de decodificação do genoma de um indivíduo;
- Cromossomo: conjunto de genes; uma representação da solução;
- Locus: posição de um gene em um cromossomo;
- População: conjunto de cromossomos ou soluções;
- Função de *fitness*: Função de avaliação, que mede o quão adaptado está o indivíduo ao ambiente e deverá ser maximizada ou minimizada dependendo do problema proposto;
- Geração: representa um ciclo de criação, transformação e avaliação de indivíduos.
- Seleção: corresponde a escolha de indivíduos para realização de cruzamentos; pode ser feita por escolha aleatória ou eleição dos mais aptos.
- Cruzamento: é a recombinação genética entre os indivíduos selecionados, gerando novos indivíduos;
- Mutação: corresponde à troca do valor de um gene aleatoriamente escolhido; previne que todas as soluções sejam apenas combinações das soluções da população inicial.

A Figura 2.6 apresenta de maneira simplificada o processo de execução de um AG, onde está se representando uma função que tem como entrada uma população inicial e uma função de avaliação, comumente chamada de *fitness*, e que gerará como saída o melhor indivíduo a ser encontrado pelo processo de evolução (LYRA FILHO *et al*, 2003).

Figura 2.6 - Passos básicos de um algoritmo genético.



Fonte: LYRA FILHO *et al*, 2003.

O funcionamento do AG possui como características básicas gerar uma população inicial através de um conjunto aleatório de indivíduos, a qual é avaliada durante o processo evolutivo, sendo atribuídos valores que refletem sua adaptação no ambiente. Os indivíduos mais aptos são mantidos e podem sofrer modificações em seu material genético por meio dos operadores de cruzamento e mutação, gerando novos indivíduos. Esse processo é chamado de reprodução e se repete até que haja o surgimento da solução ótima (GOMES, 2017).

As potenciais soluções são codificadas por uma representação cromossômica e por uma população que evolui a partir da aplicação dos operadores genéticos, e então, será dado como encerrado o processo evolutivo quando as soluções não forem sofrer mais melhorias, ou quando se atinge o número máximo de gerações. As funções de avaliação devem ser feitas de acordo com a categoria de cada problema (SILVA, 2011).

2.3.1 Representação do Cromossomo

Em um AG, as prováveis soluções são descritas por estruturas conhecidas como cromossomo. Uma boa representação do cromossomo é importante para que haja sucesso no programa. Ele representa a tradução de informações do problema a ser trabalhada pelo computador e deve ser o mais simples possível, e segundo Linden (2008), não deve deixar de considerar as restrições e condições impostas pelo problema.

É comum os termos genoma e cromossomo serem utilizados para representar possíveis soluções de um problema, sendo chamados também por indivíduos. Deste modo, o indivíduo, ou solução do problema, se resume ao conjunto de genes que possui (genótipo), mas a sua avaliação baseia-se na decodificação desse genótipo, conhecida como fenótipo, o qual é o conjunto de características observáveis no objeto resultante do processo de decodificação dos genes. Os possíveis valores que um determinado gene pode assumir são denominados alelos (LUCAS, 2002; FALCONE, 2004).

Os tipos de representação mais comuns para um cromossomo são: codificação binária, que foi a primeira a ser explorada devido sua analogia direta com a genética natural, e utiliza conjuntos de 0 e 1 para representação das variáveis; por ponto flutuante, o qual apresenta maior precisão e capacidade de representação de domínios de um problema, comumente usados em problemas com parâmetros reais; por inteiros, a qual é adequada para problemas de análise combinatória, arranjo e permutação (FRANCO, 2015; MICHALEWICZ, 1996; SOARES, 1997).

2.3.2 População inicial

A população corresponde a um conjunto de genótipos que, inicialmente, é gerado de forma aleatória, sendo atribuído um determinado valor para cada cromossomo. Estes estão restritos à uma faixa de valores atribuída nos parâmetros iniciais (COLHERINHAS, 2016). Existem situações em que a população inicial é gerada por meio de uma heurística, visando a incorporação de indivíduos com características consideradas relevantes para o problema em questão.

É essencial que haja, nesse primeiro ciclo da população, uma variação dos indivíduos, pois essa diversidade promoverá uma distribuição de soluções por todo o espaço de busca (MELO, 2009). O tamanho da população é diretamente proporcional a representação de soluções no espaço de busca. Ou seja, quanto maior for a população, maior será a chance de encontrar a melhor solução para o problema e, conseqüentemente, haverá uma maior exigência no tempo de execução do algoritmo (OLIVEIRA, 2015; MELO, 2009).

2.3.3 Avaliação de Aptidão

A avaliação é a primeira etapa do processo de evolução de um AG. Ela consiste no cálculo de aptidão de sobrevivência ao ambiente de cada indivíduo, através de uma função de aptidão, também chamada de *fitness*. O valor obtido pela função mensura a qualidade do indivíduo e se este apresenta eficiência para solucionar o problema, sendo comum serem atribuídos valores escalares, inteiros ou reais, relativos ao grau de aptidão do indivíduo (BARRICO, 2007; BASTIDAS OTERO, 2016; ROSA, 2009).

A função é empregada tanto no início do algoritmo quanto ao final de uma geração, onde ocorre o processo de eliminação dos indivíduos considerados com baixo grau de aptidão. É fundamental que haja a definição apropriada da medida de adaptação, para que o processo evolutivo do AG possa fornecer uma solução que atenda aos objetivos em questão. A função de aptidão e a codificação do indivíduo possuem relação direta com o domínio do problema (GOLDBERG, 1989).

2.3.4 Operadores Genéticos

Estes são responsáveis pela evolução da população por meio de sucessivas gerações. Sabe-se que a evolução é uma consequência do processo de reprodução, transmutação e seleção natural a uma dada população. Desta forma, os operadores genéticos são necessários para que a população se diversifique e mantenha características de adaptação adquiridas pelas gerações

anteriores (NUNES, 2011). Os AGs básicos têm três operadores genéticos: seleção, cruzamento e mutação.

2.3.4.1 Seleção

A seleção de indivíduos para reprodução é uma etapa que também influencia no desempenho do AG. Com base no processo de seleção natural, que atua sobre as espécies biológicas, os AGs separam os indivíduos mais aptos (pais / genitores) para gerar os descendentes (filhos), a fim de obter uma nova geração (GOLDBERG, 1989; LINDEN, 2008; MELO, 2009).

Os métodos de solução são desenvolvidos para selecionar, de preferência, indivíduos com maior grau de aptidão, entretanto, indivíduos com má avaliação podem ser favoráveis à criação de uma nova população, devido as suas características genéticas se apresentarem como melhor solução para o problema, preservando a diversidade da população. Entre os métodos de seleção existentes, destacam-se por roleta, *ranking*, torneio e elitismo.

- Seleção por roleta

Nessa técnica cada indivíduo da população é associado a uma porção na roleta, proporcional a seu índice de aptidão. Seja f_i a função aptidão do i -ésimo indivíduo de uma população de n indivíduos. A sua probabilidade de vir a ser selecionado para reprodução é expressa para Equação (2.10) (MELO, 2009).

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^n f_j} \quad (2.10)$$

Desta forma, os indivíduos que apresentarem alto grau de aptidão adquirem uma maior porção da roleta. Então, a roleta é girada n vezes, sendo n o número de indivíduos da população. Cada vez que a roleta para, é selecionado o indivíduo marcado para a próxima geração (MITCHELL, 1996). O algoritmo usa um número aleatório para selecionar uma das seções com uma probabilidade igual a sua área (SILVA, 2011).

- Seleção por *ranking*

É um método que posiciona os indivíduos ordenados de acordo com o *fitness*, determinando assim, a probabilidade de seleção conforme a posição ocupada. Para Rocha (2015) A seleção por *ranking* é dividida em duas etapas, na qual a primeira ordena-se as soluções de acordo com seus valores da função *fitness*, em ordem crescente caso a finalidade seja maximizar a função de avaliação, ou em ordem decrescente se for para minimizá-la. Após

isso, para cada indivíduo concede-se um novo valor de *fitness* equivalente à sua posição no *ranking*. Na segunda etapa o melhor indivíduo, segundo sua posição, apresentará maiores chances de ser selecionado. Pode ser utilizado mapeamento linear ou não linear para a determinação da probabilidade de seleção. Esse método evita a convergência prematura do AG (COLHERINHAS, 2016; MITCHELL, 1996).

- Seleção por torneio

Método no qual é escolhido aleatoriamente uma parcela de indivíduos da população, que passam por um processo de competição entre si, baseado em suas aptidões. Em cada torneio os valores do *fitness* de cada indivíduo participante são comparados, sendo selecionado o que se apresentar como mais apto para, então, participar da etapa de reprodução.

O número de torneios que serão necessários é definido a partir da quantidade de indivíduos a serem selecionados para formarem uma nova população. O valor mínimo de torneios deve ser dois, para que haja a possibilidade de competição (COLHERINHAS, 2016). Desde que a dimensão dos torneios seja pequena, esta técnica não induz convergências prematuras e estagnação do processo evolutivo da população (GOLDBERG, 1989; TÁVARA, 2012).

- Elitismo

Durante o processo de seleção pode ocorrer a perda de indivíduos com alto grau de aptidão. Para evitar que isso ocorra utiliza-se o método de elitismo, o qual irá conservar uma pequena quantidade de indivíduos da população com maior aptidão. Para Linden (2008) uma quantidade N dos melhores indivíduos da população atual é copiada para a nova geração, e os outros serão gerados normalmente a partir de um dos outros métodos de seleção a ser escolhido.

2.3.4.2 Cruzamento

Este operador genético, também conhecido como recombinação ou *crossover*, cria uma população nova a partir da troca de material genético entre pares de indivíduos, conhecidos como pais, no qual essa recombinação ocorre de maneira probabilística, onde há uma tendência de transmissão das características dominantes para os descendentes.

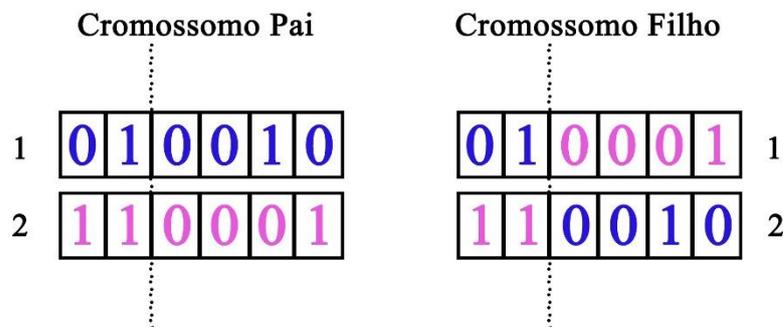
Esta etapa é uma das principais funcionalidades do AG, o diferenciando de outras técnicas computacionais, com foco em reproduzir as características dos indivíduos mais aptos ao ponto de convergir no ponto de alcance da otimização desejada (NUNES, 2011). Desta forma, os filhos irão ser diferentes dos pais, mas com características genéticas proveniente de

ambos. Para Oliveira (2015), o cruzamento de indivíduos aumenta o espaço de solução do algoritmo, até encontrar a melhor solução.

Este operador pode ser implementado de algumas maneiras, cuja seleção é afetada pelo tipo de representação empregue na codificação do indivíduo e pelas características do problema a ser solucionado, sendo estes (EMERICK *et al*, 2009):

- Cruzamento de um ponto de corte: a aplicação deste operador é realizada por meio de um ponto de corte aleatório nos cromossomos pais, gerando os filhos pela recombinação de material genético, sendo que os segmentos de cromossomo gerados a partir do ponto de quebra na cadeia de bits são substituídos; o princípio de funcionamento deste operador é ilustrado na Figura 2.7.

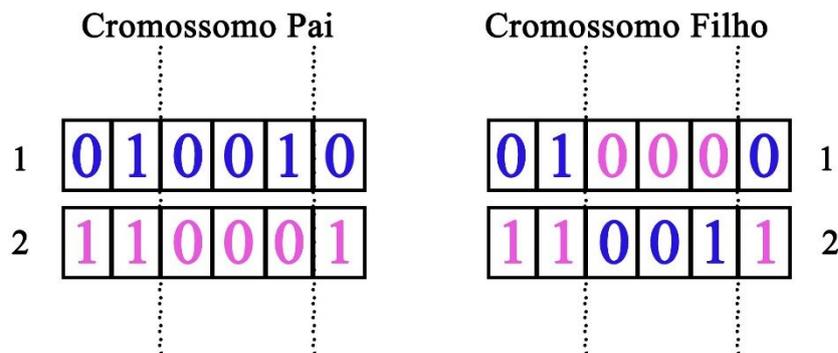
Figura 2.7 - Representação de cruzamento de um ponto.



Fonte: Autor

- Cruzamento de dois ou mais pontos de corte: similar ao cruzamento anterior, este operador é definido por mais de um ponto de separação cromossômica fixa (FILITTO, 2008), no qual os descendentes são gerados pela recombinação genética dos pais de maneira intercalada, como apresentado na Figura 2.8; para Nunes (2011), o cruzamento de dois ou mais pontos mantém juntos os genes que são codificados próximos uns dos outros.

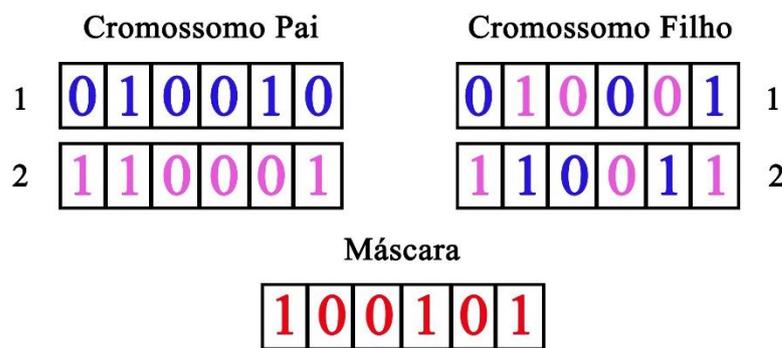
Figura 2.8 - Representação de cruzamento de mais pontos.



Fonte: Autor.

- Cruzamento uniforme: esse tipo de cruzamento, representado pela Figura 2.9, se diferencia do anterior, pois os filhos são gerados através de uma recombinação genética com base em valores estabelecidos por uma máscara binária que é gerada de maneira aleatória; cada gene do descendente é criado a partir de uma cópia do gene correspondente a um dos pais; esta máscara é percorrida bit a bit, verificando se ocorrerá troca ou não de material genético naquela posição (MELO, 2009); quando houver 1 na máscara, o gene correspondente do filho será a cópia do primeiro pai, se for 0 será copiado do segundo pai; esse processo ocorre novamente, só que com a ordem dos pais trocadas, para gerar o segundo filho.

Figura 2.9 - Representação de cruzamento uniforme.



Fonte: Autor.

- Cruzamento Aritmético: É empregado quando se está utilizando a representação real, sendo definido como a combinação de dois cromossomos pais para gerar os cromossomos filhos. Considere dois cromossomos selecionados para o cruzamento:

$$\begin{aligned}
 p_1 &= (p_{1,1}, p_{1,2}, \dots, p_{1,n}) \\
 p_2 &= (p_{2,1}, p_{2,2}, \dots, p_{2,n}) \\
 p_1; p_2 &\in \mathbb{R}^n
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

Onde n representa o número de variáveis da função a ser otimizada. Os cromossomos pais se combinam para gerar 2 cromossomos filhos, S_1 e S_2 , da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \beta p_1 + (1 - \beta)p_2 \\
 S_2 &= \beta p_2 + (1 - \beta)p_1
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

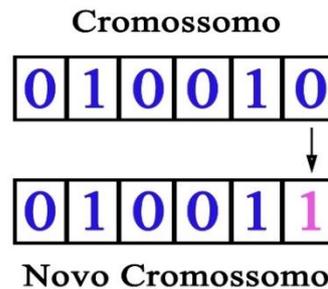
Onde β é um número aleatório, uniformemente distribuído no intervalo $[0,1]$.

2.3.4.3 Mutação

A mutação é um operador genético que é utilizado para diversificar o processo de busca, onde ocorre uma alteração aleatória de um ou mais genes de um cromossomo resultante do

cruzamento. Esta alteração é importante pois cria valores de características que não existiam, ou apareciam em quantidade reduzida na população (POZO *et al*, 2005). A mutação na representação binária é realizada pela troca de 1 por 0 e vice-versa, conforme pode ser observado na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Representação de operação genética de mutação.



Fonte: Autor.

Segundo Castro & Zuben (2002) a mutação na representação real refere-se ao processo de gerar novos indivíduos partindo de um único pai. Os operadores de mutação mais populares são a mutação uniforme e a mutação gaussiana (MICHALEWICZ & SCHOENAUER, 1996). O operador para mutação uniforme, de acordo com Zuben (200), seleciona aleatoriamente um componente $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ do cromossomo $\mathbf{x} = [x_1 \dots x_k \dots x_n]$ e gera um indivíduo $\mathbf{x}' = [x_1 \dots x'_k \dots x_n]$, onde x'_k é um número aleatório (com distribuição de probabilidade uniforme) amostrado no intervalo $[LB, UB]$ e LB o limite inferior e UB o limite superior para o valor do alelo x_k . O mesmo autor afirma ainda que para a mutação gaussiana, todos os componentes de um cromossomo $\mathbf{x} = [x_1 \dots x_n]$ são modificados na forma:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x} + N(0, \sigma) \quad (2.13)$$

Onde $N(0, \sigma)$ é um vetor de variáveis aleatórias gaussianas independentes, com média zero e desvio padrão σ .

2.3.5 Critério de Parada

O processo de evolução do AG é dependente de um critério de parada, uma vez que os AGs não param espontaneamente ao encontrar uma boa solução (MELO, 2009). Para Barcellos (2000), o critério de parada é verificado por meio de teste, no qual se for apresentada uma condição satisfatória a execução é finalizada, caso não seja atendido o critério estabelecido, a população retorna a fase inicial do algoritmo até que seja encontrada a melhor solução. Diante disso, estipula-se, a princípio, um número fixo de gerações como critério de parada. A convergência poderá ser outro critério, pois quando não houver melhora significativa no

cromossomo de maior aptidão por um número de gerações, o processamento irá parar (SRINIVAS; PATNAIK, 1994).

2.3.6 Parâmetros dos Algoritmos

Os parâmetros do AG apresentam influência no desempenho dele, de modo que se deve arbitrar os valores adequadamente para impactar diretamente na evolução e eficiência do algoritmo. Os parâmetros que mais influenciam a execução eficiente do AG são:

- *Tamanho da População*: para Melo (2009) e Rocha (2015) este parâmetro é um indicativo do quantitativo de indivíduos presentes em cada população e que geralmente se mantém constante durante a evolução; quanto maior for a população maior será a cobertura do domínio do espaço de busca do problema, além de prevenir uma possível convergência prematura. Em contrapartida, uma população menor fornece uma pequena cobertura do espaço de busca, o que pode gerar a conversão do algoritmo para um ótimo local, ainda distante de um ótimo global (MELO, 2009); deste modo, na definição do tamanho da população deve-se considerar tanto a diversidade populacional desejada, quanto o tempo de processamento tolerável, a fim de alcançar uma relação de compromisso satisfatória (SIMÃO, 2004).
- *Taxa de Cruzamento*: aponta a probabilidade de ocorrência de recombinação genética entre os indivíduos selecionados; essa taxa indica o número de novas características a serem inseridas na população e quanto maior for esta taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população (SIMÃO, 2004); se a taxa for muito alta novas estruturas serão introduzidas, porém, vai gerar a substituição recombinada da maior parte da população a cada nova geração, ocorrendo a perda da variabilidade genética e até mesmo a convergência de uma população com indivíduos parecidos, diminuindo a eficiência para encontrar a solução ótima global, em contrapartida, se a taxa for muito baixa ela causará lentidão no algoritmo e estagnação (OLIVEIRA, 2015; SIMÃO, 2004).
- *Taxa de Mutação*: indica a probabilidade de mutação de um gene do cromossomo; a mutação garante uma variedade da população, o que pode ocasionar um espaço de busca com ótimas soluções, além de prevenir a estagnação do processo de evolução, entretanto, se essa taxa for muito alta a busca pelo ponto ótimo será, predominantemente, aleatória dentro do espaço de busca; já uma taxa baixa irá prevenir uma estagnação da busca, então, sugere-se fazer a taxa de mutação inversamente proporcional ao tamanho do cromossomo (MELO, 2009).

- *Número de Gerações*: indica a quantidade máxima de populações a ser gerada; um número baixo de gerações pode diminuir o desempenho do AG, pois pode haver uma interrupção no ciclo do AG prematuramente.

2.4 Regressão Linear

Durante muitos anos, na tentativa de descrever a maioria dos fenômenos aleatórios, foram utilizados os modelos normais lineares. A regressão surge da tentativa de correlacionar um conjunto de variáveis, intituladas genericamente por X_k ($k=1 \dots p$) em função de outra grandeza qualquer Y . Aplicada à regressão linear, intrinsecamente tem-se a relação representada pela Equação (2.14).

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p \quad (2.14)$$

Em que a, b_1, b_2, \dots, b_p correspondem aos parâmetros da relação linear desejada. Este tipo de aplicação matemática possui duas finalidades: Explicativa ou Preditiva (PAULA, 2013). A primeira consiste em indicar a relação matemática existente entre as grandezas, porém não comprova a relação de causa-efeito. A segunda tem por finalidade a obtenção de uma relação que permita, mediante análises prognósticas das variáveis X_k , pressupor o valor correspondente de Y , sem a necessidade de medição deste.

Assim, supondo n conjuntos de medida correspondentes as variáveis X_k e Y , tendo como solução o uso deste modelo, haverá a necessidade da inclusão de uma parcela de erro, para a determinação com maior precisão dos resultados desta operação. Assim, utilizando o índice i ($i = 1 \dots n$) com indicativo para cada conjunto, pode ser expressa pela Equação (2.15).

$$y_i = a + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_px_{ip} + e_i \quad (2.15)$$

Onde:

$\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]'$	Vetor dos resultados;
$\mathbf{x}_k = [x_{1k} \ x_{2k} \ \dots \ x_{nk}]'$	Vetor das observações de cada variável X_k ;
$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \dots \ \mathbf{x}_p]$	Matriz de observações (elementos $x_{ik}, i=1 \dots n, k=1 \dots p$);
$\mathbf{b} = [a \ \mathbf{b}_0]' = [a \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_p]'$	Vetor dos parâmetros;
$\mathbf{X}_a = [\mathbf{1} \ \mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \dots \ \mathbf{x}_p]$	Matriz aumentada de observações ($i=0 \dots n, k=0 \dots p$);
$\mathbf{1} = [1 \ \dots \ 1]'$	Vetor unitário de dimensão n ;
$\mathbf{e} = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_n]'$	Vetor dos erros.

Esse modelo de regressão linear tem o objetivo de estimar os valores dos parâmetros a, b_1, b_2, \dots, b_p , por meio da redução dos quadrados dos desvios. Este método é nomeado de

mínimos quadrados, também conhecido como regressão simples ($p = 1$). Para casos onde o $p > 1$, dá-se o nome de multi-regressão.

Na aplicação de uma regressão simples, escreve-se a Equação (2.15) das seguintes formas compactadas pelas equações (2.16) e (2.17).

$$y = a_1 + Xb_0 + e \quad (2.16)$$

ou

$$y = X_a b + e \quad (2.17)$$

Assim que encontrado, os valores da estimativa \hat{b} dos parâmetros b , a expressão operacional desta regressão possibilita a obtenção das estimativas \hat{y} para as leituras correspondentes de $x_1 x_2 \dots x_p$. A expressão será escrita representada pela Equação (2.18)

$$\hat{y} = \hat{a} + \hat{b}_1 x_1 + \hat{b}_2 x_2 + \dots + \hat{b}_p x_p \quad (2.18)$$

Ou na forma simplificada, descrita pela Equação (2.19).

$$\hat{y} = \hat{a} + X' \hat{b}_1 \quad (2.19)$$

Por fim, o cálculo simultâneo dos valores estimados proporcionais às observações utilizadas na parametrização da regressão pode ser encontrado pela Equação (2.20).

$$\hat{y} = X_a \hat{b} \quad (2.20)$$

2.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os conceitos para se obter uma melhor compreensão deste trabalho, exibindo as equações necessárias para a realização dos cálculos de dimensionamento de projetos de iluminação artificial para ambientes internos, assim como o passo a passo básico de um AG simples.

A motivação principal deste capítulo é associar a teoria aos aspectos práticos, de modo a permitir que projetos de dimensionamento luminotécnico junto a técnica de otimização AG, possam ser trabalhados visando o conforto visual e eficiência energética. No capítulo seguinte será tratado, especificamente, a estrutura da ferramenta desenvolvida por este trabalho, apresentando a metodologia aplicada para a construção da ferramenta.

3 METODOLOGIA DO SOFTWARE

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para construção da ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho. Para a elaboração do *software* foram utilizadas planilhas eletrônicas associadas a linguagem de programação *Python*, versão 3.7, tendo o *PyCharm 2018.2.2 Community Edition* como ambiente de desenvolvimento.

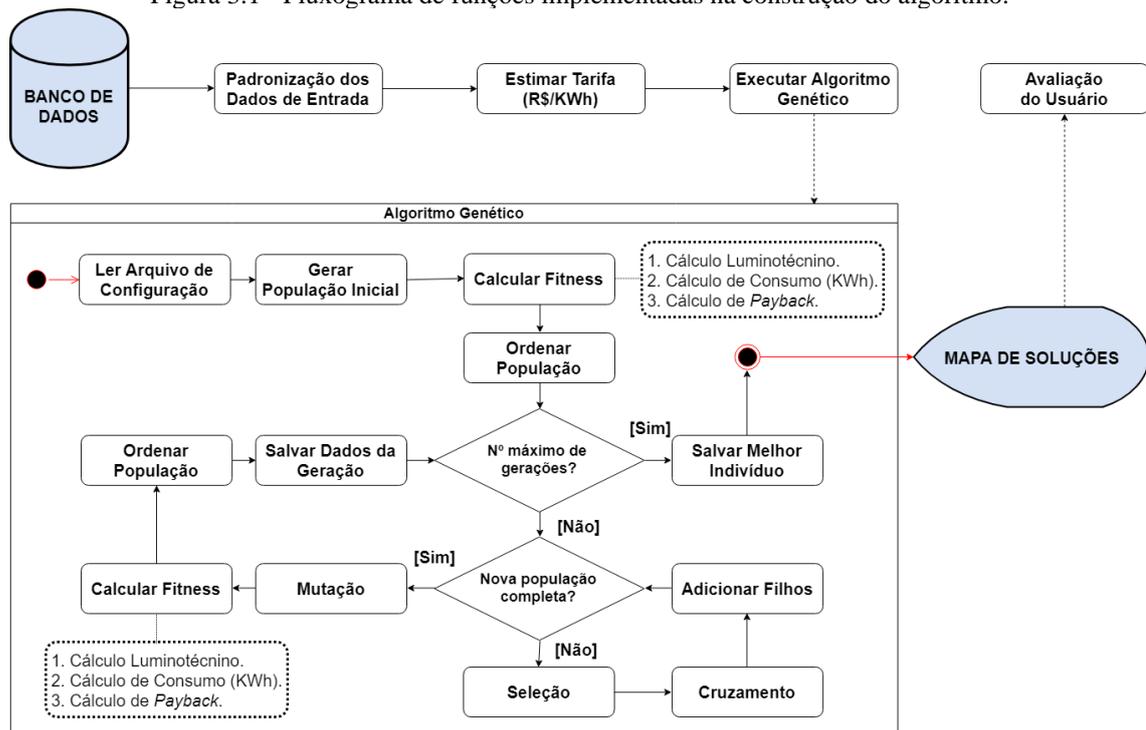
O *Python* é desenvolvido sob uma licença de código aberto aprovada pela *Open Source Initiative*, tornando-o livremente utilizável e distribuível, mesmo para uso comercial. A licença do *Python* é administrada pela *Python Software Foundation*. Portanto, não há nenhuma restrição em sua utilização neste trabalho.

A metodologia utilizada para a construção e execução do *software* desenvolvido, consiste em seguir algumas etapas apresentadas no fluxograma mostrado na Figura 3.1 e descritas nas seções secundárias a seguir.

Inicialmente o arquivo de configuração do AG é lido e é gerada uma população inicial aleatoriamente, que corresponde aos cromossomos que serão avaliados e selecionados para a próxima geração. Neste procedimento de avaliação é calculado o *fitness*, que objetiva a minimização do *payback* da combinação de lâmpadas e luminárias, gerando as primeiras soluções do problema que atendem ao período de tempo de análise estipulada pelo usuário.

Pode ser observado na Figura 3.1 que quando a condição de parada, número máximo de gerações, é atendida o AG para e salva o melhor indivíduo, compondo o mapa de soluções, também chamado de mapa de memória. Quando o critério de parada não é atendido o AG irá executar um acréscimo de iterações que consiste na aplicação dos operadores genéticos na população atual, gerando assim, uma nova solução, que do mesmo modo que a anterior, será submetida à função de avaliação, e esse processo irá se repetir enquanto necessário, durante todo o procedimento de execução do AG.

Figura 3.1 - Fluxograma de funções implementadas na construção do algoritmo.

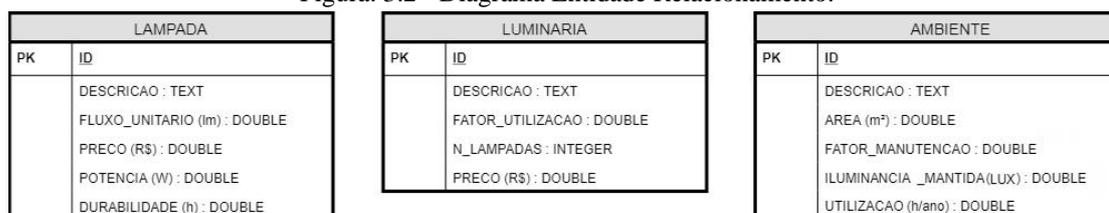


Fonte: Autor.

3.2 Padronização dos Dados

Inicialmente, é considerado a existência de um banco de dados que armazena informações de lâmpadas e luminárias, os quais se tem interesse em utilizar em um projeto luminotécnico. Este banco de dados não necessariamente precisa ser um Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados convencional, como PostgreSQL ou MySQL. Neste caso, considera-se como banco de dados um conjunto de arquivos distintos que contém 99 tipos de luminárias distintas e 102 lâmpadas classificadas em fluorescentes e LED (*Light Emitting Diode*), em modelos tubulares, de bulbo e compactas eletrônicas que foram padronizadas para alimentar a ferramenta. Ocorre que cada fabricante dispõe os dados de acordo com sua formatação própria e sistemas de unidades diferentes, por isso a necessidade de padronizar estes dados que servirão de alimentação para a ferramenta computacional. A Figura 3.2 apresenta o Diagrama Entidade Relacionamento, no qual é mostrado o padrão de dados utilizado, informando o tipo de dado e a unidade de medida.

Figura. 3.2 - Diagrama Entidade Relacionamento.



Fonte: Autor.

A Tabela 3.1 apresenta o conjunto de dados de entradas referentes aos tipos de lâmpadas. É importante destacar que não é possível combinar uma lâmpada com qualquer tipo de luminária, uma vez que cada luminária possui limitação de comprimento em relação as lâmpadas. Diante disso, foi necessária uma padronização no comprimento (C_x) das luminárias e lâmpadas de modo a facilitar as combinações pelo *software*.

Tabela 3.1 - Dados de Entrada: Lâmpadas.

MODELO	Lumilux T5 HE 830 OSRAM
DIMENSÕES (mm)	600 x 16
C_x (mm)	600
FLUXO LUMINOSO	1200
POTÊNCIA (W)	14
TIPO DE LÂMPADA	Tubular
TIPO	Fluorescente
VIDA ÚTIL (h)	24000
PREÇO (R\$)	19,79

Fonte: Autor.

Da mesma forma que a Tabela 3.1, o conjunto de dados de entrada referente aos tipos de luminárias é denotado na Tabela 3.2, o qual também apresenta uma padronização no comprimento.

Tabela 3.2 - Dados de Entrada: Luminárias.

MODELO	A01 Abalux
DIMENSÕES (mm)	708 x 307 x 75
TIPO DE INSTALAÇÃO	Sobrepor
C_x (mm)	600
TIPO DE LÂMPADA	Tubular
NÚMERO DE LÂMPADAS	2
PREÇO (R\$)	57,65

Fonte: Autor.

3.3 Estimação da Tarifa de Energia (Kwh)

Após a padronização dos dados de entrada é realizada a estimativa da tarifa de energia elétrica. Esta tarifa será utilizada posteriormente pelo AG para o cálculo do *fitness*. Para realizar

a estimação da tarifa é utilizada uma Regressão Linear (RL) para prever valores futuros com base em dados de anos anteriores.

Os dados utilizados são do período de 2008 a 2018, fornecidos pela CELPA - Centrais Elétrica do Pará - e que são de domínio público. A CELPA fornece o ano e a tarifa cobrada por MWh, conforme apresentado na Tabela 3.3. Para os estudos realizados com o *software* desenvolvido, esta tarifa é convertida para kWh.

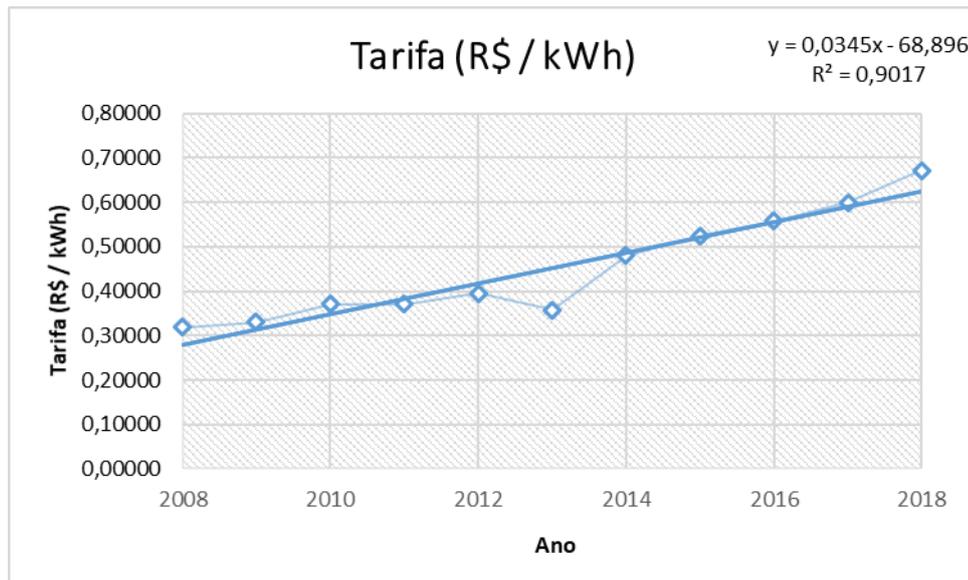
Tabela 3.3 - Estimação de Tarifa de Energia Elétrica (R\$/kWh).

Ano	Tarifa (R\$/MWh)	Tarifa (R\$/kWh)	Variação (%)	Tarifa Estimada (kWh)
2008	319,36	0,31936		0,38000
2009	330,59	0,33059	3	0,41450
2010	369,9	0,36990	11	0,44900
2011	369,9	0,36990	0	0,48350
2012	395,17	0,39517	6	0,51800
2013	357,47	0,35747	-11	0,55250
2014	479,77	0,47977	25	0,58700
2015	525,39	0,52539	9	0,62150
2016	557,27	0,55727	6	0,65600
2017	599,02	0,59902	7	0,69050
2018	670,98	0,67098	11	0,72500
Média	452,26	0,45226	6,75	0,55250

Fonte: Autor.

É possível observar que a tarifa média em kWh foi de R\$0,45226 e a variação média da tarifa foi de 6,75%, ambos estes valores poderiam ser adequados para serem utilizados no cálculo do *fitness* como constantes quando fossem considerados valores futuros. No entanto, para uma melhor representação, o *software* utiliza os valores futuros estimados pela RL. A tarifa média estimada, considerando os valores passados, foi de R\$0,55250, sendo este valor muito próximo do valor real, como pode ser observado pelo gráfico apresentado na Figura 3.3, o qual mostra os dados de tarifa no decorrer do tempo em conjunto com a reta definida pela RL.

Figura 3.3 - Regressão Linear.



Fonte: Autor.

O coeficiente de determinação (R^2) indica o grau de correlação entre as variáveis e quanto mais próximo de 1 maior será a correlação. O R^2 obtido é de 0,9017 indicando que o modelo apresentado é bastante representativo. Para auxiliar o cálculo do *fitness* será utilizada a Equação (3.1) da reta que foi encontrada, sendo possível estimar valores futuros.

$$y = 0,0345x - 68,896 \quad (3.1)$$

3.4 Execução do Algoritmo Genético

O AG tem como objetivo realizar combinações entre lâmpadas e luminárias e, em seguida, encontrar a quantidade de cada uma através do cálculo luminotécnico. De posse da quantidade de lâmpadas, é possível calcular a quantidade de energia consumida durante 1 ano, a qual é multiplicada pela tarifa estimada, obtida através da RL, durante um período estipulado pelo usuário, para que possa ser realizada uma análise de retorno financeiro. Por se tratar de um algoritmo elitista, a solução que obtiver o menor *payback* sobrevive e é passada para a próxima geração.

3.4.1 Cromossomo

A população inicial é gerada aleatoriamente; cada cromossomo da população é considerado uma solução que será avaliada pela função *fitness*. A representação do cromossomo é definida por um vetor de 2 genes, cada gene utiliza codificação real no intervalo de [0 1]. O primeiro gene representa o tipo de lâmpada e o segundo o tipo de luminária. A Figura 3.4, apresenta um exemplo de cromossomo que pode ser gerado. Os genes podem representar qualquer quantidade de tipos distintos de acordo com a base de dados utilizada.

Figura 3.4 - Cromossomo.

<i>lâmpada</i>	<i>luminária</i>
0.5	0.5

Fonte: Autor.

3.4.2 Indivíduo

A decodificação de cada cromossomo para indivíduo é realizada em função da desnormalização dos genes para o tipo de lâmpada e luminária. A decodificação do gene é realizada conforme a Equação (3.2).

$$gene_{new} = round(gene_{old} \times (max - min) + min) \quad (3.2)$$

Onde:

$gene_{old}$: Gene a ser decodificado;

min : Menor *id* do tipo de lâmpada ou luminária;

max : Maior *id* do tipo de lâmpada ou luminária;

$round$: Função que arredonda o número para o inteiro mais próximo.

Ressalta-se que os tipos de luminárias são filtrados em função de C_x de uma lâmpada. A Tabela 3.4 apresenta o quantitativo de lâmpadas e luminárias para cada C_x .

Tabela 3.4 - Quantitativo de lâmpadas e luminárias por C_x .

C_x (mm)	LÂMPADAS	ID (lâmpada)	LUMINÁRIAS	ID (luminária)
60	10	0 - 9	1	0
600	40	10 - 49	36	0 - 35
1200	42	50 - 91	59	0 - 59
2380	7	92 - 98	1	0
2425	3	99 - 101	2	0 - 1
Total	102	-	99	-

Fonte: Autor.

A Figura 3.5 apresenta o indivíduo referente ao cromossomo da Figura 3.4, considerando que o tipo de lâmpada tem C_x de 1200 mm, conforme a Tabela 3.4, logo o valor de identificação pelo AG para lâmpada está entre 50 – 91 e 0 – 59 para luminária.

Figura 3.5 - Indivíduo.

<i>lâmpada</i>	<i>luminária</i>
50	29

Fonte: Autor

3.4.3 Função *fitness*

A função de avaliação é um modo de determinar a qualidade de um indivíduo como solução do problema em questão (LINDEN, 2008). O AG associa a função *fitness* a ser

otimizada com o menor *payback* da combinação lâmpada e luminária, dentro do período estipulado pelo usuário, Equação (3.3). Para isso, deve-se primeiramente calcular o fluxo luminoso total, através da Equação (2.6).

$$fitness = payback \quad (3.3)$$

A Tabela 3.5 apresenta um exemplo do cálculo de fluxo luminoso, considerando um ambiente de sala de aula com uma área de 46,87 m², com iluminância mantida recomendada pela Norma vigente de 500 lux, uma luminária com fator de utilização de 0,62, e um fator de manutenção de 0,8.

Tabela 3.5 - Cálculo do Fluxo Luminoso Inicial.

<i>A</i>	<i>E_m</i>	<i>FU</i>	<i>FM</i>	φ
46,87	500	0,62	0,8	47247,9839

Fonte: Autor.

Uma vez realizado o cálculo do φ , é preciso determinar a quantidade de lâmpadas e luminárias necessárias para atingir esse fluxo através da Equação (2.7). É importante ressaltar que o período em que a iluminação é utilizada pode variar para cada ambiente.

A Tabela 3.6 apresenta um exemplo de cálculo da quantidade de luminárias necessárias, considerando os dados da Tabela 3.5. A quantidade de luminárias final é arredondada para cima e, conseqüentemente, a quantidade total lâmpadas é o produto da quantidade total de luminárias pela quantidade de lâmpadas que a luminária suporta.

Tabela 3.6 - Cálculo da Quantidade de Luminárias e Lâmpadas.

CENÁRIO	φ	<i>n</i>	φ_{lp}	N	N_{lp}
Sala_Aula	47.247,9839	2	1850	12,77	26

Fonte: Autor.

Após determinar a quantidade de lâmpadas que serão utilizadas, é possível calcular o consumo de energia anual para o cenário. A Tabela 3.7 apresenta os fatores utilizados para determinar o consumo anual segundo a Equação (3.4).

$$\text{Consumo(kWh)} = \frac{P \times N_{lp} \times H}{1000} \quad (3.4)$$

Sendo:

P: A potência em Watts da lâmpada;

N_{lp}: A quantidade de lâmpadas;

H: A quantidade de horas de uso das lâmpadas.

Tabela 3.7 - Cálculo do Consumo de Energia (kWh).

CENÁRIO	POTÊNCIA (W)	N_{lp}	$H_{ora/ano}$	CONSUMO (kWh)
Sala_Aula	18	26	3328	1557,504

Fonte: Autor.

Em seguida, é realizada uma análise de viabilidade financeira. Para isso, deve-se calcular o Valor Presente Líquido (VPL). O VPL é um dos métodos mais conhecidos e utilizados para a análise de viabilidade econômica de projetos de investimentos. Essa metodologia consiste em trazer para a data inicial os fluxos de caixa (FC) de um projeto de investimento e somá-los ao valor do custo de aplicação inicial, usando como taxa de desconto a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Para Kichel (2017) a TMA pode ser entendida como a taxa mínima para que o projeto de investimento tenha o mais baixo grau de risco possível. O projeto que apresenta VPL maior que zero (positivo) é economicamente viável (SILVA, 2011).

O FC é um instrumento gerencial que controla e informa todas as movimentações financeiras, entradas e saídas de valores, de um dado período, sendo composto por dados obtidos dos controles de contas a pagar, a receber, de despesas, de saldos de aplicações, de todos os elementos que representem as movimentações financeiras de um empreendimento (SEBRAE, 2010).

O FC foi definido pela Equação (3.5), sendo a diferença entre o consumo de energia inicial (C_i) do sistema de iluminação já existente no ambiente e o consumo de energia calculado do indivíduo (C_j), que é o sistema sugerido pelo *software*, multiplicada pela tarifa de energia elétrica em kWh, estimada pela RL, e somada com a diferença do custo de manutenção da troca de lâmpadas do ambiente inicial (M_i) e do indivíduo (M_j). Considera-se que o objetivo é reduzir os custos de energia, logo o custo do indivíduo deveria ser menor em relação a configuração inicial, por isso o FC é definido por esta diferença de custos.

$$FC = (C_i - C_j) \times \text{tarifa} + (M_i - M_j) \quad (3.5)$$

O FC é considerado no cálculo do VPL, sendo definido pela Equação (3.6), onde P é o período de análise, o qual foi determinado em 10 anos como valor padrão na ferramenta computacional desenvolvida, mas que pode ser alterada conforme a vontade do usuário.

$$VPL = \sum_{i=0}^P \frac{FC_i}{(1 + TMA)^i} \quad (3.6)$$

A Tabela 3.8 apresenta, como exemplo, o cálculo do VPL realizado para o indivíduo da Tabela 3.7, considerando um período de 20 anos para a análise. A coluna referente ao saldo inicia com um valor negativo representando o investimento necessário para adquirir as lâmpadas e luminárias, e as linhas seguintes correspondem a soma do valor da linha anterior com o VPL calculado.

O VPL é necessário para que o *payback* possa ser calculado. O *payback*, ou período de *payback*, refere-se ao número de períodos necessários para que o fluxo de benefícios supere o capital investido (SOUZA; CLEMENTE, 2008). Quando o *payback* é calculado sem descontar os fluxos de caixa futuros, então é chamado de *payback* simples. Quando o cálculo utiliza uma taxa de desconto, a TMA, é chamado de período de *payback* descontado.

A vantagem de se utilizar o *payback* descontado é por ser simples e prático, como o *payback* simples, com o diferencial de considerar o valor do dinheiro no tempo. Entretanto, assim como o *payback* simples, não considera os fluxos de caixa após o período de *payback*.

Tabela 3.8 - Cálculo do VPL.

P	Ano	Tarifa Estimada (R\$)	Consumo Inicial (R\$)	Consumo Indivíduo (R\$)	Fluxo de Caixa (R\$)	VPL	Saldo (R\$)
0	2018				-2465,06	-2465,06	-2465,06
1	2019	0,76	2622,40	870,13	1752,27	1592,97	-872,09
2	2020	0,79	2741,52	909,66	1831,87	1513,94	641,85
3	2021	0,83	2860,64	949,18	1911,46	1436,11	2077,96
4	2022	0,86	2979,77	988,71	1991,06	1359,92	3437,88
5	2023	0,90	3098,89	1028,23	2070,65	1285,71	4723,59
6	2024	0,93	3218,01	1067,76	2150,25	1213,76	5937,35
7	2025	0,97	3337,13	1107,28	2229,85	1144,26	7081,62
8	2026	1,00	3456,25	1146,81	2309,44	1077,37	8158,99
9	2027	1,04	3575,37	1186,34	2389,04	1013,19	9172,18
10	2028	1,07	3694,50	1225,86	2468,64	951,77	10123,94
11	2029	1,10	3813,62	1265,39	2548,23	893,14	11017,08
12	2030	1,14	3932,74	1304,91	2627,83	837,31	11854,39
13	2031	1,17	4051,86	1344,44	2707,42	784,24	12638,63
14	2032	1,21	4170,98	1383,96	2787,02	733,91	13372,54
15	2033	1,24	4290,10	1423,49	2866,62	686,25	14058,79
16	2034	1,28	4409,23	1463,01	2946,21	641,18	14699,97
17	2035	1,31	4528,35	1502,54	3025,81	598,64	15298,61
18	2036	1,35	4647,47	1542,06	3105,41	558,53	15857,14
19	2037	1,38	4766,59	1581,59	3185,00	520,77	16377,92
20	2038	1,42	4885,71	1621,11	3264,60	485,26	16863,18

Fonte: Autor

Observando a coluna saldo da Tabela 3.8, percebe-se que o valor deixa de ser negativo e torna-se positivo a partir do período 2, referente ao ano de 2020. Isso significa que o *payback*

é um valor que está entre os períodos 1 e 2. Para a definir o valor exato de *payback* utiliza-se a Equação (3.7).

$$payback = i + \frac{|\text{saldo}_i|}{|\text{saldo}_i| + |\text{saldo}_{i+1}|} \quad (3.7)$$

Onde:

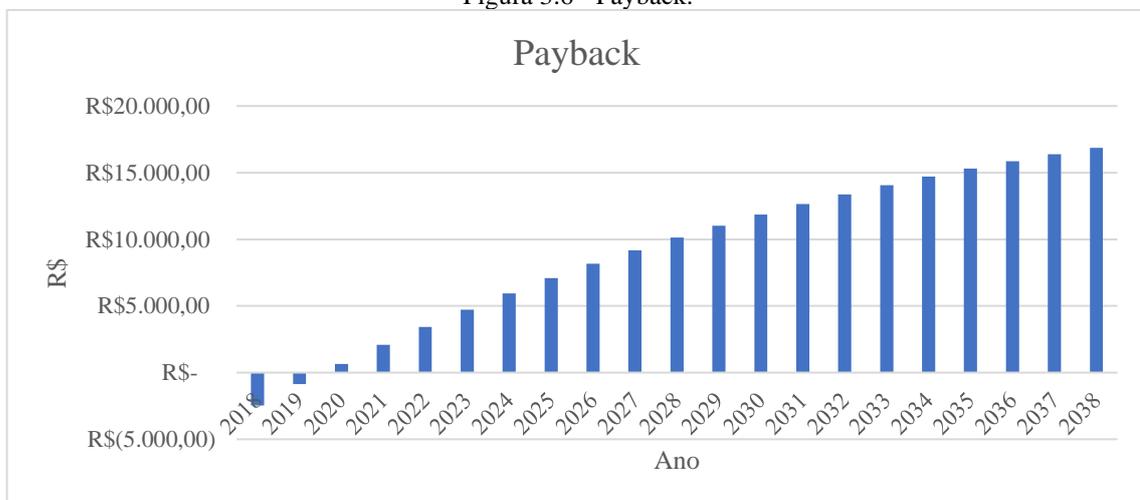
i: Último período em que o saldo foi negativo;

saldo_{*i*}: Saldo do período *i*;

saldo_{*i+1*}: Saldo do período seguinte ao período *i*.

A Figura 3.6 apresenta o gráfico referente ao *payback* apresentado pela Tabela 3.8. Para este caso, o *payback* é de 1,58 anos. Caso não haja um período em que o saldo faça uma transição de negativo para positivo é considerado que não houve retorno financeiro do investimento dentro do período analisado. Neste caso, a função *fitness* apresenta o pior valor possível, infinito.

Figura 3.6 - Payback.



Fonte: Autor.

3.4.4 Operadores Genéticos

A seleção é o processo de escolha dos indivíduos que participarão do processo de cruzamento, em que, geralmente, a aptidão desse indivíduo é o critério fundamental para determinar a probabilidade de o mesmo ser escolhido (LUCAS, 2002). O método de seleção por torneio foi a abordagem escolhida para que os indivíduos escolhidos, aleatoriamente, participem de um *ring*.

O operador de cruzamento utilizado é o cruzamento aritmético. A obtenção de novos indivíduos acontece por meio de operações aritméticas entre valores genéticos dos pais. Neste operador cada gene gerado é obtido através de uma média ponderada dos genes dos pais, conforme as Equações (3.8) e (3.9). Os pesos são gerados através da geração de um número aleatório α no intervalo de $[0, 1]$, obtido a partir de uma distribuição uniforme.

$$\text{filho}_1[i] = \alpha \times \text{pai}_1[i] + (1 - \alpha) \times \text{pai}_2[i] \quad (3.8)$$

$$\text{filho}_2[i] = (1 - \alpha) \times \text{pai}_1[i] + \alpha \times \text{pai}_2[i] \quad (3.9)$$

O operador de mutação utilizado nessa proposta é a mutação gaussiana reflexiva, onde um número aleatório é gerado através de uma distribuição gaussiana com média zero e desvio padrão no intervalo de $[0, 1]$ definido pelo usuário, o qual representa o máximo de alteração que um gene pode sofrer. Caso a alteração extrapole o intervalo de $[0, 1]$, o excedente é refletido para que fique dentro do intervalo.

3.5 Avaliação das Soluções

3.5.1 Métricas de Avaliação

De forma a avaliar a qualidade dos resultados do AG é necessário realizar a exaustão de testes, variando alguns parâmetros da configuração, para que sejam calculados e avaliados os valores de acurácia e precisão do algoritmo, ambas em percentuais, considerando a configuração como melhor quanto mais próximo de 100% for. Para os cálculos de acurácia e precisão é necessário executar o AG n vezes para observar o comportamento das soluções mantém um padrão, sendo considerados apenas o *fitness* do melhor indivíduo da última geração de cada execução.

A acurácia tem como propósito verificar o quão próximo a solução encontrada está da melhor solução possível, disponível na base de dados, a qual é encontrada através da busca por força bruta. A acurácia é calculada para cada execução do AG, através da Equação (3.10).

$$\text{acurácia} = \frac{(\text{fitness}_{\max} - \text{fitness}_{\text{ind}})}{(\text{fitness}_{\max} - \text{fitness}_{\text{solution}})} \times 100\% \quad (3.10)$$

Onde fitness_{\max} corresponde ao período máximo de *payback* ao ser analisado pela ferramenta, 10 anos. O $\text{fitness}_{\text{solution}}$ é obtido através da execução por força bruta, o qual

representa a solução ótima global. O valor do *fitness* da execução do AG é substituído em $fitness_{ind}$.

A acurácia final é a média das acurácias das n execuções do AG como disposto na Equação (3.11).

$$\text{acurácia} = \frac{(\text{acurácia1} + \text{acurácia2} + \dots + \text{acuráciaN})}{N} \quad (3.11)$$

Como o AG tem uma característica estocástica, devido a geração aleatória da população inicial, é preciso realizar n execuções para avaliar a precisão, ou seja, verificar se as soluções são próximas entre si. O desvio padrão é um indicativo de precisão, onde, quanto maior o valor do desvio padrão maior será a variabilidade e, conseqüentemente, menor será a precisão. A precisão é o cálculo da porcentagem do desvio das melhores soluções (elite) em relação ao desvio padrão máximo obtido a partir da a variância máxima de conjunto de dados, disposto na Equação (3.12).

$$V \leq \left(\frac{b - a}{2}\right)^2 \quad (3.12)$$

Onde a e b são os valores mínimo (0 anos) e máximo (10 anos), respectivamente, em relação ao período de *payback* em análise. Logo, a variância máxima é ≤ 25 . Considerando que o desvio padrão equivale a raiz quadrada da variância, têm-se que o desvio padrão máximo corresponde a 5.

Ao executar o AG n vezes é possível calcular o desvio padrão dos melhores indivíduos encontrados. Com isso, a precisão é uma porcentagem do desvio das soluções encontradas em relação ao desvio máximo, sendo aplicado o complemento, uma vez que a precisão é máxima quando o desvio padrão das soluções é zero, resultando na Equação (3.13).

$$\text{precisão} = \left[1 - \left(\frac{\text{desvio}}{5}\right)\right] \times 100\% \quad (3.13)$$

3.5.2 Mapa de Memória

Como um AG costuma ser geracional, todas as soluções encontradas ao longo das gerações são perdidas, sendo mantidas apenas as soluções da última geração. Considerando ainda que o AG convergiu, é muito provável que todos os indivíduos da última população sejam iguais, ou próximas, ao melhor indivíduo. Logo, é possível dizer que um AG elitista costuma apresentar o melhor indivíduo da última geração como solução para um problema analisado.

Pensando nisso, foi implementado um mapa de memória, ou de soluções, onde são armazenadas todas as soluções encontradas em todas as gerações. Um mapa de memória, também conhecido como dicionário, é uma estrutura de dados composta de chave e valor. A chave consiste em um código que não pode ser repetido e tem a finalidade de indexar algum valor, com isso a busca de um determinado elemento torna-se mais simples.

O mapa de memória utilizado, conforme Tabela 3.9, tem como chave o fenótipo do indivíduo que representa a combinação do tipo de lâmpada e tipo de luminária utilizados, e o valor consiste de uma tupla composta pelo *fitness* e investimento inicial calculados.

Tabela 3.9 - Mapa de Memória.

Chave		Valor	
Fenótipo	<i>Payback</i> (anos)	Investimento Inicial (R\$)	
[0, 3]	4,0147	R\$	2.280,74
[1, 1]	5,6025	R\$	2.770,40
...
[3, 4]	3,6426	R\$	1.238,50
[7, 5]	<i>infinito</i>	R\$	1.166,62

Fonte: Autor.

Como a função *fitness* tem o objetivo de minimizar o *payback*, o AG vai destacar a melhor solução dentre as soluções encontradas por ele e apresentar o mapa de memória contendo todas as demais soluções. O mapa de memória é por padrão ordenado pela chave, mas é possível ordenar os dados pelo *payback* ou pelo investimento inicial, ficando esta análise a critério do usuário.

Esta ferramenta serve de apoio na tomada de decisão, pois o AG apresenta a melhor solução encontrada, mas a decisão final cabe ao usuário. O mapa de memória ordena as soluções do menor para o maior *payback*, apresentando também o valor a ser investido inicialmente para cada solução. Dessa forma, o usuário pode decidir se opta pela solução que obteve o menor *payback*, o menor investimento inicial ou uma solução meio termo entre os dois critérios. No entanto, antes da tomada de decisão deve-se descartar as soluções que apresentaram *fitness* com o valor infinito, pois é considerado que essas soluções não conseguem recuperar o valor investido dentro do período analisado.

Além de armazenar as soluções encontradas, o mapa de memória também provê redução do tempo de execução do AG. É possível que indivíduos distintos sejam gerados com o mesmo fenótipo no decorrer das gerações. Levando isso em consideração, antes de um indivíduo ser avaliado pela função *fitness*, primeiramente é verificado se este indivíduo está no mapa de memória. Caso verdadeiro, é utilizado o *fitness* que está armazenado no mapa e segue-se para

o próximo indivíduo. Caso contrário é calculado o *fitness* e em seguida armazenado no mapa de memória para que possa ser utilizado em buscas futuras.

3.6 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado a metodologia utilizada para a criação da ferramenta computacional proposta, descrevendo todos os passos necessários apresentados no fluxograma da Figura 3.1. Foi descrito a representação do cromossomo e indivíduo utilizados no AG que representam as soluções do problema analisado, bem como os passos necessários para a realização do cálculo da função *fitness* utilizada para avaliar o melhor indivíduo. E, finalmente, também foi apresentado um exemplo de mapa de memória contendo as soluções encontradas e o critério para descartar soluções indesejadas.

É importante destacar que pode ocorrer do AG ficar várias gerações sem haver uma evolução do *fitness* do melhor indivíduo da população. Isso pode significar que o AG ficou preso em um ótimo local. Para tentar evitar isso, utilizou-se da estratégia de gerar metade da população de forma aleatória quando ocorrer 10 gerações seguidas sem evolução, resetando o contador temporal quando ocorrer.

O capítulo seguinte mostrará os resultados obtidos ao aplicar a ferramenta em um estudo de caso.

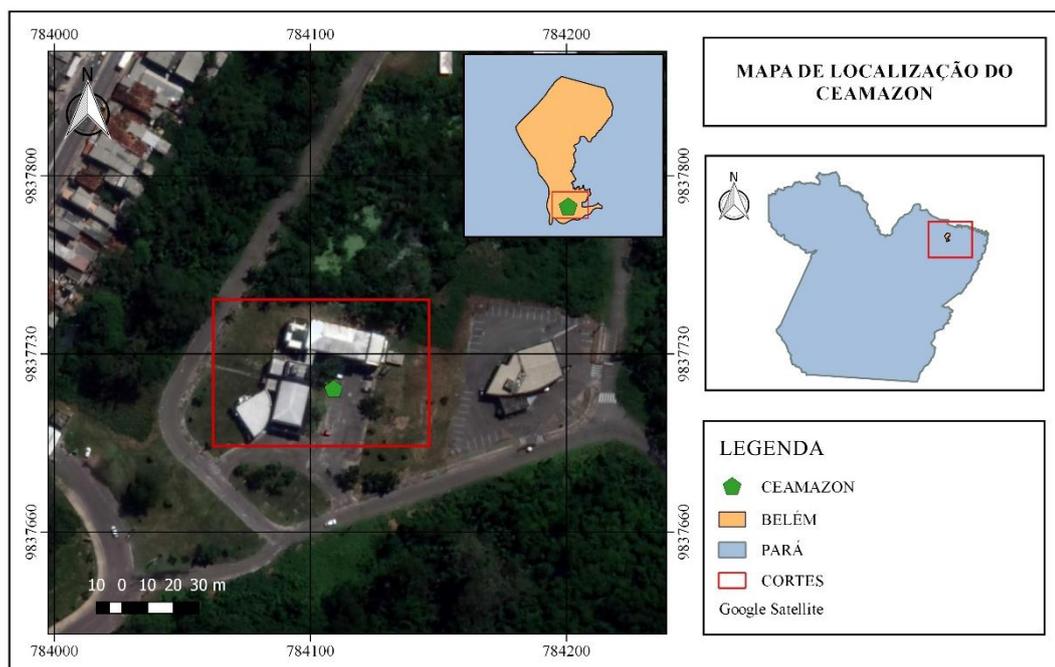
4 ESTUDO DE CASO

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão apresentados e discutidos, a partir de um estudo de caso, os resultados da implementação computacional da proposta de otimização do cálculo luminotécnico de ambientes internos, assim como a simulação da distribuição luminosa destes.

O Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON) foi a edificação escolhida para implementação do *software*. O CEAMAZON é um centro de pesquisa voltado para tecnologias em energia, vinculado à Universidade Federal do Pará (UFPA), compreendendo uma área total construída de 1907,98 m². Este localiza-se na área do Parque de Ciência e Tecnologia Guamá (PCT Guamá), com latitude 01°46'67" e longitude 48°44'69", Figura 4.1, sendo uma área de incentivo a inovação e tecnologia situado entre duas Instituições Federais, a UFPA e a Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), na cidade de Belém.

Figura 4.1 - Localização do edifício do CEAMAZON.



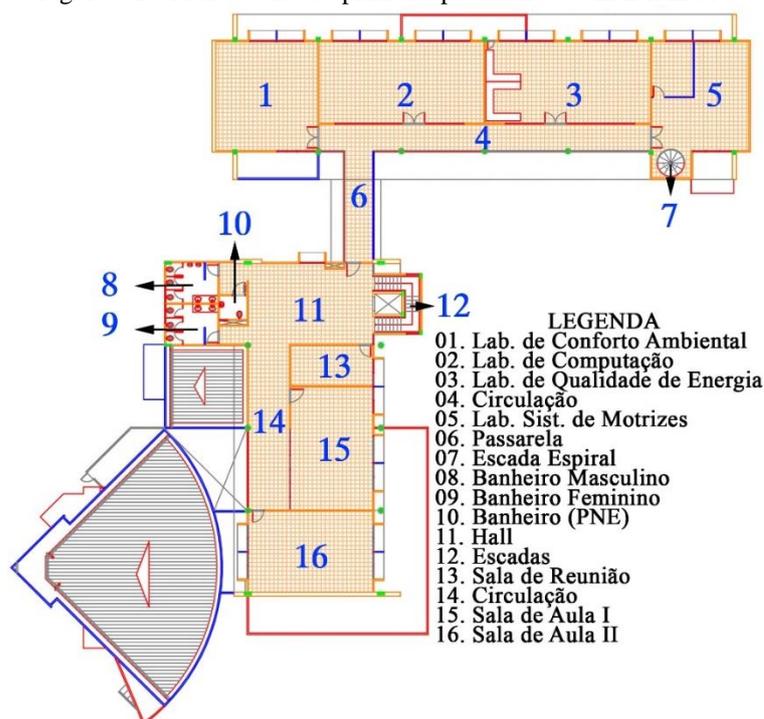
Fonte: Autor.

O CEAMAZON, inaugurado em 2010, é resultado de união de professores e pesquisadores da UFPA, apoiados pela Eletrobrás e o Governo do Estado do Pará, com o objetivo de fomentar o desenvolvimento regional, buscando o aprimoramento da eficiência energética por meio de desenvolvimento tecnológico, e criando subsídios para a regulamentação do mercado de eficiência energética na região norte (OLIVEIRA, 2013). Hoje,

o CEAMAZON oferece serviços de pesquisa científica e tecnológica, estudos e consultorias para empresas e instituições públicas e privadas, majoritariamente localizadas no Estado do Pará, realizando diagnósticos em Eficiência Energética (EE) e Qualidade da Energia Elétrica (QEE) (PERREIRA, 2014).

O edifício é constituído por um andar térreo e mais dois pavimentos. O 1º pavimento, representado pela Figura 4.2, possui duas salas de aula, uma sala de reunião, quatro laboratórios, três banheiros sendo um masculino, outro feminino e um PNE (Portadores de Necessidades Especiais). O sistema de iluminação artificial em operação na edificação é predominantemente de lâmpadas fluorescentes, com potência de 20 W cada. Para demonstrar a validação da utilização do AG foram selecionados quatro ambientes distintos, o laboratório de conforto ambiental - 1, o banheiro masculino - 8, a área de circulação - 14 e a sala de aula I - 15, que serão chamados de cenários 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

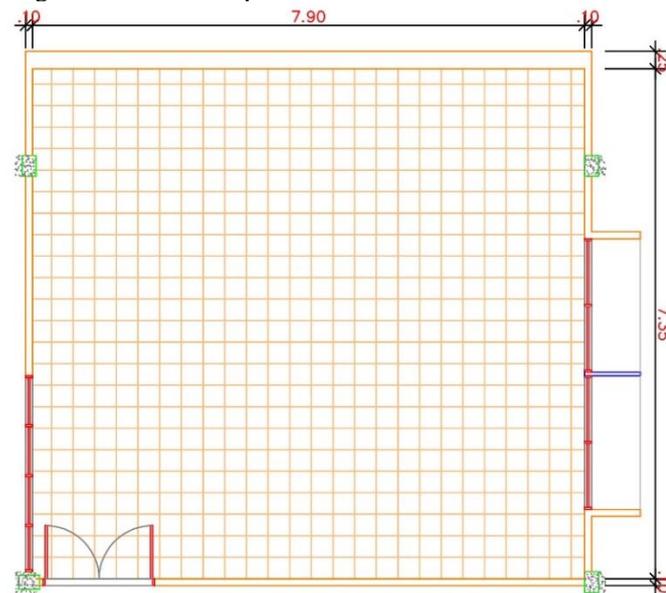
Figura 4.2 - Planta baixa do primeiro pavimento - CEAMAZON.



Fonte: Autor.

O cenário 1, Figura 4.3, é um espaço destinado ao desenvolvimento de estudos, projetos e avaliações através de experimentos e simulações, em busca de fundamentos e procedimentos visando o conforto ambiental. Este ambiente apresenta uma área de aproximadamente 58 m² e dispõe de 12 luminárias de embutir, com aletas de alumínio, para quatro lâmpadas tubulares.

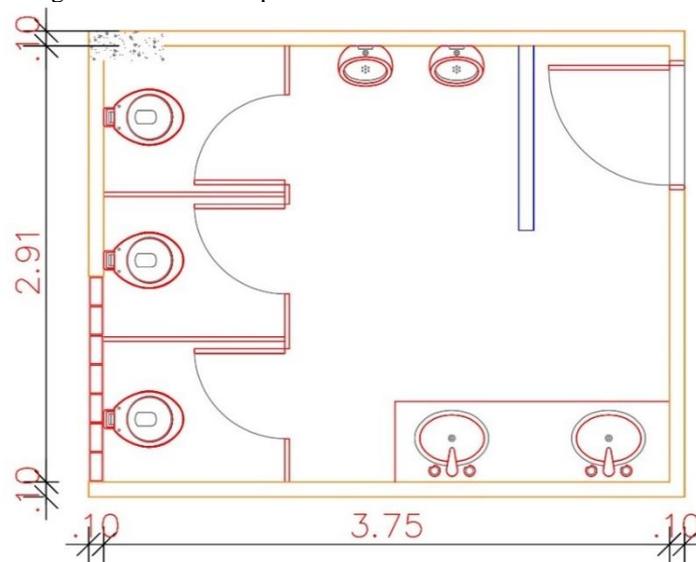
Figura 4.3 - Corte de planta baixa sem mobiliário - Cenário 1.



Fonte: Autor.

O cenário 2, disposto na Figura 4.4, tem uma área total de aproximadamente 11,49 m², e não apresenta luminárias instaladas, apenas soquetes para base E27, em um total de 3 lâmpadas compactas eletrônicas.

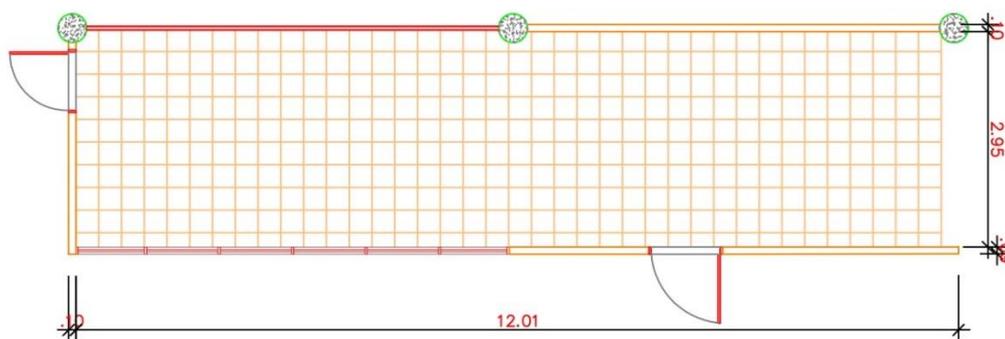
Figura 4.4 - Corte de planta baixa sem mobiliário - Cenário 2.



Fonte: Autor

O cenário 3 é uma área de passagem que não exige uma extensa luminosidade, apresentando uma superfície de 35,40 m², Figura 4.5. As luminárias em uso são de sobrepor com difusor em vidro jateado, para 2 lâmpadas fluorescentes compactas, tendo sido instaladas 4 luminárias.

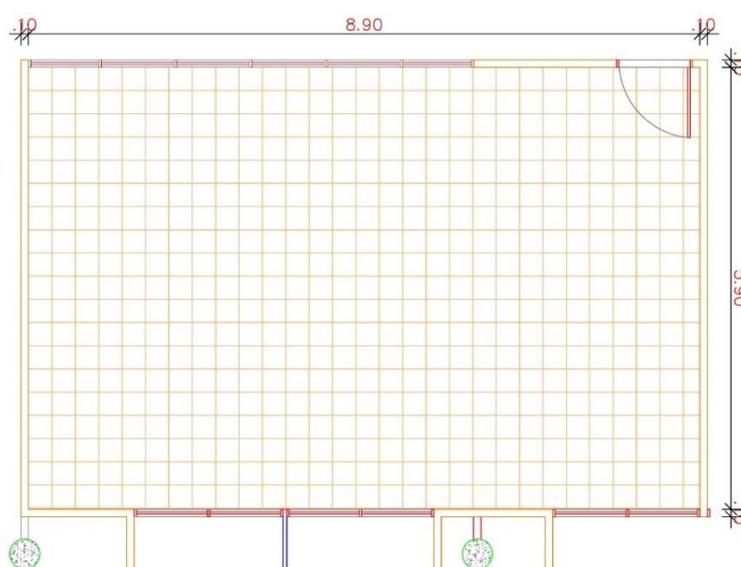
Figura 4.5 - Corte de planta baixa sem mobiliário - Cenário 3.



Fonte: Autor

No cenário 4 as luminárias dispostas são aletadas e embutidas no forro, comportando quatro lâmpadas fluorescentes tubulares e um total de 9 luminárias instaladas. Apresenta uma área total de 52,51 m², com as dimensões expostas pela Figura 4.6.

Figura 4.6 - Corte de planta baixa sem mobiliário - Cenário 4.



Fonte: Autor

De acordo com a frequência de uso dos ambientes estipulou-se as horas de uso por dia das lâmpadas para cada cenário, expressos na Tabela 4.1. Nesta também se apresentam os valores recomendados de fluxo luminoso, pela NBR 8995-1, de acordo com o tipo de atividade desenvolvida. Para todos os cenários foi considerado um FM de 0,8, e refletâncias de: teto = 70%; parede = 50%; e chão = 20%. Estes dados são variáveis importantes para o cálculo luminotécnico. Os dados base para o cálculo luminotécnico estão dispostos no Apêndice A.

Tabela 4.1 - Dados de entrada.

CENÁRIO	HORAS	ILUMINÂNCIA (Lux)
1	11	500
2	4	200
3	2	100
4	3	500

Fonte: Autor.

4.2 Configuração do Algoritmo Genético

Foi realizada a exaustão de testes para avaliar a precisão e acurácia, na qual a melhor combinação de ambos parâmetros foi utilizada na configuração do AG. Foram testados 4 valores de taxa de cruzamento e de mutação, fixando os demais parâmetros conforme mostrados posteriormente na configuração final. Para cada combinação desses valores, o AG foi executado 5 vezes, exemplificado pela Tabela 4.2, para obtenção de um par de valores de precisão e acurácia, extraído a melhor solução encontrada. Ao término, os *fitness* dessas soluções são utilizados para os cálculos de acurácia e precisão conforme descrito nas Equações (3.8), (3.9) e (3.11).

Tabela 4.2. Avaliação do AG configurado com 40% de taxa de mutação e 80% taxa de cruzamento.

FORÇA BRUTA			0,45479992586755
EXECUÇÃO	FITNESS	ACURÁCIA (%)	
1	0,454799926	100	
2	0,454799926	100	
3	0,454799926	100	
4	0,454799926	100	
5	0,454799926	100	
DESVIO PADRÃO		0	-
PRECISÃO (%)		100	
ACURÁCIA (%)		100	

Fonte: Autor.

Como pode ser observado na Tabela 4.3, todas as configurações testadas obtiveram alta acurácia e precisão, ultrapassando os 95%, sendo a melhor configuração identificada composta por uma taxa de cruzamento de 75% e taxa de mutação de 40%, alcançando 100% de acurácia (A) e precisão (P), sendo testado 35,79% das soluções (S) disponíveis na base de dados, ou seja, mesmo após 5 execuções, o AG foi capaz de acertar a melhor solução, obtida através de força bruta, todas as vezes, e sem precisar testar todas as soluções disponíveis.

Tabela 4.3. Testes de configurações do AG.

Taxa de Mutação (%)	Taxa de Cruzamento (%)											
	65			70			75			80		
	A (%)	P (%)	S (%)	A (%)	P (%)	S (%)	A (%)	P (%)	S (%)	A (%)	P (%)	S (%)
30	99,67	98,73	31,25	99,67	98,73	31,54	100,00	100,00	34,10	100	100	33,37
40	100,00	100,00	34,89	100,00	100,00	36,00	100,00	100,00	35,79	100,00	100,00	35,55
50	100,00	100,00	38,16	100,00	100,00	39,30	100,00	100,00	37,60	99,67	98,73	39,07
60	100,00	100,00	41,95	100,00	100,00	43,72	99,75	99,05	43,83	100,00	100,00	41,63

Fonte: Autor.

Para executar o sistema, os seguintes parâmetros foram utilizados para configuração final do algoritmo genético:

- Tamanho da população: 100 cromossomos;
- Taxa de cruzamento: 75%;
- Taxa de mutação: 40%;
- Número de gerações: 2 mil;
- Tamanho do *ring* (número de cromossomos na seleção dos pais): 5;
- Desvio padrão: 0,05.

4.3 Resultados

Os AG's são eficientes para realizar a busca da solução ótima, ou próximo da ótima, para a resolução de um problema, e isso ocorre quando o indivíduo mais apto apresenta maior probabilidade de ser a melhor solução possível. A Tabela 4.4 denota as melhores soluções geradas nas 5 execuções (**Exec**) de cada cenário (**Cen**), destacando as combinações que apresentaram um retorno do investimento (*PB*) em menor tempo, em comparação com as outras, e apresentando o investimento inicial (**I**) de cada solução. No Apêndice B são apresentados os mapas de soluções contendo 50 possibilidades de combinações de lâmpadas e luminárias, referentes as execuções destas soluções, classificadas em ordem crescente de acordo com o *payback*.

Também estão dispostas na Tabela 4.2 as gerações onde ocorreram a convergência (**G.C**) do AG e o tempo de duração de cada execução (**T.E**), em segundos, a quantidade de combinações encontradas válidas (*V*) e inválidas (*I*), que não apresentam um retorno financeiro dentro do período de 10 anos, assim como o número de luminárias (*N_Lamp*) e lâmpadas (*N_Lum*) indispensáveis para suprir a necessidade do ambiente e o investimento inicial.

Observando o tempo de execução do AG para cada ambiente, o maior tempo foi de 10.470 milissegundos (ms) e o menor de 7.690 ms, tendo sido analisadas em média 0,13 e 0,18 combinações por cada milissegundo, respectivamente.

Tabela 4.4. Melhores soluções encontradas por execução

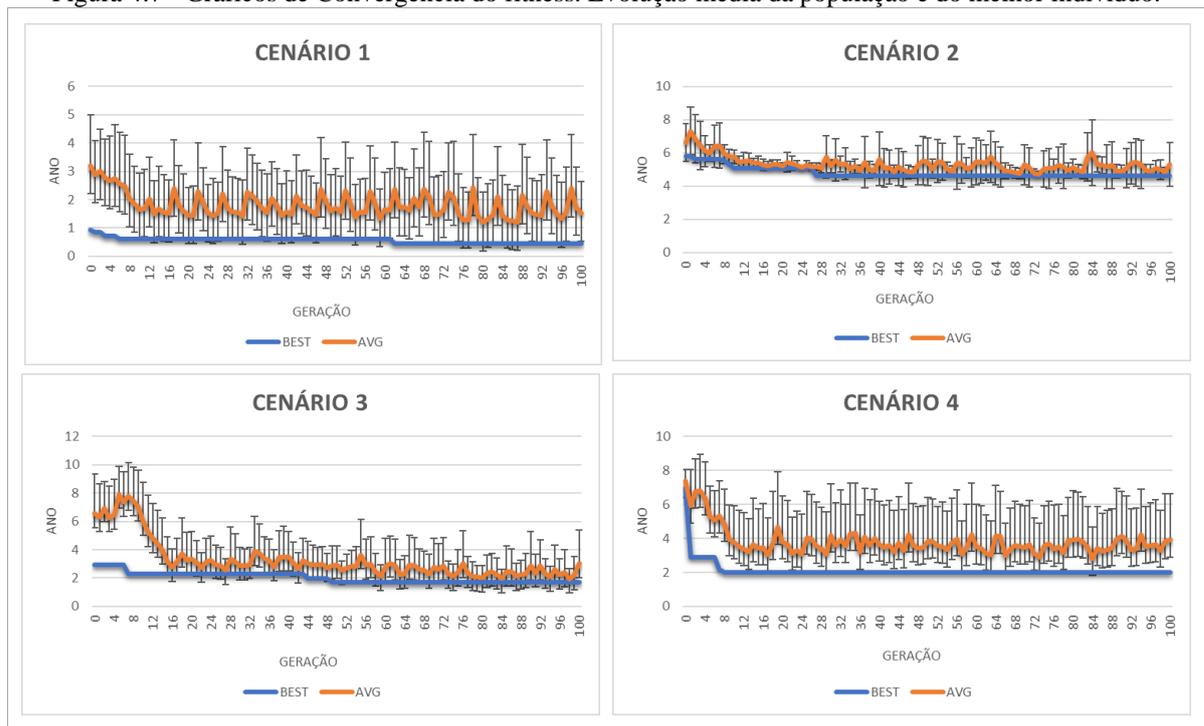
Cen	Exec	G.C	T.E (s)	Mapa		Fenótipo		Quantidade		I (R\$)	Fitness PB (Ano)
				V	I	Lamp	Lum	N_Lamp	N_Lum		
1	1	38	8,47	1594	52	Lumilux T5 Ho 840 Osram	A667	10	5	378,65	0,45
	2	4	10,04	1225	45	Lumilux T5 Ho 840 Osram	A667	10	5	378,65	0,45
	3	62	8,66	1397	58	Lumilux T5 Ho 840 Osram	A667	10	5	378,65	0,45
	4	5	8,85	1275	39	Lumilux T5 Ho 840 Osram	A667	10	5	378,65	0,45
	5	89	10,47	1318	50	Lumilux T5 Ho 840 Osram	A667	10	5	378,65	0,45
2	1	6	8,94	50	428	Tubeled T8 Tl18p4ao Ol	E62	2	1	105,03	5,73
	2	4	10,18	107	464	Tubeled T8 Tl18p4ao Ol	A667	2	1	72,99	4,64
	3	9	8,51	111	452	Tubeled T8 Tl18p4ao Ol	A667	2	1	72,99	4,64
	4	30	8,57	113	502	Tubeled T8 Tl18p4ao Ol	A667	2	1	72,99	4,64
	5	27	8,98	112	493	Tubeled T8 Tl18p4ao Ol	A667	2	1	72,99	4,64
3	1	26	7,77	146	1317	Lumilux T5 He 830 Osram	A667	2	1	63,45	1,73
	2	20	10,5	120	1359	Lumilux T5 He 830 Osram	A314	2	1	83,18	2,3
	3	64	8,05	134	1449	Lumilux T5 He 830 Osram	A667	1	2	63,45	1,73
	4	49	8,12	131	1435	Lumilux T5 He 830 Osram	A667	2	1	63,45	1,73
	5	6	7,81	106	1245	Lumilux T5 He 830 Osram	A667	1	1	63,45	1,29
4	1	8	7,69	137	1237	Lumilux T5 Ho 840 Osram	A667	8	4	302,92	1,99
	2	6	9,73	144	1182	Lumilux T5 Ho 840 Osram	A667	8	4	302,92	1,99
	3	8	8	169	1248	Lumilux T5 Ho 840 Osram	A667	8	4	302,92	1,99
	4	19	8,02	180	1294	Lumilux T5 Ho 840 Osram	A667	8	4	302,92	1,99
	5	5	7,88	132	1107	Tubeled T8 Tl18p4ao Ol	A667	18	9	656,91	3,25

Fonte: Autor.

A geração de convergência é a última na qual há uma melhora do *fitness*, ou seja, o período de *payback* é reduzido e passa a ser constante nas próximas gerações. Foram construídos gráficos de convergência com base nas execuções que apresentaram a melhor solução para os cenários, constatando que o AG encontrou a melhor solução, dentre as que foram analisadas.

Os gráficos de convergência apresentados pela Figura 4.7 mostram a evolução do melhor indivíduo (BEST) e da média das soluções (AVG) obtidas pela execução a cada geração, evidenciando que o processo evolutivo promoveu melhoras na adaptação da população. O eixo x representa o número de gerações e o eixo y representa o período necessário para a recuperação do investimento.

Figura 4.7 - Gráficos de Convergência do fitness. Evolução média da população e do melhor indivíduo.



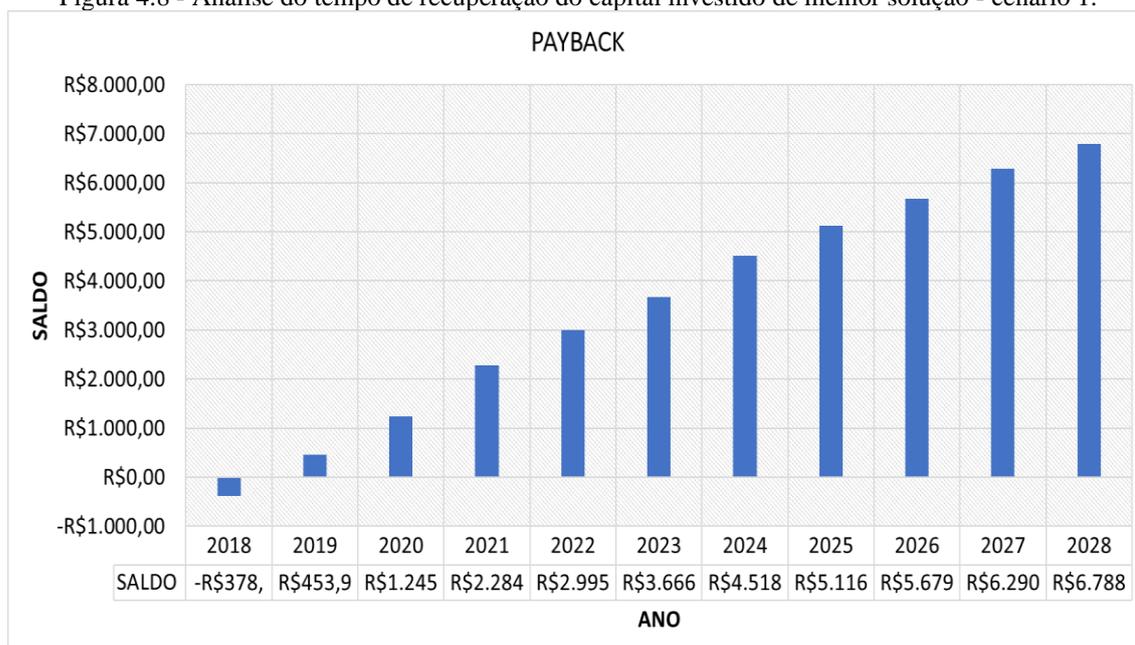
Fonte: Autor.

Em relação ao desvio padrão, o cenário 1 sinalizou uma maior uniformidade dos valores de avaliações (*fitness*), ou seja, os indivíduos apresentaram valores mais próximos entre si a cada geração, fazendo com que o desvio padrão seja menor.

A melhora do rendimento energético de um sistema de iluminação presume investimentos em novas tecnologias, que apresentam maior eficiência, junto a responsabilidade e consciência ambiental por parte do usuário, promovendo uma economia no consumo de energia elétrica. Essa economia gerada irá amortizar o investimento aplicado inicialmente no sistema. Diante disso, os gráficos apresentados a seguir mostram, de maneira mais atrativa, o tempo de retorno do investimento (*payback*).

A Figura 4.8 apresenta a variação de saldo da solução encontrada para o cenário 1. Nota-se que o tempo de retorno do investimento inicial é inferior a um ano, aproximadamente 5 meses, o que torna esse investimento muito atrativo.

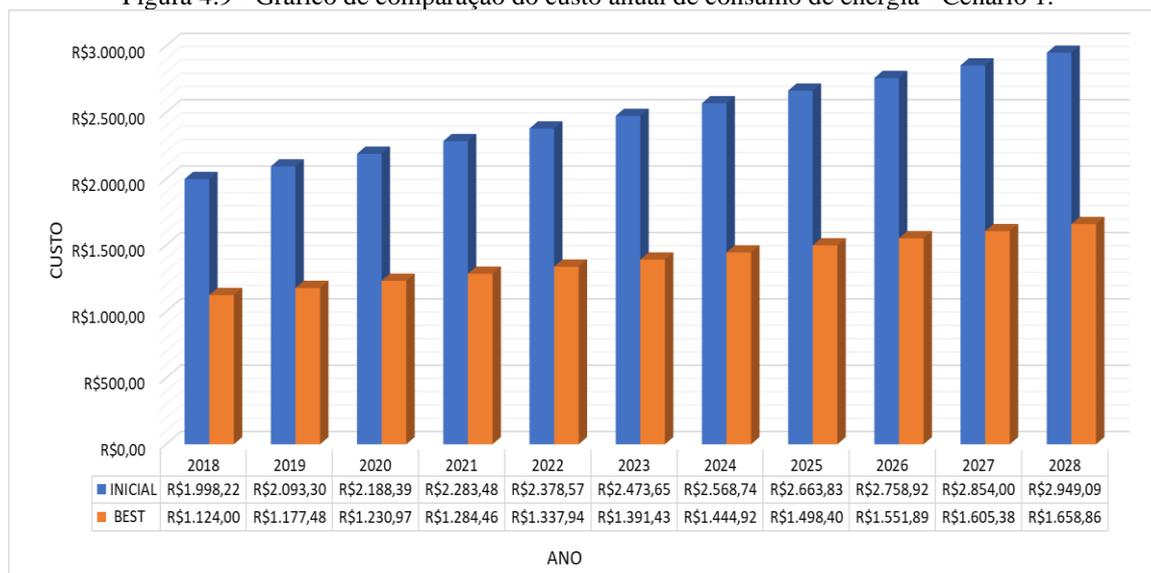
Figura 4.8 - Análise do tempo de recuperação do capital investido de melhor solução - cenário 1.



Fonte: Autor.

Levando em consideração o consumo de energia ao ano pelo sistema inicial instalado no cenário que foi de 2.756,16 kWh, e do sistema proposto, sendo de 1.550,34 kWh, pôde-se comparar o custo do consumo em um horizonte de 10 anos. A Figura 4.9 apresenta um gráfico de comparação entre os dois sistemas. Observa-se que no primeiro ano a diferença entre os custos implica em uma economia de R\$ 874,22, ou seja, a cada ano haverá um ganho de aproximadamente 43,75% sobre o custo do sistema inicial.

Figura 4.9 - Gráfico de comparação do custo anual de consumo de energia - Cenário 1.

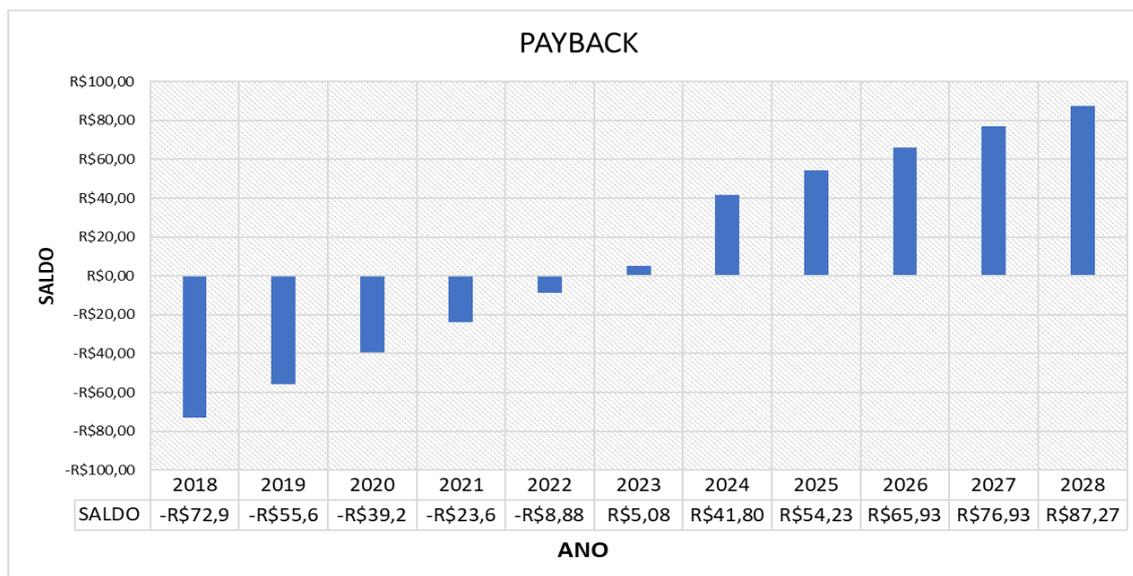


Fonte: Autor.

A Figura 4.10 mostra a evolução do saldo até o momento no qual ocorre o *payback* da melhor solução do cenário 2. Em relação aos outros cenários, este é o que apresenta uma

combinação de lâmpadas e luminárias com maior tempo de amortização do investimento inicial, aproximadamente 4 anos e 8 meses. Isso é uma consequência da baixa demanda de iluminação artificial e maior aproveitamento da iluminação natural, devido ser um ambiente em que o usuário não necessita de intensa luminosidade para o seu uso.

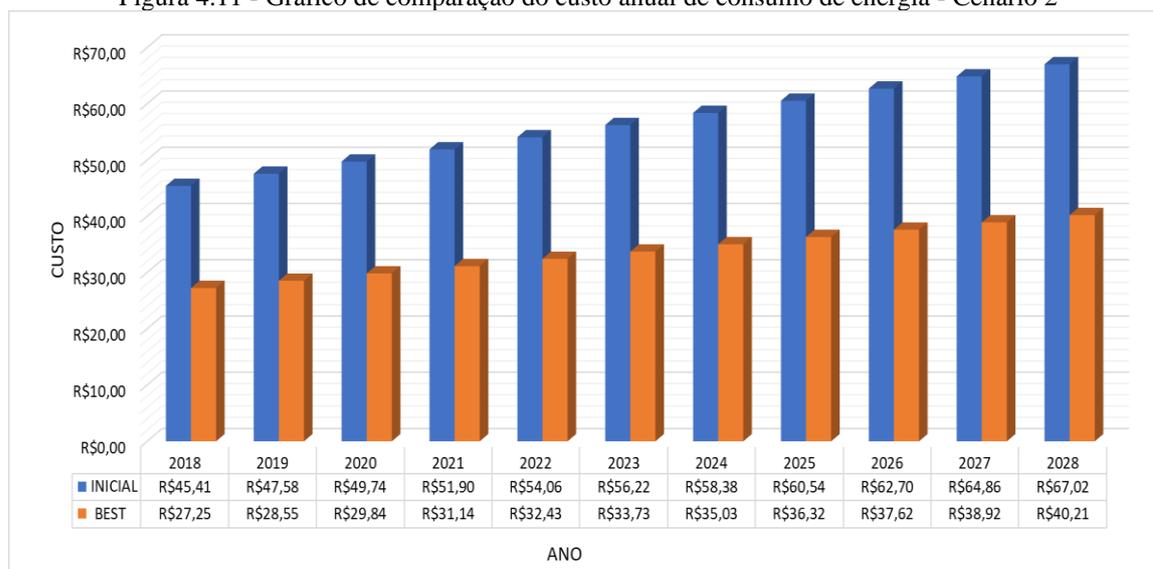
Figura 4.10 - Análise do tempo de recuperação do capital investido da melhor solução - Cenário 2.



Fonte: Autor.

O sistema inicial do cenário 2 consome ao ano um total de 62,64 kWh. Já o sistema proposto pela melhor solução, tem um consumo anual de 37,58 kWh. A Figura 4.11 mostra que há uma economia de R\$ 18,16 no primeiro ano, e de R\$ 19,03 no segundo, concluindo que há um acúmulo fixo de R\$ 0,87 ao ganho obtido em relação ao ano anterior, sendo este ganho de aproximadamente 40% em cima do custo do sistema inicial. Esse acúmulo pode ser visualizado pela diferença dos valores a serem economizados anualmente, dentro do período estimado, independente da variação da tarifa ao ano, pois está sendo considerado um consumo fixo. Isso justifica o período de quase 5 anos para pagar o investimento inicial, devido esse rendimento anual apresentar valores baixos, porém, pagam o investimento em menos de 10 anos como demonstrado pela Figura 4.10.

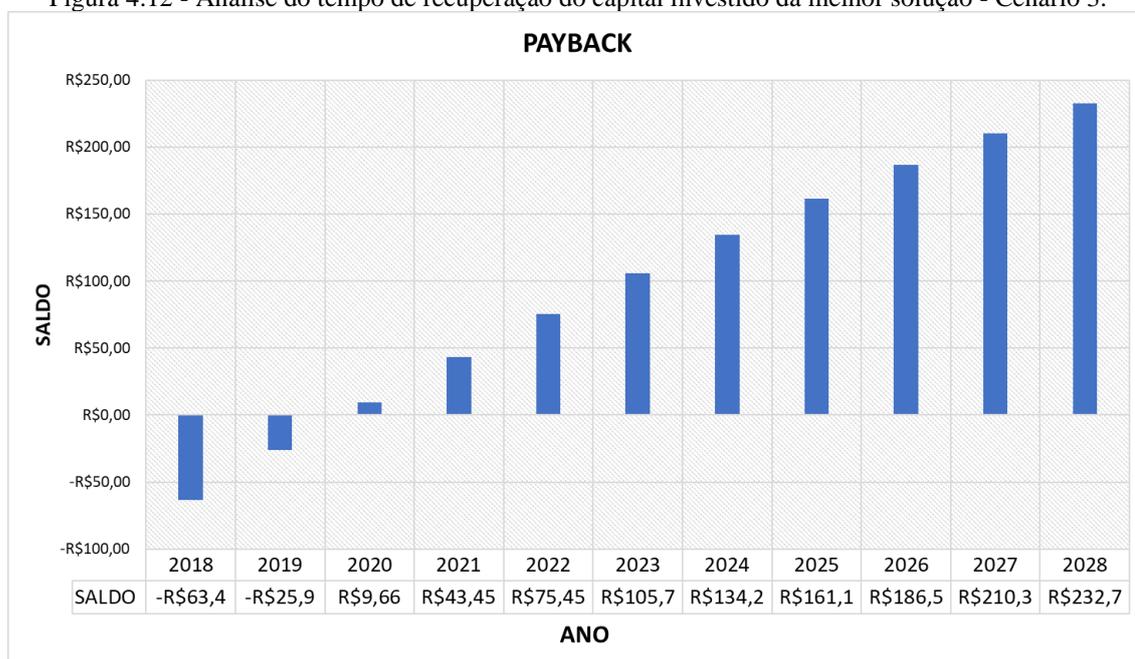
Figura 4.11 - Gráfico de comparação do custo anual de consumo de energia - Cenário 2



Fonte: Autor.

A melhor solução encontrada para o cenário 3, no horizonte de 10 anos, também se apresenta viável, como pode ser observado na Figura 4.12, tendo um retorno do investimento em até 1 ano e 9 meses.

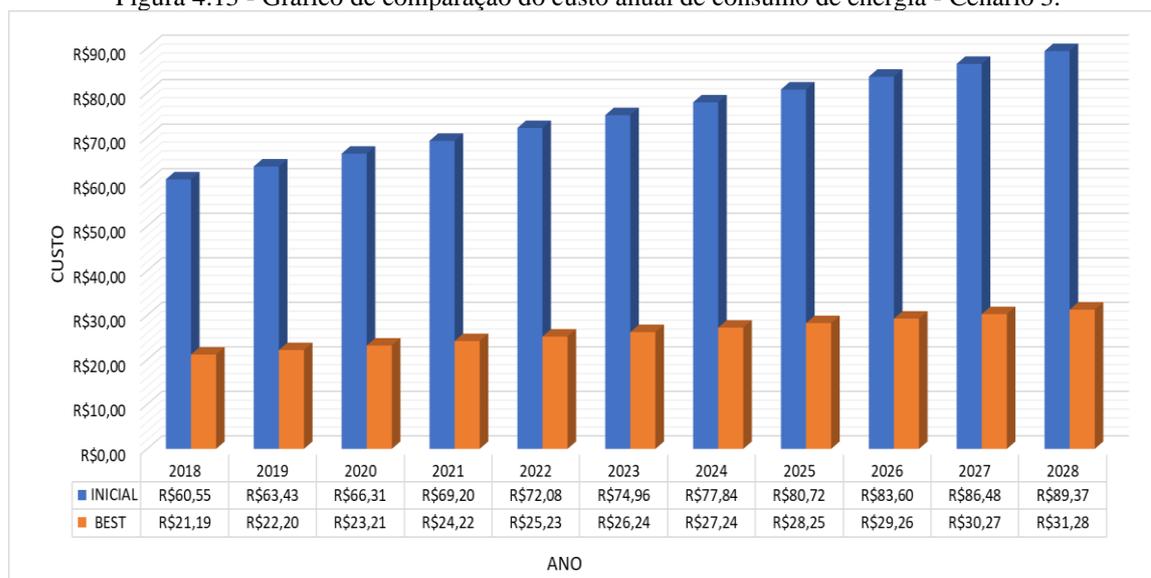
Figura 4.12 - Análise do tempo de recuperação do capital investido da melhor solução - Cenário 3.



Fonte: Autor.

O sistema proposto consome 29,23 kWh/ano, enquanto o sistema inicial tem um consumo de 83,52 kWh/ano, garantindo uma economia anual de aproximadamente 65% sobre o custo do consumo de energia do sistema inicial de cada ano. Essa variação pode ser observada na Figura 4.13.

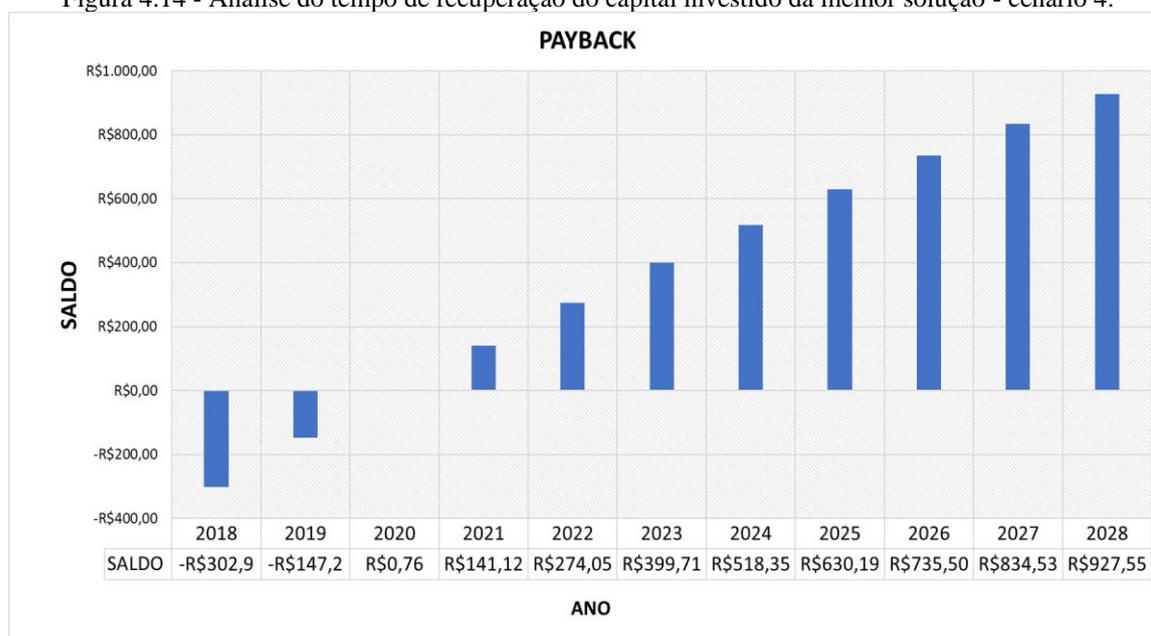
Figura 4.13 - Gráfico de comparação do custo anual de consumo de energia - Cenário 3.



Fonte: Autor.

A Figura 4.14 mostra que o sistema de iluminação artificial sugerido para o cenário 4, se paga em aproximadamente 2 anos. Salienta-se que as lâmpadas das combinações dos cenários 1, 3 e 4 são fluorescentes e têm vida útil de 24000 horas, e a do cenário 2 é lâmpada LED com vida útil de 40000 horas, ou seja, a diminuição da eficiência luminosa de uma lâmpada LED ocorre dentro de um período de tempo maior em relação as fluorescentes, o que implica em maior tempo para a substituição destas também.

Figura 4.14 - Análise do tempo de recuperação do capital investido da melhor solução - cenário 4.

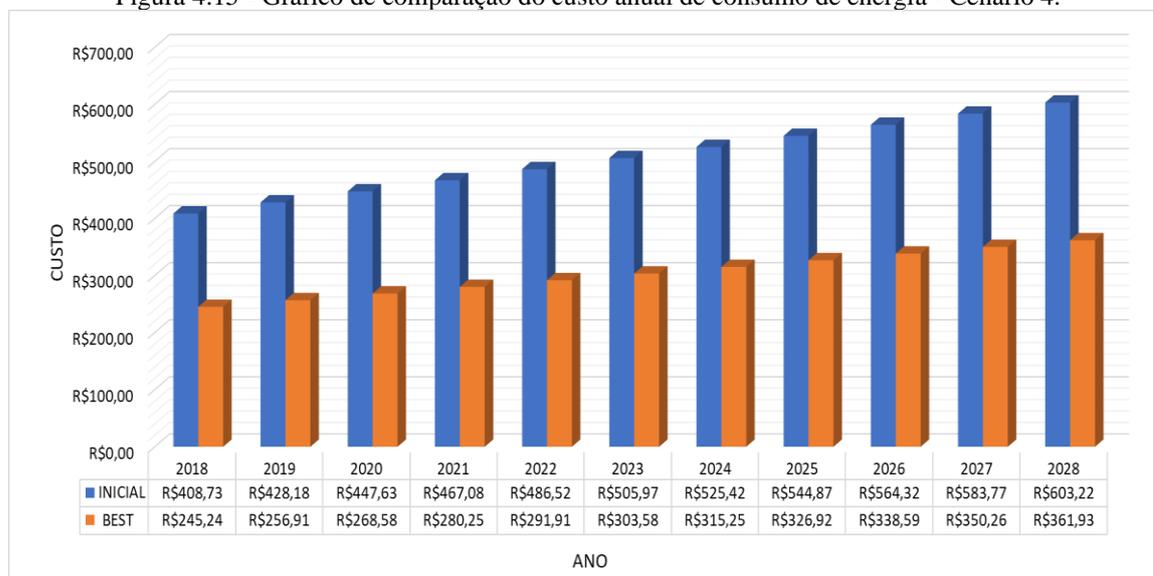


Fonte: Autor.

Considerando que o consumo de energia elétrica do sistema inicial é de 563,76 kWh/ano e do sistema proposto é de 338,26 kWh /ano, foi obtido o valor de economia a partir do consumo, tendo obtido no primeiro ano o ganho de R\$ 163,49, exibido pelo gráfico na Figura

4.15, e nos anos seguintes tem-se um acúmulo fixo de R\$ 7,78 por ano ao valor poupado. A análise de custo do consumo anual de energia permite demonstrar, com bastante clareza, a diferença existente entre os sistemas de iluminação, dado que o consumo e, conseqüentemente, o custo do sistema proposto é bastante inferior em relação ao inicial.

Figura 4.15 - Gráfico de comparação do custo anual de consumo de energia - Cenário 4.



Fonte: Autor.

A partir do *software* DIALux, foram projetadas as combinações de lâmpadas e luminárias de menor *payback* para cada cenário em estudo. Para atender ao requisito da norma de E_m mencionado na Tabela 4.1, o AG determinou que para o cenário 1 são necessárias 5 luminárias com lâmpadas do tipo fluorescente tubular, 2x54 W, para satisfazer a necessidade luminosa do ambiente, e para o cenário 2 foi determinado uma luminária com lâmpadas de LED, 2x18 W. A lâmpada fluorescente tem fluxo luminoso de 4450 lm, temperatura de 4000 K e vida útil de 24000 horas, já a lâmpada de LED tem fluxo luminoso de 2070 lm, temperatura de 4000 K e vida útil de 40000 horas. Para o cenário 3 foi dimensionado um sistema com uma luminária e lâmpadas fluorescente tubular, 2x28 W, com fluxo luminoso de 2600 lm, temperatura de 3000 K e vida útil de 24000 horas. Foi dimensionado um sistema com 4 luminárias com lâmpadas do tipo fluorescente tubular, 2x54 W, para suprir a necessidade de 500 lx do cenário 4. A lâmpada em questão tem as mesmas características da que foi projetada para o cenário 1.

A Figura 4.16 mostra a representação gráfica dos ambientes em 3D da distribuição das luminárias, de acordo com a proposta da melhor solução, para cada cenário em estudo.

Figura 4.16 - Representação da distribuição das luminárias no DIALux para cada Cenário.



Fonte: Autor.

Ao simular os sistemas, foram obtidas as distribuições de iluminâncias, representadas pelos diagramas de curvas isolux, o qual é o lugar geométrico dos pontos da superfície que apresentam os mesmos valores de iluminância, e cores falsas, para avaliar o alcance do índice médio requerido e observar os diferentes níveis de iluminância na superfície. Foi considerada uma altura útil de 0,80 m do nível do piso. Salienta-se que as curvas isolux foram geradas para o plano de uso do ambiente como um todo, facilitando a visualização da distribuição e quantidade de luz no plano de trabalho.

Os níveis de iluminância encontrados com a simulação no DIALux para o sistema do cenário 1, Figura 4.17, apresentaram uma média dentro do recomendado pela norma, estando dentro do limite estabelecido, de até 7% para mais. Os valores de iluminância mínima, média e máxima para este projeto foram de 282 lux, 535 lux e 769 lux, respectivamente, e 0,53 de uniformidade. É notório que há um excesso de iluminação na zona central do recinto, porém não está sendo considerado a mobília no ambiente, pois esta geraria grande interferência sobre a distribuição da luz.

O uso de um ponto de iluminação a mais poderia vir a contribuir para uma melhor distribuição da iluminância no espaço, conseqüente aumentaria o fator de uniformidade.

Figura 4.17 - Planta com as curvas isolux geradas pelo sistema de iluminação sugerido - Cenário 1.



Fonte: Autor.

Os níveis de iluminância encontrados para o cenário 2 estão representados pelas curvas isolux e cores falsas em planta baixa na Figura 4.18, obtendo-se uma iluminância mínima 0,69 lux, média de 201 lux e máxima de 513 lux, apresentando uniformidade 0,03. Observa-se que há uma maior iluminação na zona central, que pode ser caracterizada como área de circulação do ambiente. Dentro dos boxes a iluminação recebida apresenta uma iluminância que varia de 30 a 100 lux, o que pode causar desconforto ao usuário em consequência da baixa luminosidade.

Figura 4.18 - Planta com as curvas isolux geradas pelo sistema de iluminação sugerido - Cenário 2.



Fonte: Autor.

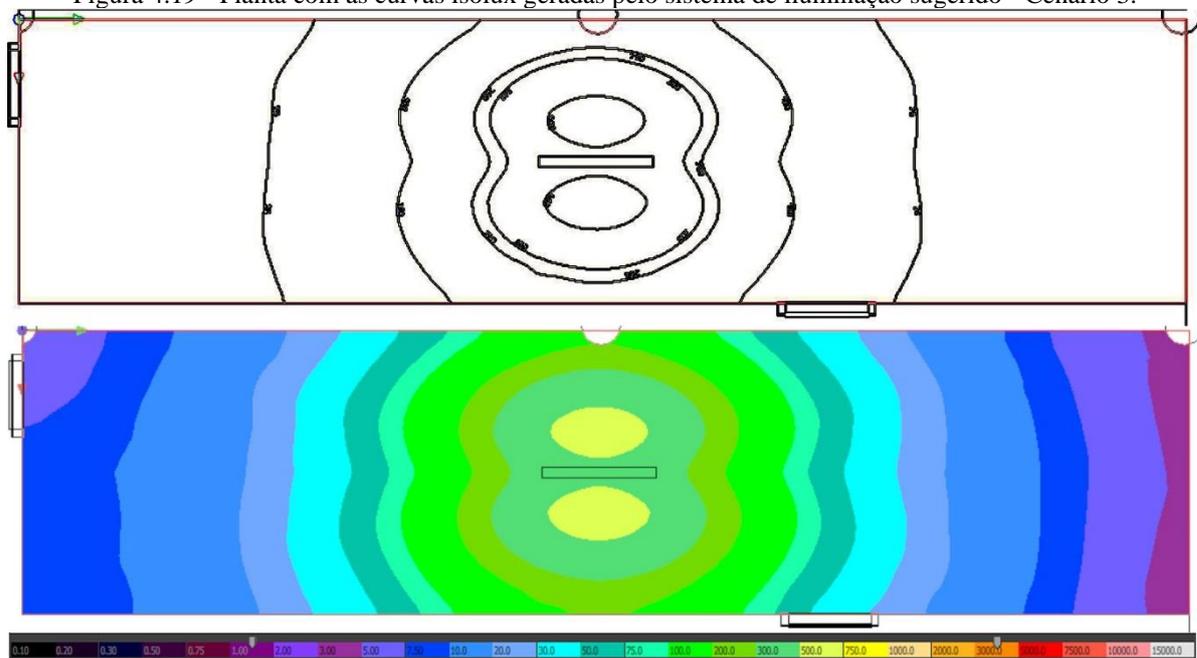
A iluminância média está dentro do limite disposto pela norma, mas a área de tarefa apresenta uma baixa uniformidade. As áreas de entorno devem apresentar a mesma iluminância

média da área de tarefa quando esta última for ≤ 200 lux, de acordo com a NBR ISSO 8995-1 de 2013, porém, esses valores de iluminância não foram encontrados no entorno, ratificado pelo fator de uniformidade calculado.

A iluminação do cenário 3 tem como objetivo promover uma circulação confortável e em segurança ao usuário. A simulação do projeto para o cenário 3, apresentou uma distribuição de iluminância mínima de 9,31 lux, média de 101 lux, máxima de 588 lux e 0,04 de uniformidade, como disposto na Figura 4.19, atendendo ao valor de referência de iluminância média da norma.

A baixa distribuição da iluminância fica clara a partir da variação de cores apresentadas pelo diagrama de cores falsas. As cores de tons mais azulados traduzem em um índice de fluxo luminoso bem menor, surgindo até cores em tons de roxo caracterizados como casos mais críticos. As características físicas da luminária podem estar contribuindo para uma menor distribuição luminosa, assim como as da lâmpada fluorescente, que tem menor ângulo de abertura em comparação com as características isométricas de lâmpadas de LED, além de ter maior diretividade.

Figura 4.19 - Planta com as curvas isolux geradas pelo sistema de iluminação sugerido - Cenário 3.



Fonte: Autor.

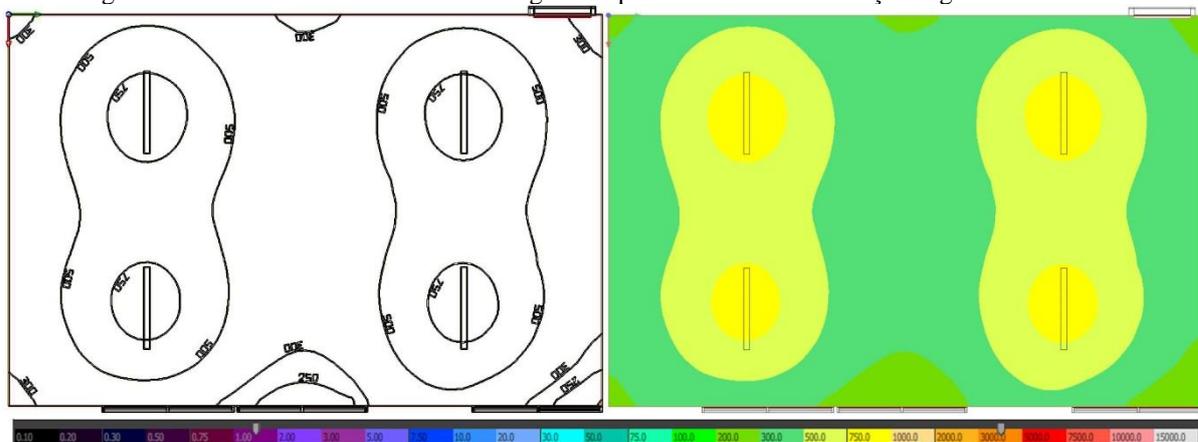
O fato desse ambiente não apresentar uma parede em um dos lados contribui diretamente para um maior aproveitamento de iluminação natural, porém, diminui a superfície refletora da área de circulação, requerendo uma maior intensidade luminosa da lâmpada.

A acessão de uma luminária poderia diminuir essa deficiência na qualidade da iluminação no cenário, além das áreas do entorno.

As salas de aula são ambientes em que os usuários realizam distintas atividades, dessa forma a NBR 8995-1 de 2013 propõe uma \bar{E}_m de 500 lx, para que as mais variadas tarefas sejam realizadas de modo confortável. Os níveis de iluminância encontrados pela simulação da proposta para o cenário 4 podem ser vistos na Figura 4.20, onde o valor mínimo foi de 198 lux, a média obtida foi de 501 lux e a máxima de 750 lux, com uniformidade de 0,4. A média está dentro do desejado. A distribuição das luminárias estar antefendo a zona central em relação as mesmas, onde os níveis de iluminância são consideravelmente maiores, recebendo a contribuição direta das luminárias e desprezando as áreas do entorno.

A luminária utilizada não possui aletas em sua característica física, que são excelentes para aumentar a distribuição luminosa, o que possibilitaria uma melhoria no aproveitamento do fluxo luminoso da lâmpada. Se for desconsiderada a estética da distribuição das luminárias, é possível que seja encontrado um arranjo para que haja uma maior uniformização da iluminância nesse ambiente, ou pelo menos em boa parte dele.

Figura 4.20 - Planta com as curvas isolux geradas pelo sistema de iluminação sugerido - Cenário 4.



Fonte: Autor.

4.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os resultados da aplicação do AG desenvolvido para um estudo de caso que contemplava 4 cenários com atividades e horas de uso distintas, seguindo a metodologia detalhada no Capítulo 3. Foi possível observar que as melhores soluções encontradas apresentaram um período de retorno financeiro considerado de curto prazo, dentro de um horizonte de 10 anos, levando em consideração o investimento inicial, o consumo anual e a manutenção, quando houver. A comparação do consumo do sistema de iluminação existente

com o sugerido pelo *software*, evidenciou que as propostas possibilitam uma redução no custo do consumo de energia elétrica, ratificando a viabilidade financeira do projeto.

Entretanto, é importante salientar que o modelo de luminária e lâmpada pode não ser esteticamente ideal para um ambiente, independentemente da existência do *payback*, assim, outras soluções dispostas pelo algoritmo podem satisfazer os requisitos para uma melhor iluminação do ambiente, com base em outros parâmetros como o custo de investimento inicial, da classificação e componentes das luminárias, entre outros, que estão dispostos no mapa de soluções.

Por fim, as simulações realizadas no DIALux foram essenciais para visualizar o sistema de iluminação, permitindo fazer melhorias nas condições de luminosidade de acordo com a necessidade de cada cenário. As fontes luminosas não apresentaram uma distribuição uniforme, ou seja, a iluminância não é a mesma em todos os pontos do ambiente. No método dos Lúmens a determinação do número de luminárias necessárias para o ambiente nem sempre é exata, devendo ser arredondada para cima. Além disso, muitas vezes essa quantidade de luminária não leva a uma distribuição uniforme da iluminância no ambiente, sendo necessário um acréscimo no número de luminárias, o que pode contribuir para uma maior harmonização estética da disposição destas no ambiente.

Desse modo, os resultados obtidos pelo DIALux foram satisfatórios, corroborando positivamente para a aplicabilidade da ferramenta desenvolvida, mas necessitando de ajustes, por parte do projetista, sempre que necessário, de modo que haja qualidade e conforto visual.

O próximo capítulo abordará os aspectos relevantes sobre a aplicação do AG desenvolvido, como as conclusões da pesquisa, as dificuldades encontradas e, por fim, as perspectivas para trabalhos futuros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho se propôs, como objetivo geral, elaborar uma ferramenta computacional de cálculo luminotécnico para ambientes internos comerciais, de modo a contribuir na tomada de decisão do projetista para a escolha da melhor combinação de luminárias e lâmpadas que satisfaçam a necessidade luminosa do ambiente, segundo as recomendações de iluminância da NBR ISO/CIE 8995-1:2013, considerando o menor tempo de retorno financeiro.

O primeiro passo desse trabalho foi identificar a metodologia de cálculo luminotécnico utilizada, e compreender as características e conceitos que abrangem esses métodos. O método de cálculo aplicado no desenvolvimento desse trabalho foi o dos lúmens, devido ser o mais difundido entre projetistas para dimensionamento luminotécnico de ambientes internos.

A técnica de Algoritmo Genético foi utilizada no desenvolvimento dessa ferramenta, tendo sido necessário, em um primeiro momento, compreender a estrutura básica de um AG simples. Foi utilizado a linguagem de programação *Python 3.7* e o *software Pycharm* versão 2018.2.2 para o desenvolvimento do AG, e as funções implementadas na construção deste seguiram, em resumo, a seguinte ordem:

1. Padronização dos dados de entrada, ajustando os comprimentos das lâmpadas e luminárias para facilitar as combinações pelo AG;
2. Estimação da tarifa de energia elétrica para um período de 10 anos, que foi utilizada para análises do consumo de energia e *payback*, a partir da técnica de regressão linear simples, e com base em taxas da concessionária local de anos anteriores, onde foi extraída a Equação (3.1);
3. Execução do algoritmo, obtendo um número de luminárias necessárias para iluminar de maneira adequada o ambiente, e a partir disso, calcular o consumo anual de energia desse sistema de iluminação, e por fim, estimar o tempo de retorno financeiro;
4. Avaliação das soluções geradas, considerando que o AG é elitista mantendo a solução com menor *payback* a cada geração. Com isso, é elaborado um mapa de memória com as soluções encontradas de todas as gerações para cada execução.

Uma vez que a Tabela 4.3 mostra que foram utilizados em média 36% das soluções, o AG, direcionado pela função *fitness*, conseguiu encontrar a melhor solução da base de dados, com uma folga de mais de 60% em relação as soluções testadas pela força bruta. Isso

torna válido o uso do AG, uma vez que se mostrou ter a mesma acurácia e precisão de uma força bruta, testando uma quantidade bem menor de soluções.

Para uma melhor compreensão e avaliação do funcionamento da ferramenta desenvolvida, utilizou-se um estudo de caso para a aplicação desta, e posteriormente, simulou-se, através do *software* DIALux, a distribuição das combinações de luminárias e lâmpadas resultantes das melhores soluções encontradas pelo AG para os cenários avaliados.

É importante destacar que o banco de dados das lâmpadas e luminárias encontra-se com 102 e 99 arquivos respectivamente, com informações provenientes dos fabricantes e que são comercializadas no Brasil. As configurações dos parâmetros de desempenho do AG foram apresentadas no trabalho, no qual o tamanho da população é de 100 indivíduos, taxas de cruzamento e mutação de 75% e 40%, nessa ordem.

A ferramenta foi aplicada em 4 cenários distintos, tanto em suas dimensões quanto nas atividades desenvolvidas, e, conseqüentemente, com horários de uso da iluminação artificial também dissemelhantes, tendo sido encontradas soluções válidas, com retorno financeiro dentro do horizonte de 10 anos, garantido a viabilidade da combinação da lâmpada e luminária encontrada, assim como a qualidade do desempenho da ferramenta.

Os resultados obtidos com a ferramenta desenvolvida satisfazem o objetivo do trabalho, ao apresentar possíveis sistemas de iluminação artificial, que além de suprirem a necessidade luminosa do ambiente, têm retorno financeiro dentro do período determinado pelo usuário, neste caso 10 anos, ou seja, apresentam viabilidade econômica. As melhores soluções geradas pelo AG determinaram a necessidade de: cinco luminárias com dez lâmpadas fluorescentes de 54 W para o cenário 1; uma luminária com duas lâmpadas LED de 18 W para o cenário 2; uma luminária com duas lâmpadas fluorescentes de 28 W para o cenário 3; e quatro luminárias com oito lâmpadas fluorescentes de 54 W para o cenário 4.

A vantagem do uso desta ferramenta é a disposição de uma lista de possibilidades, mapa de memória ou de soluções, das melhores combinações de lâmpadas e luminárias que irão atender o ambiente, possibilitando ao projetista escolher de acordo com o seu próprio critério, seja ele o *payback*, o investimento inicial, as características dos componentes do sistema, entre outros.

De posse das informações de quantidades, tipos e modelos das lâmpadas e luminárias, o projetista precisará distribuir estas no ambiente, de modo que o plano de trabalho útil receba

a iluminância necessária para a realização das tarefas sem comprometer a segurança e o conforto visual do usuário.

Neste trabalho utilizou-se o *software* DIALux como ferramenta para análise dos sistemas de iluminação propostos, com base nas melhores soluções geradas pelo AG para cada cenário. A partir da distribuição de iluminâncias, obtidas pelas simulações dos sistemas, foi possível observar que todos os cenários alcançaram valores médios de iluminância dentro do que é proposto pela norma, entretanto, não apresentaram boa uniformidade. Segundo o método dos lúmens, essas soluções determinadas como melhores para o ambiente possuem componentes que apresentam características que atendem a quantidade necessária de fluxo luminoso para a área de tarefa, considerando uma iluminação geral. Um fator que pode ter contribuído para os valores de iluminância encontrados foi a altura útil da área de tarefa, a qual foi considerada pelo DIALux 0,80 m. Caso fossem utilizados valores de altura útil real, por exemplo, uma mesa com algum equipamento laboratorial, essa distribuição seria mais específica, de acordo com a necessidade de iluminação direcionada.

Os tipos de luminárias que foram utilizadas nos cenários 2 e 4 podem não ser as mais adequadas para a iluminação geral de ambos os cenários, pois estes são ambientes que necessitam de luminárias com amplo ângulo de abertura, visando uma maior uniformidade, intensidade e eficiência luminosa. No caso do cenário 2, que é um banheiro, há a necessidade de fazer, posteriormente, uma complementação luminosa com focos específicos para a execução de tarefa, como as áreas de lavatório e, quando necessário, as cabines sanitárias. A geometria e as mais variadas superfícies contribuíram para que houvesse uma deficiência na iluminação deste ambiente, o que pode ser observado pelas áreas de extremidades que apresentam menor luminosidade. Já para o cenário 4, a distribuição das luminárias pode não ter sido a mais adequada, pois não foi feito um destaque para a lousa por exemplo, assim como não foram consideradas as aberturas existentes, e, conseqüentemente, a presença de iluminação natural. Tudo isso influencia na real necessidade de fluxo luminoso para a área de tarefa, o que pode ser maior ou menor ao que foi dimensionado.

Os resultados mostram que a ferramenta de otimização proposta correspondeu ao esperado, pois apresenta sistemas que são atrativos econômicos e com qualidade de energia, mas que podem precisar de complementações a depender do ambiente e do usuário. É importante advertir que esta ferramenta não tem como objetivo substituir outros *softwares* de cálculo luminotécnico, e sim ser objeto de uso em fase de elaboração de projetos

luminotécnicos, estimando sistemas passíveis de serem utilizados em ambientes internos com base no menor *payback*.

5.2 Limitações do Trabalho

As principais limitações encontradas durante o desenvolvimento deste trabalho são:

- Aprender o referenciamento de memória em *Python*, pois a ferramenta desenvolvida foi estruturada com base no paradigma de orientação a objetos. Durante o fluxo de dados entre as variáveis é preciso garantir a consistência dos dados, de modo que o valor lido seja realmente o valor que foi armazenado;
- Baixa variabilidade dos indivíduos gerados, devido a codificação real utilizada no cromossomo, e operadores genéticos utilizados. Isso pôde ser resolvido através do uso da estratégia onde toda vez que ocorrerem 10 gerações, sem que haja evolução, ou seja, uma melhora do fitness do melhor indivíduo, metade da população é gerada aleatoriamente, permitindo assim, a fuga de ótimos locais;
- O acesso ao fator de utilização das luminárias, essencial para o cálculo luminotécnico com base no método dos lúmens, dificultou o preenchimento do banco de dados, já que poucos fabricantes os disponibilizam, minimizando a variedade de modelos de luminárias.

5.3 Trabalhos Futuros

Os resultados encontrados na pesquisa sugerem alguns novos estudos que busquem complementar ou mesmo aprofundar o que foi desenvolvido até o momento, sendo estes:

- Deixar a ferramenta mais robusta, através da criação de um banco de dados a partir do diagrama entidade relacionamento, para armazenar todos os conjuntos de lâmpadas e luminárias que forem sendo testados;
- Criar uma interface gráfica amigável para que o usuário possa escolher manualmente as configurações que deseja testar;
- Colocar restrições no AG em relação as luminárias e lâmpadas de acordo com as tarefas a serem realizadas pelo ambiente, o que irá influenciar diretamente na qualidade da iluminação;
- Considerar os dados de reatores nos custos de investimento, operação e manutenção e o custo de instalação dos sistemas para a análise de retorno financeiro;
- Adaptar o método de cálculo luminotécnico para ambientes com geometria não convencionais;

- Incluir outros fatores na análise, como a iluminação natural, pois além de contribuir para uma possível diminuição no consumo de energia elétrica, a luz natural pode gerar conforto e qualidade ambiental;
- Inserir novos parâmetros na avaliação da função *fitness*, considerando o condicionamento de ar e outros.

5.4 Publicações

Os resultados obtidos no estudo de caso foram publicados em:

- MONTEIRO, A. L. P. R.; TOSTES, M. E. de L.; ROCHA, G. V. S. Projeto de iluminação interior utilizando um algoritmo genético para minimizar o tempo de retorno. **Revista Sodebras [on line]**. v. 14, n. 164, p. 32 - 37. Agosto / 2019. ISSN - 1809-3957. Disponível em: <http://www.sodebras.com.br/edicoes/N164.pdf>.
- MONTEIRO, A. L. P. R.; TOSTES, M. E. de L.; ROCHA, G. V. S. Application of genetic algorithm for the planning and construction of lighting projects. In: XIII Latin – American Congress on Electricity, Generation and Transmission, 2019, Santiago - Chile.

REFERÊNCIAS

ABALUX. Catálogo de produtos. Disponível em: <http://www.abalux.com.br/catalogo/e62-p2239/>. Acesso em: 20 de fev. 2019.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR ISO/CIE 8995-1:2013. **Iluminação de ambientes de trabalho**. Parte 1: interior. Brasil: ISO/CIE. 2013

ALBUQUERQUE, A. T. **Uma Metodologia Para Otimização do Projeto de Iluminação Artificial Aplicando Recozimento**. 2007. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2007.

ÁVILA, Sérgio Luciano. **Algoritmos genéticos aplicados na otimização de antenas refletoras**. 2002. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2002.

BARCELLOS, João Carlos Holland de. **Algoritmos genéticos adaptativos: um estudo comparativo**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2000.

BARRICO, C.M.C.S. **Optimização evolucionária multi-objectivo em ambientes incertos: pesquisa de soluções robustas**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. Coimbra, 2007.

BASTIDAS OTERO, Johnny Alexander. **Algoritmos genéticos aplicados à solução do problema inverso biomagnético**. 2016. 157p. Dissertação (Mestrado em engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica do centro técnico científico, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

BECK, Elisa de Oliveira. **Desempenho luminoso e energético de leds para reformas de sistemas de iluminação de ambientes de escritório**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.

BOYCE, P. R. **Lighting for Driving: Roads, Vehicles, Signs, and Signals**. CRC Press, 2008.

CASTRO, L, N. de, VON ZUBEN, F. J. **Computação Evolutiva: Representação e Operadores Evolutivos**. Disponível em: ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia707_02/topico14_02.pdf. Acesso em: 15 de mar, 2019.

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Guia para eficiência energética nas edificações públicas**. Ministério de Minas e Energia - MME, Rio de Janeiro: CEPEL, 2014.

229 p. Disponível em:

http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/GUIA+EFIC+ENERG+EDIF+PUBL_1+0_12-02-2015_Compacta.pdf. Acesso em: 09 de nov. 2018.

CHRISTAKOU, E. D. **A simulação computacional da luz natural aplicada ao projeto de arquitetura**. 2004. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2004.

COELHO, G. V. V. **Seleção de Características usando Algoritmos Genéticos para Classificação de Imagens de Textos em Manuscritos e Impressos**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Centro de Informática, Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

COLHERINHAS, Gino Bertollucci, **Ferramenta de otimização via algoritmos genéticos com aplicações em engenharia**. 2016. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

CORTEZ, João C. C. **Projeto luminotécnico do interior do mercado municipal de Coimbra**. Dissertação (Mestrado em Instalações e equipamentos em edifícios) - Departamento de Engenharia Eletrotécnica. ISEC. Coimbra, 2013.

COSTA, Gilberto José Corrêa. **Iluminação econômica: cálculo e avaliação**. Ed. 4, Porto Alegre: EDIPUCRS, 2013.

DARWIN, C. **A origem das espécies e a seleção natural**. 1 Ed. São Paulo: Madras, 2011.

DEDG - Direção Geral de Energia e Geologia. Iluminação Artificial. Disponível em: <http://www.dgeg.gov.pt/pagina.aspx?f=1&lws=1&mcna=0&lnc=AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA&parceiroid=0&codigoms=0&codigono=75057941AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA>. Acesso em: 09 de nov. 2018.

EMERICK, A.A., SILVA, E., MESSER, B., ALMEIDA, L.F., SZWARCMAN, D., PACHECO, M.A.C., VELLASCO, M.M.B.R. **Well Placement Optimization Using a Genetic Algorithm With Nonlinear Constraints. SPE Reservoir Simulation Symposium**. Society of Petroleum Engineers. The Woodlands, Texas, 2009.

FALCONE, M. A. G. **Estudo comparativo entre algoritmos genéticos e evolução diferencial para otimização de um modelo de cadeia de suprimento simplificada**. 2004. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2004.

FERREIRA, Rodrigo Arruda Felício. **Manual de luminotécnica**. Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2010.

FILITTO, Danilo. Algoritmos genéticos: uma visão explanatória. **Revista Multidisciplinar da Uniesp – Saber Acadêmico**, v. 6, n. 3, p. 136-143. São Paulo, 2008.

FINOCCHIO, M. A. F. **Apostila de Engenharia de Iluminação**. Publicação Interna, LABSIEE/UTFPR-CP, Cornélio Procópio, 2010. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/mafinocchio/disciplinas-da-graduacao/engenharia-de-iluminacao/APOSTILAENGENHARIADEILUMINAO.pdf/at_download/file. Acesso em: 02 de jan. 2019

FRANCO, Dielle da Silva Corrêa. **Desempenho do algoritmo genético com iteração retroviral para otimização de funções com representação real**. 2015. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará. Belém, 2015.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. New York, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.

GOMES, F. M., PEREIRA, F. M., MARINS, F. A. S., SILVA, M. B. Estudo comparativo entre os métodos gradiente reduzido generalizado e algoritmo genético em otimização com múltiplas respostas. **Revista Produção Online**, v. 17, n. 2, p. 592-619, 2017.

HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E. **Practical Genetic Algorithms**. New York: John Wiley & Sons, 2004.

KAWASAKI, Juliana Iwashita. **Métodos de cálculo luminotécnico**. Cap. III. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/category/fasciculos/anteriores/sistemas-de-iluminacao/>. Acesso em: 10 de fev. 2019.

KICHEL, Luciene de Souza. **Viabilidade Econômica da Substituição de Lâmpadas Fluorescentes por LED em Planta Fabril**. 2017. 43f. Monografia (Especialização em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

LINDEN, Ricardo. **Algoritmos genéticos**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2008. Pg 5

LUCAS, Diogo C. **Algoritmos genéticos: uma introdução**. Apostila referente a disciplina de inteligência computacional, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, 2002.

LUCASIUS, Carlos B.; KATEMAN, Gerrit. **Understanding and using genetic algorithms Part 1. Concepts, properties and context. Chemometrics and intelligent laboratory systems**, v. 19, n. 1, p. 1-33, 1993.

LYRA FILHO, Christiano; VARGAS, Patrícia Amâncio; VON ZUBEN, Fernando José. Redução de perdas em redes de distribuição de energia elétrica através de sistemas classificadores. Sba: **Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática**, v. 14, n. 3, p. 298-308, 2003.

MACHADO, Fábio Braz; NARDY, Antônio José Ranalli. **Mineralogia óptica**. Oficina de Textos, cap. 1, 2017.

MARINOSKI, Deivis Luis; WESTPHAL, Fernando Simon; LAMBERTS, Roberto. Desenvolvimento de um algoritmo de cálculo luminotécnico para ambientes internos através do método ponto-a-ponto. **Anais do ENCAC-COTEDI**, p. 1066-1073, 2003.

MELO, Luciana Monticelli de. **Sustentabilidade Inteligente: Otimização da edificação com o uso de algoritmos genéticos**. 2009. 76p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009

MICHALEWICZ, Z. & SCHOENAUER, M. Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems. **Evolutionary Computation**, vol. 4, no. 1, pp. 1-32, 1996.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. 3ª rev. e aum. Ed. Charlotte, NC, USA: Springer, 1996.

MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1996.

NUNES, Thiêgo Maciel. **Otimização de cobertura, consumo de energia, roteamento e agregação de dados em rede de sensores sem fio utilizando algoritmos genéticos e lógica fuzzy**. 2011. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará. Belém, 2011.

OLIVEIRA, Bruno Gabriel Freitas. **Análise do desempenho energético de edificações: aplicação analítica do RTQ-C no Edifício do Ceamazon**. 2013. 162 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará. Belém, 2013.

OLIVEIRA, Rômulo Alves de. **Especificação e Implementação de um Algoritmo Genético para Otimização de Projetos de Iluminação Pública**. 2015. 73 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2015.

OSRAM. **Manual Luminotécnico Prático**. Disponível em: www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Livros/ManualOsram.pdf. Acesso em: 15 de nov. 2018.

PAULA, G. A. Modelos de regressão com apoio computacional. **Livro base**. Instituto de Matemática e Estatística - USP. Volume 1, pp 13 – 45, 2013.

PEREIRA, Márcio Roberto do Carmo. **Mapeamento de oportunidades de negócios a partir de laboratórios de pesquisa e desenvolvimento: estudo de caso CEAMAZON**. 2014. 113 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará. Belém, 2014.

PESSOA, J. L. N.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Estado da arte em eficiência energética: iluminação e envoltória. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações - CB3E** – UFSC, Florianópolis, 2013.

PLEBE, Alice; PAVONE, Mario. **Multi-objective Genetic Algorithm for Interior Lighting Design. International Workshop on Machine Learning, Optimization, and Big Data.** p. 222-233. Springer, Cham, 2017.

POZO, A., CAVALHEIRO, A. D. F., ISHIDA, C., SPINOSA, E., & RODRIGUES, E. M. **Computação evolutiva.** Universidade Federal do Paraná, 61 f. Grupo de Pesquisas em Computação Evolutiva, Departamento de Informática-Universidade Federal do Paraná, 2005.

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Manual de Iluminação.** 2011. Disponível em:
http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/MANUAL+DE+ILUMINACAO++PROCEL_EPP+-AGOSTO+2011.pdf/d42d2f36-0b90-4fe0-805f54b862c9692c;jsessionid=A7AE9AD7FFE410D97E371853D50763B0.srv154. Acesso em: 15 de nov. 2018.

RAMOS, G. **Análise da iluminação natural calculada por meio do programa Energyplus.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ROCHA, Hugo Xavier. **Optimization evolutionary algorithms multiobjective parallel to generate automated lighting outdoors designs.** 2015. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

ROSA, Thatiane de Oliveira; LUZ, Hellen Souza. Conceitos básicos de algoritmos genéticos: Teoria e prática. **XI Encontro de Estudantes de Informática do Tocantins**, p. 27-37, 2009.

SEBRAE. Guia do Empreendedor: **Fluxo de Caixa e Custos na Pequena Indústria.** 2010. Disponível em: <https://atendimento.sebraemg.com.br/biblioteca-digital/content/guia-empendedor-fluxo-caixa-custos-pequena-industria>. Acesso em: 02 de março, 2018.

SILVA, Rúben Fernandes Guedes de Oliveira. **Estudo da Eficiência Energética, na iluminação – Desenvolvimento de uma Ferramenta de Cálculo Luminotécnico e de Rentabilidade.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2013.

SILVA, S. **Seleção de características por meio de algoritmos genéticos para aprimoramento de rankings e de modelos de classificação.** 2011. 142 f. Tese (Doutorado em) - Universidade de São Paulo - USP, 2011.

SIMÃO, Leonardo Mendes. **Otimização da Programação da Produção em Refinarias de Petróleo utilizando Algoritmos Genéticos e Co-evolução Cooperativa**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.

SOARES, G. **Algoritmos genéticos: Estudo, novas técnicas e aplicações**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Pesquisa e desenvolvimento em Engenharia elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1997.

SOARES, Matheus Ramos. **Implementação de uma interface gráfica para cálculo luminotécnico**. 2018. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2018.

SOUZA, A.; CLEMENTE, A. **Decisões Financeiras e Análises de Investimentos: Fundamentos, técnicas e aplicações**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

SOUZA, Teófilo Miguel de, BIANCHI, Inácio. **Software para o cálculo do número de lâmpadas, luminárias e da distribuição no ambiente visando o uso eficiente da energia elétrica**. V *Encontro de Energia no Meio Rural*, p. 110 – 118, Campinas, 2004.

SRINIVAS, Mandavilli; PATNAIK, Lalit M. Genetic algorithms: A survey. **Computer**, v. 27, n. 6, p. 17-26, 1994.

TÁVARA, Edwin Germán Maldonado. **Algoritmo genético multiobjetivo na predição de estruturas proteicas no modelo hidrofóbico – polar**. 2012. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012

TAVARES, S. G. **Simulação Computacional para projeto de iluminação em arquitetura**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Arquitetura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

TOLEDO, Beatriz Guimarães. **Integração de iluminação natural e artificial: métodos e guia prático para projeto luminotécnico**. 2008. 190 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

VON ZUBEN, Fernando J. Computação evolutiva: uma abordagem pragmática. **Anais da I Jornada de Estudos em Computação de Piracicaba e Região (1a JECOMP)**, v. 1, p. 25-45, 2000.

APÊNDICE A – Dados de base utilizados para cálculo luminotécnico

Figura A 1 - Dados das lâmpadas que compõem o banco de dados da ferramenta desenvolvida.

(continua)

MODELO	CK (mm)	FLUXO_LUMINOSO (lm)	TEMP. COR (K)	POTENCIA (W)	MODELO_LAMPADA	TIPO	VIDA ÚTIL (h)	FRECO (R\$)
LUMILUX T5 HE 14 W/830 OSRAM	600	1200	3000	14	TUBULAR	FLORESCENTE	24000	19,79
LUMILUX T5 HE 14 W/865 OSRAM	600	1100	6500	14	TUBULAR	FLORESCENTE	24000	18,90
LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	1200	2600	3000	28	TUBULAR	FLORESCENTE	24000	17,90
LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	1200	2600	4000	28	TUBULAR	FLORESCENTE	24000	12,00
LUMILUX T5 HO 24 W/830 OSRAM	600	1750	3000	24	TUBULAR	FLORESCENTE	24000	14,98
LUMILUX T5 HO 24 W/840 OSRAM	600	1750	4000	24	TUBULAR	FLORESCENTE	24000	16,26
LUMILUX T5 HO 24 W/865 OSRAM	600	1600	6500	24	TUBULAR	FLORESCENTE	24000	26,02
LUMILUX T5 HO 54 W/830 OSRAM	1200	4450	3000	54	TUBULAR	FLORESCENTE	24000	22,54
LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	1200	4450	4000	54	TUBULAR	FLORESCENTE	24000	19,04
LUMILUX T5 HO 54 W/865 OSRAM	1200	4100	6500	54	TUBULAR	FLORESCENTE	24000	28,61
Master LEDTUBE GA T8 10 W/840 PHILIPS	600	1050	4000	10	TUBULAR	LED	25000	18,85
Master LEDTUBE GA T8 10 W/865 PHILIPS	600	1050	6500	10	TUBULAR	LED	25000	18,31
Master LEDTUBE GA T8 18 W/840 PHILIPS	1200	2100	4000	18	TUBULAR	LED	25000	54,50
Master LEDTUBE GA T8 18 W/865 PHILIPS	1200	2100	6500	18	TUBULAR	LED	25000	54,50
Master LEDTUBE GA T8 8ft. 33W/865 PHILIPS	2425	4000	6500	33	TUBULAR	LED	25000	125,00
MASTER LEDTUBE T5 13W/840 PHILIPS	1200	1600	4000	13	TUBULAR	LED	40000	67,64
MASTER LEDTUBE T5 7, 5W/840 PHILIPS	600	800	4000	7,5	TUBULAR	LED	40000	40,78
CorePro LEDTUBE T8 9W/840 PHILIPS	600	900	4000	9	TUBULAR	LED	25000	25,90
CorePro LEDTUBE T8 9W/865 PHILIPS	600	900	6500	9	TUBULAR	LED	25000	19,90
CorePro LEDTUBE T8 18W/840 PHILIPS	1200	1850	4000	18	TUBULAR	LED	30000	35,51
CorePro LEDTUBE T8 18W/865 PHILIPS	1200	1850	6500	18	TUBULAR	LED	30000	35,75
CorePro LEDTUBE InstantFit HF T5 HO 26W 830	1200	3700	3000	26	TUBULAR	LED	50000	125,45
MASTER LEDTUBE InstantFit HF T5 HO 26W 840	1200	3900	4000	26	TUBULAR	LED	50000	132,34
MASTER LEDTUBE InstantFit HF T5 HO 26W 840	1200	1850	6500	20	TUBULAR	LED	25000	24,90
LED TUBULAR T8 20W ELGIN	600	900	6500	10	TUBULAR	LED	25000	25,90
LED TUBULAR T8 10W ELGIN	600	900	6500	9	TUBULAR	LED	25000	19,90
LED TUBULAR 1660 T8 60cm GALAXY LED	600	900	4000	9	TUBULAR	LED	25000	15,08
LED TUBULAR 1661 T8 60cm GALAXY LED	600	900	4000	9	TUBULAR	LED	25000	15,08
LED TUBULAR 1662 T8 60cm GALAXY LED	600	900	6500	9	TUBULAR	LED	25000	28,14
LED TUBULAR 1663 T8 60cm GALAXY LED	1200	1850	4000	18	TUBULAR	LED	25000	24,91
LED TUBULAR 1664 T8 120cm GALAXY LED	1200	1850	3000	18	TUBULAR	LED	25000	22,12
LED TUBULAR 1664 T8 120cm GALAXY LED	600	900	4000	10	TUBULAR	LED	25000	13,08
LED TUBULAR vídeo 1650 T8 60cm GALAXY LED	600	900	6500	10	TUBULAR	LED	25000	22,12
LED TUBULAR vídeo 1651 T8 60cm GALAXY LED	600	900	6500	10	TUBULAR	LED	25000	22,12
LED TUBULAR vídeo 1652 T8 60cm GALAXY LED	1200	1850	3000	18	TUBULAR	LED	25000	29,90
LED TUBULAR vídeo 1653 T8 120cm GALAXY LED	1200	1850	6500	18	TUBULAR	LED	25000	24,90
LED TUBULAR vídeo 1655 T8 120cm GALAXY LED	1200	1850	3000	20	TUBULAR	LED	25000	14,99
LED TUBULAR vídeo 1653A T8 120cm GALAXY LED	1200	1850	4000	20	TUBULAR	LED	25000	23,40
LED TUBULAR vídeo 1654A T8 120cm GALAXY LED	1200	1850	6500	20	TUBULAR	LED	25000	22,73
LED TUBULAR vídeo 1655A T8 120cm GALAXY LED	2380	4000	6500	40	TUBULAR	LED	25000	149,90
LED TUBULAR HO GALAXY LED	600	1035	3000	9	TUBULAR	LED	25000	17,91
TUBOLED T8 TL09F3AG OL	600	1035	4000	9	TUBULAR	LED	25000	17,82
TUBOLED T8 TL09F4AG OL	600	1035	6500	9	TUBULAR	LED	25000	17,90
TUBOLED T8 TL09F6AG OL	1200	2070	3000	18	TUBULAR	LED	25000	26,91
TUBOLED T8 TL18F3AG OL	1200	2070	4000	18	TUBULAR	LED	25000	17,67
TUBOLED T8 TL18F4AG OL	1200	2070	6500	18	TUBULAR	LED	25000	18,93
TUBOLED T8 TL18F6AG OL	2425	3900	5000	36	TUBULAR	LED	40000	93,53
TUBOLED T8 HO TL36V5A OL	600	900	3000	10	TUBULAR	LED	25000	15,03
TUBULAR T8 SMART 433904 BRILIA	600	900	4000	10	TUBULAR	LED	25000	17,50
TUBULAR T8 SMART 434444 BRILIA	600	900	6500	10	TUBULAR	LED	25000	16,24
TUBULAR T8 SMART 433928 BRILIA	1200	1850	3000	18	TUBULAR	LED	25000	29,57
TUBULAR T8 SMART 433935 BRILIA	1200	1850	4000	18	TUBULAR	LED	25000	21,24
TUBULAR T8 SMART 434451 BRILIA	1200	1850	6500	18	TUBULAR	LED	25000	22,78
TUBULAR T8 SMART 433959 BRILIA	1200	1850	3000	10	TUBULAR	LED	25000	20,56
TUBULAR T8 LED-0694/ 10W L&D	600	900	6500	10	TUBULAR	LED	25000	20,90
TUBULAR T8 LED-0695/ 10W L&D	600	900	6500	10	TUBULAR	LED	25000	20,90
TUBULAR T8 LED-0612/ 18W L&D	1200	1850	4000	18	TUBULAR	LED	25000	19,90
TUBULAR T8 LED-0636 18W L&D	1200	1850	6500	18	TUBULAR	LED	25000	18,30
TUBULAR T8 LED-0613/ 18W L&D	1200	1850	6500	18	TUBULAR	LED	25000	20,56
TUBO T8 LED 20 TASCIBRA	600	900	4000	9,9	TUBULAR	LED	25000	18,30
TUBO T8 LED 20 TASCIBRA	600	900	6500	9,9	TUBULAR	LED	25000	20,16
TUBO T8 LED 40 TASCIBRA	1200	1850	4000	20,5	TUBULAR	LED	25000	23,56
TUBO T8 LED 40 TASCIBRA	1200	1850	6500	20,5	TUBULAR	LED	25000	26,01
LAMPADA TUBULAR 16 W TASCIBRA	600	970	6400	36	TUBULAR	FLORESCENTE	6000	10,40
LAMPADA TUBULAR 36 W TASCIBRA	1200	2300	6400	36	TUBULAR	FLORESCENTE	6000	12,41

Fonte: Autor.

Figura A 2 - Dados das lâmpadas que compõem o banco de dados da ferramenta desenvolvida.

	600	900	6500	10	TUBULAR	LED	25000	26,51
TUBULAR LED BDT8-0900-01 BLACK+DECKER	1200	1850	6500	20	TUBULAR	LED	25000	31,35
TUBULAR LED BDT8-1850-01 BLACK+DECKER	2380	3800	6400	40	TUBULAR	LED	25000	99,50
SUPERLED TUBO HO 40W OUROLUX	2380	3800	4000	40	TUBULAR	LED	25000	119,00
SUPERLED TUBE GLASS T8 9W OUROLUX	600	900	6500	9	TUBULAR	LED	25000	18,90
SUPERLED TUBE GLASS T8 9W OUROLUX	600	900	4000	9	TUBULAR	LED	25000	18,90
SUPERLED TUBE GLASS T8 18W OUROLUX	1200	1850	6500	18	TUBULAR	LED	25000	22,88
SUPERLED TUBE GLASS T8 18W OUROLUX	1200	1850	4000	18	TUBULAR	LED	25000	24,77
SUPERLED TUBE 20215 T8 10W OUROLUX	600	900	4000	10	TUBULAR	LED	25000	16,99
SUPERLED TUBE 20225 T8 20W OUROLUX	1200	1850	4000	20	TUBULAR	LED	25000	23,68
SUPERLED TUBE HO 20230 OUROLUX	2380	3800	6500	40	TUBULAR	LED	25000	123,45
FLUORESCENTE TUBULAR FT20216 T8 EMPALUX	600	1200	6400	18	TUBULAR	FLUORESCENTE	8000	10,90
FLUORESCENTE TUBULAR FT40216 T8 EMPALUX	1200	2300	6400	36	TUBULAR	FLUORESCENTE	8000	12,76
LED TUBULAR T8 TL10316 EMPALUX	600	940	6500	10	TUBULAR	LED	25000	19,89
LED TUBULAR T8 TL20316 EMPALUX	1200	1940	6500	20	TUBULAR	LED	25000	25,69
LED TUBULAR T8 HO TL65216 EMPALUX	2380	6500	6400	65	TUBULAR	LED	25000	156,63
TUBULAR LED BIV T8L-18-120 EQOO	1200	1800	6500	18	TUBULAR	LED	25000	31,14
TUBULAR LED BIV T8IN-09W-60 EQOO	600	900	6500	9	TUBULAR	LED	25000	27,25
TUBULAR LED BIV T8HN-10W-60-B EQOO	600	1000	6500	10	TUBULAR	LED	25000	33,57
TUBULAR LED BIV T8HL2001 EQOO	2425	4100	6500	48	TUBULAR	LED	25000	96,72
ULTRALED TUBULAR T8 9W GOLDEN	600	1000	6500	9	TUBULAR	LED	25000	30,16
ULTRALED TUBULAR T8 9W GOLDEN	600	1000	4000	9	TUBULAR	LED	25000	31,90
ULTRALED TUBULAR T8 18W GOLDEN	1200	2000	4000	18	TUBULAR	LED	25000	33,50
ULTRALED TUBULAR T8 18W GOLDEN	1200	2000	4000	18	TUBULAR	LED	25000	34,99
ULTRALED TUBULAR T8 HO 40W GOLDEN	2380	4000	4000	40	TUBULAR	LED	25000	80,25
LED TUBE GLASS 11418 T8 KIAN	1200	1850	4000	18	TUBULAR	LED	25000	22,68
LED TUBE GLASS 11417 T8 KIAN	600	900	4000	9	TUBULAR	LED	25000	19,90
LED TUBE GLASS 11416 T8 KIAN	600	900	4000	9	TUBULAR	LED	25000	19,90
LED TUBE HO 10877 KIAN	2380	4000	6500	40	TUBULAR	LED	25000	135,90
Standard LEDbulb LEDbulb 1BL/6 BR PHILIPS	60	600	6500	6	BULBO	LED	25000	18,99
Standard LEDbulb LEDbulb A55 1PF/10 BR PHILIPS	60	560	3000	6	BULBO	LED	25000	18,99
SMART LED BULBO 436912 BRILIA	60	600	6500	7	BULBO	LED	25000	14,90
SMART LED BULBO 436349 BRILIA	60	803	6500	9	BULBO	LED	25000	16,90
SUPER LED BULBO OURO 20021 OUROLUX	60	560	6500	6	BULBO	LED	25000	7,59
FLUORESCENTE COMPACTA ESPIRAL 15W PHILIPS	60	840	6500	15	FCEL	FLUORESCENTE	6000	11,90
FLUORESCENTE COMPACTA 14W PHILIPS	60	810	6500	14	FCEL	FLUORESCENTE	6000	7,9
FLUORESCENTE COMPACTA FULL SPIRAL TKFS 15 TASCHEIRA	60	870	6400	15	FCEL	FLUORESCENTE	8000	17,01
FLUORESCENTE COMPACTA 3U TKT 15 220V TASCHEIRA	60	840	2700	15	FCEL	FLUORESCENTE	6000	12,51
FLUORESCENTE COMPACTA ESPIRAL 15W 48LES15WB003 ELGIN	60	870	6400	15	FCEL	FLUORESCENTE	6000	11,9

Fonte: Autor.

Figura A 3 - Dados das luminárias que compõem o banco de dados.

MODELO	Cx (mm)	PREÇO (R\$)	INSTALACAO	TIPO LAMPADA	NUMERO_LAMPADAS
A01 Abalux	600	57,65	SOBREPOR	TUBULAR	2
A02 Abalux	1200	160,68	SOBREPOR	TUBULAR	2
A03Abalux	600	78,47	EMBUTIR	TUBULAR	2
A04 Abalux	1200	100,00	EMBUTIR	TUBULAR	2
A05 Abalux	600	197,46	SOBREPOR	TUBULAR	4
A06 Abalux	600	98,31	EMBUTIR	TUBULAR	4
A08 Abalux	1200	62,66	SOBREPOR	TUBULAR	2
A10 Abalux	1200	117,34	EMBUTIR	TUBULAR	2
A11 Abalux	600	153,72	SOBREPOR	TUBULAR	4
A12 Abalux	600	174,00	EMBUTIR	TUBULAR	4
A13 Abalux	600	108,64	SOBREPOR	TUBULAR	2
A14 Abalux	1200	149,48	SOBREPOR	TUBULAR	2
A15 Abalux	600	128,33	EMBUTIR	TUBULAR	2
A16 Abalux	1200	110,65	EMBUTIR	TUBULAR	2
A300 Abalux	1200	442,86	SOBREPOR	TUBULAR	4
A302 Abalux	1200	278,30	EMBUTIR	TUBULAR	4
A311 Abalux	1200	70,74	SOBREPOR	TUBULAR	2
A314 Abalux	1200	57,38	EMBUTIR	TUBULAR	2
A319ACT Abalux	1200	278,30	SOBREPOR	TUBULAR	2
A321ACT Abalux	1200	396,38	EMBUTIR	TUBULAR	2
A322 Abalux	600	73,90	SOBREPOR	TUBULAR	2
A323 Abalux	1200	112,96	SOBREPOR	TUBULAR	2
A400 Abalux	600	84,66	SOBREPOR	TUBULAR	2
A401 Abalux	1200	155,00	SOBREPOR	TUBULAR	2
A401 TL Abalux	1200	190,36	SOBREPOR	TUBULAR	2
A402 Abalux	1200	84,04	EMBUTIR	TUBULAR	2
A403 Abalux	1200	136,67	EMBUTIR	TUBULAR	2
A404 Abalux	600	123,65	SOBREPOR	TUBULAR	2
A405 Abalux	1200	180,57	SOBREPOR	TUBULAR	2
A406 Abalux	600	101,69	EMBUTIR	TUBULAR	2
A407 Abalux	1200	153,42	EMBUTIR	TUBULAR	2
A412 Abalux	1200	109,01	EMBUTIR	TUBULAR	2
A414ACL Abalux	600	90,70	SOBREPOR	TUBULAR	2
A415ACL Abalux	1200	165,90	SOBREPOR	TUBULAR	2
A415ACT Abalux	1200	152,90	SOBREPOR	TUBULAR	2
A417ACL Abalux	600	100,52	EMBUTIR	TUBULAR	2
A418ACL Abalux	1200	155,00	EMBUTIR	TUBULAR	2
A418ACT Abalux	1200	152,54	EMBUTIR	TUBULAR	2
A421 Abalux	1200	91,63	SOBREPOR	TUBULAR	2
A431-IP66 Abalux	600	163,61	SOBREPOR	TUBULAR	2
A432-IP66 Abalux	1200	166,90	SOBREPOR	TUBULAR	2
A433ACL Abalux	600	239,90	SOBREPOR	TUBULAR	4
A434ACT Abalux	600	225,96	EMBUTIR	TUBULAR	4
A434ACL Abalux	600	344,79	EMBUTIR	TUBULAR	4
A60 Abalux	1200	66,67	SOBREPOR	TUBULAR	2
A602 Abalux	600	311,27	EMBUTIR	TUBULAR	4
A610 Abalux	1200	111,40	EMBUTIR	TUBULAR	2
A612 Abalux	1200	139,10	EMBUTIR	TUBULAR	2
A626 Abalux	600	148,32	EMBUTIR	TUBULAR	4
A628 Abalux	1200	223,94	SOBREPOR	TUBULAR	2
A663 Abalux	1200	62,36	EMBUTIR	TUBULAR	2
A664 Abalux	1200	51,38	SOBREPOR	TUBULAR	2
A665 Abalux	2425	87,40	SOBREPOR	TUBULAR	2
A667 Abalux	1200	37,65	SOBREPOR	TUBULAR	2
A668 Abalux	2425	57,26	SOBREPOR	TUBULAR	2
BR02 Abalux	1200	195,90	SOBREPOR	TUBULAR	2
BR03 Abalux	600	106,26	EMBUTIR	TUBULAR	2
BR04 Abalux	1200	115,00	EMBUTIR	TUBULAR	2
BR05 Abalux	600	209,71	SOBREPOR	TUBULAR	4
BR06 Abalux	600	171,87	EMBUTIR	TUBULAR	4
BR10 Abalux	1200	80,30	EMBUTIR	TUBULAR	2
BR12 Abalux	600	119,36	EMBUTIR	TUBULAR	4
BR400 Abalux	600	113,96	SOBREPOR	TUBULAR	2
BR401 Abalux	1200	166,46	SOBREPOR	TUBULAR	2
E02 Abalux	600	79,35	EMBUTIR	TUBULAR	2
E03 Abalux	600	139,76	SOBREPOR	TUBULAR	4
E04 Abalux	600	277,17	EMBUTIR	TUBULAR	4
E05 Abalux	1200	185,34	SOBREPOR	TUBULAR	2
E06 Abalux	1200	175,95	EMBUTIR	TUBULAR	2
E09 Abalux	1200	212,95	SOBREPOR	TUBULAR	4
E10 Abalux	600	170,00	EMBUTIR	TUBULAR	4
E11 Abalux	1200	111,45	SOBREPOR	TUBULAR	2
E12 Abalux	1200	140,42	EMBUTIR	TUBULAR	2
E100 Abalux	1200	176,21	EMBUTIR	TUBULAR	2
E102 Abalux	1200	212,88	SOBREPOR	TUBULAR	2
E103 Abalux	600	175,13	EMBUTIR	TUBULAR	4
E104 Abalux	600	161,43	SOBREPOR	TUBULAR	4
E107 Abalux	600	187,18	EMBUTIR	TUBULAR	4
E109 Abalux	1200	118,86	EMBUTIR	TUBULAR	2
E110 Abalux	1200	134,83	SOBREPOR	TUBULAR	2
E111ACT Abalux	1200	287,89	EMBUTIR	TUBULAR	2
E113ACL Abalux	1200	162,47	EMBUTIR	TUBULAR	2
E113ACT Abalux	1200	146,78	EMBUTIR	TUBULAR	2
E114ACL Abalux	600	233,66	EMBUTIR	TUBULAR	4
E114ACT Abalux	600	211,10	EMBUTIR	TUBULAR	4
E115ACL Abalux	1200	116,16	SOBREPOR	TUBULAR	2
E117 Abalux	1200	289,72	SOBREPOR	TUBULAR	4
E119 Abalux	2380	374,74	SOBREPOR	TUBULAR	4
E138ACT Abalux	1200	341,83	SOBREPOR	TUBULAR	2
E58 Abalux	1200	154,58	SOBREPOR	TUBULAR	2
E60 Abalux	1200	149,18	SOBREPOR	TUBULAR	2
E62 Abalux	1200	69,69	SOBREPOR	TUBULAR	2
E66 Abalux	1200	71,19	SOBREPOR	TUBULAR	2
E73-IP66 Abalux	600	99,90	SOBREPOR	TUBULAR	2
E74-IP66 Abalux	1200	144,24	SOBREPOR	TUBULAR	2
E79 Abalux	1200	208,22	SOBREPOR	TUBULAR	2
E82 Abalux	1200	166,18	EMBUTIR	TUBULAR	2
E83 Abalux	600	288,69	EMBUTIR	TUBULAR	4
PF37-S2E27 Abalux	60	268,58	SOBREPOR	BULBO / FCCEL	2

Fonte: Autor.

Na Figura A.4 são apresentados os dados quantitativos dos sistemas de iluminação que estão instalados nos cenários, onde a iluminância mantida apresentada é o valor de referência em lúmens disposto pela norma vigente, o N_LUMINARIA é a quantidade de luminárias no ambiente e N_LAMPADA o número de lâmpadas por luminária.

Figura A 4 - Dados utilizados referente ao sistema de iluminação instalados nos cenários.

NOME	I LUMINACAO_MANTIDA (Em)	N_LUMINARIA (UND)	N_LAMPADA (UND)	LAMPADA_POTENCIA (W)	LAMPADA_VIDA_UTIL (h)	LAMPADA_PRECO (R\$)	HORAS_ANO (h)	LAMPADA_TIPO
CEN_1	500	12	4	20	8000	8	2871	T10
CEN_2	200	-	3	20	6000	13,9	1044	compacta 3U eletrônica
CEN_3	100	4	2	20	6000	13,9	522	compacta 3U eletrônica
CEN_4	500	9	4	20	8000	8	783	T10

Fonte: Autor.

APÊNDICE B – Mapa de memória

Resultados complementares das melhores soluções geradas pela ferramenta para cada cenário avaliado.

Figura A 5 - Mapa de memória da melhor solução do cenário 1

LAMPADA	LUMINARIA	LAMPADA MODELO	LUMINARIA CODIGO	N_LAMPADAS	N_LUMINARIAS	INVESTIMENTO (R\$)	PAYBACK (ano)
8	32	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	A667_FU	10	5	378,65	0,454799926
7	32	LUMILUX T5 HO 54 W/830 OSRAM	A667_FU	10	5	413,65	0,496838741
2	32	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A667_FU	16	8	507,6	0,500130531
8	31	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	A664_FU	10	5	447,3	0,537256059
3	32	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A667_FU	16	8	574,64	0,566184019
9	32	LUMILUX T5 HO 54 W/865 OSRAM	A667_FU	10	5	474,35	0,569746058
7	31	LUMILUX T5 HO 54 W/830 OSRAM	A664_FU	10	5	482,3	0,579294875
8	30	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	A663_FU	10	5	502,2	0,603196944
2	31	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A664_FU	16	8	617,44	0,608354206
43	32	TUBOLED T8 TL18P4AO OL	A667_FU	20	10	729,9	0,613682625
8	26	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	A60_FU	10	5	523,75	0,629080843
44	32	TUBOLED T8 TL18P6AO OL	A667_FU	20	10	755,1	0,634870188
7	30	LUMILUX T5 HO 54 W/830 OSRAM	A663_FU	10	5	537,2	0,645235759
9	31	LUMILUX T5 HO 54 W/865 OSRAM	A664_FU	10	5	543	0,652202191
7	26	LUMILUX T5 HO 54 W/830 OSRAM	A60_FU	10	5	558,75	0,671115658
3	31	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A664_FU	16	8	684,48	0,674407694
2	30	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A663_FU	16	8	705,28	0,694901637
9	30	LUMILUX T5 HO 54 W/865 OSRAM	A663_FU	10	5	597,9	0,718143076
35	32	LED TUBULAR vidro 1653A T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	22	11	743,93	0,721706212
43	31	TUBOLED T8 TL18P4AO OL	A664_FU	20	10	867,2	0,729121212
44	31	TUBOLED T8 TL18P6AO OL	A664_FU	20	10	892,4	0,750308775
3	30	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A663_FU	16	8	772,32	0,760955105
55	32	TUBULAR T8 LED-0636 18W L&D	A667_FU	22	11	851,95	0,76202061
56	32	TUBULAR T8 LED-0613/ 18W L&D	A667_FU	22	11	851,95	0,76202061
42	32	TUBOLED T8 TL18P3AO OL	A667_FU	20	10	914,7	0,769058087
8	24	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	A421_FU	10	5	648,55	0,778979247
54	32	TUBULAR T8 LED-0612/ 18W L&D	A667_FU	22	11	873,95	0,781698353
50	32	TUBULAR T8 SMART 434451 BRILLIA	A667_FU	22	11	881,43	0,788388786
51	32	TUBULAR T8 SMART 433959 BRILLIA	A667_FU	22	11	915,31	0,818692511
7	24	LUMILUX T5 HO 54 W/830 OSRAM	A421_FU	10	5	683,55	0,821018062
43	30	TUBOLED T8 TL18P4AO OL	A663_FU	20	10	977	0,821438451
44	30	TUBOLED T8 TL18P6AO OL	A663_FU	20	10	1002,2	0,842626013
43	26	TUBOLED T8 TL18P4AO OL	A60_FU	20	10	1020,1	0,857675909
70	32	SUPERLED TUBE GLASS T8 18W OUROLUX	A667_FU	22	11	959,09	0,85785122
34	32	LED TUBULAR vidro 1655 T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	22	11	961,95	0,860409327
29	32	LED TUBULAR 1664 T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	22	11	962,17	0,860606104
35	31	LED TUBULAR vidro 1653A T8 120cm GALAXY LED	A664_FU	22	11	894,96	0,868224418
44	26	TUBOLED T8 TL18P6AO OL	A60_FU	20	10	1045,3	0,878863472
42	31	TUBOLED T8 TL18P3AO OL	A664_FU	20	10	1052	0,884496673
37	32	LED TUBULAR vidro 1655A T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	22	11	914,21	0,886899353
43	8	TUBOLED T8 TL18P4AO OL	A311_FU	20	10	1060,8	0,891895505
8	5	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	A16_FU	10	5	743,65	0,893204714
55	31	TUBULAR T8 LED-0636 18W L&D	A664_FU	22	11	1002,98	0,897108318
56	31	TUBULAR T8 LED-0613/ 18W L&D	A664_FU	22	11	1002,98	0,897108318
8	40	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	E11_FU	10	5	747,65	0,89800915
36	32	LED TUBULAR vidro 1654A T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	22	11	928,95	0,901199018
62	32	LAMPADA TUBULAR 36 W TASCHIBRA	A667_FU	18	9	562,23	0,909057043
54	31	TUBULAR T8 LED-0612/ 18W L&D	A664_FU	22	11	1024,98	0,916786061
50	31	TUBULAR T8 SMART 434451 BRILLIA	A664_FU	22	11	1032,46	0,923476494
59	32	TUBO T8 LED 40 TASCHIBRA	A667_FU	22	11	932,47	0,924163475

Fonte: Autor

Figura A 6 - - Mapa de memória da melhor solução do cenário 2.

LAMPADA	LUMINARIA	LAMPADA MODELO	LUMINARIA CODIGO	N_LAMPADAS	N_LUMINARIAS	INVESTIMENTO (R\$)	PAYBACK (Ano)
1							
2							
3	43	TUBOLED T8 TL18P4AO OL	A667_FU	2	1	42,99	4,836159338
4	32	TUBOLED T8 TL18P6AO OL	A667_FU	2	1	75,51	4,816634636
5	32	TUBULAR T8 LED-0636 18W L&D	A667_FU	2	1	77,45	4,955571969
6	32	TUBULAR T8 LED-0613/ 18W L&D	A667_FU	2	1	77,45	4,955571969
7	32	TUBULAR T8 LED-0612/ 18W L&D	A667_FU	2	1	79,45	5,03751776
8	32	TUBULAR T8 SMART 434451 BRILIA	A667_FU	2	1	80,13	5,056090161
9	32	LED TUBULAR vidro 1653A T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	2	1	67,63	5,074482167
10	31	TUBULAR T8 SMART 433959 BRILIA	A664_FU	2	1	86,21	5,139967548
11	32	TUBOLED T8 TL18P4AO OL	A664_FU	2	1	86,72	5,235555089
12	29	LED TUBULAR vidro 1655 T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	2	1	87,45	5,255435119
13	32	LED TUBULAR 1664 T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	2	1	87,47	5,255979778
14	31	TUBOLED T8 TL18P6AO OL	A664_FU	2	1	89,24	5,304182042
15	31	TUBULAR T8 LED-0613/ 18W L&D	A664_FU	2	1	91,18	5,357013903
16	32	TUBULAR T8 LED-0636 18W L&D	A664_FU	2	1	91,18	5,357013903
17	32	TUBOLED T8 TL18P3AO OL	A667_FU	2	1	91,47	5,364911449
18	31	TUBULAR T8 LED-0612/ 18W L&D	A664_FU	2	1	93,18	5,411479738
19	31	TUBULAR T8 SMART 434451 BRILIA	A664_FU	2	1	93,86	5,429998123
20	32	LED TUBULAR 1663 T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	2	1	93,93	5,431904427
21	32	LED TUBULAR vidro 1653A T8 120cm GALAXY LED	A664_FU	2	1	81,36	5,472184405
22	32	TUBULAR T8 SMART 433935 BRILIA	A667_FU	2	1	96,79	5,509790572
23	32	TUBULAR T8 SMART 433959 BRILIA	A664_FU	2	1	96,94	5,513875509
24	32	LED TUBULAR vidro 1655A T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	2	1	83,11	5,522874785
25	32	LED TUBULAR vidro 1653 T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	2	1	97,45	5,527764298
26	32	TUBOLED T8 TL18P4AO OL	A663_FU	2	1	97,7	5,534572527
27	32	LED TUBULAR vidro 1654A T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	2	1	84,45	5,561689133
28	34	TUBOLED T8 TL18P6AO OL	A663_FU	2	1	100,22	5,60319948
29	31	LED TUBULAR vidro 1655 T8 120cm GALAXY LED	A664_FU	2	1	101,18	5,629343081
30	32	LED TUBULAR 1664 T8 120cm GALAXY LED	A664_FU	2	1	101,2	5,629887739
31	32	LED TUBULAR T8 20W ELGIN	A667_FU	2	1	87,45	5,648586927
32	26	TUBOLED T8 TL18P4AO OL	A60_FU	2	1	102,01	5,651946403
33	30	TUBULAR T8 LED-0636 18W L&D	A663_FU	2	1	102,16	5,656031341
34	32	TUBULAR T8 LED-0613/ 18W L&D	A663_FU	2	1	102,16	5,656031341
35	32	TUBO T8 LED 40 TASCIBRA	A667_FU	2	1	84,77	5,675936008
36	30	TUBULAR T8 LED-0612/ 18W L&D	A663_FU	2	1	104,16	5,710497176
37	30	TUBOLED T8 TL18P6AO OL	A60_FU	2	1	104,53	5,720573356
38	31	TUBULAR T8 SMART 434451 BRILIA	A663_FU	2	1	104,84	5,72901556
39	26	TUBOLED T8 TL18P3AO OL	A664_FU	2	1	105,2	5,738819411
40	26	TUBULAR T8 LED-0636 18W L&D	A60_FU	2	1	106,47	5,773405216
41	20	TUBULAR T8 LED-0613/ 18W L&D	A60_FU	2	1	106,47	5,773405216
42	35	CorePro LEDtube T8 18W/865 PHILIPS	A667_FU	2	1	106,65	5,778307142
43	30	LED TUBULAR vidro 1653A T8 120cm GALAXY LED	A663_FU	2	1	92,34	5,790230332
44	31	LED TUBULAR 1663 T8 120cm GALAXY LED	A664_FU	2	1	107,66	5,805812389
45	30	TUBULAR T8 SMART 433959 BRILIA	A663_FU	2	1	107,92	5,812892947
46	32	TUBO T8 LED 40 TASCIBRA	A667_FU	2	1	89,67	5,820163615
47	54	TUBULAR T8 LED-0612/ 18W L&D	A60_FU	2	1	108,47	5,827871052
48	31	TUBULAR T8 SMART 434451 BRILIA	A60_FU	2	1	109,15	5,846389436
49	31	TUBULAR T8 SMART 433935 BRILIA	A664_FU	2	1	110,52	5,883698534
50	33	LED TUBULAR vidro 1653 T8 120cm GALAXY LED	A664_FU	2	1	111,18	5,901672259
51	26	LED TUBULAR vidro 1655A T8 120cm GALAXY LED	A664_FU	2	1	96,65	5,915073496
52	31	LED TUBULAR vidro 1655A T8 120cm GALAXY LED	A664_FU	2	1	96,84	5,920577023

Fonte: Autor.

Figura A 7 - Mapa de memória da melhor solução do cenário 3.

LAMPADA	LUMINARIA	LAMPADA MODELO	LUMINARIA CODIGO	N_LAMPADAS	N_LUMINARIAS	INVESTIMENTO (R\$)	PAYBACK (ano)
2	32	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A667_FU	2	1	63,45	1,728913803
3	32	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A667_FU	2	1	71,83	1,964150485
2	31	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A664_FU	2	1	77,18	2,120527535
2	9	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A314_FU	2	1	83,18	2,298082553
3	31	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A664_FU	2	1	85,56	2,368512711
2	30	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A663_FU	2	1	88,16	2,445453218
3	9	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A314_FU	2	1	91,56	2,546067729
2	26	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A60_FU	2	2	92,47	2,572996906
2	8	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A311_FU	2	1	96,54	2,693438394
3	30	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A663_FU	2	1	96,54	2,693438394
3	26	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A60_FU	2	1	100,85	2,820982082
3	8	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A311_FU	2	1	104,92	2,941423569
2	24	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A421_FU	2	1	117,43	3,329084769
3	24	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A421_FU	2	1	125,81	3,590963436
2	5	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A16_FU	2	1	136,45	3,923468092
2	40	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	E11_FU	2	1	137,25	3,948468442
2	12	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A323_FU	2	1	138,76	3,995656602
3	5	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A16_FU	2	1	144,93	4,196044209
3	40	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	E11_FU	2	1	145,63	4,222487476
3	12	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A323_FU	2	1	147,14	4,272399143
8	32	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	A667_FU	2	1	75,73	4,415192786
2	28	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A612_FU	2	1	164,9	4,859439675
7	32	LUMILUX T5 HO 54 W/830 OSRAM	A667_FU	2	2	82,73	4,877949962
43	32	TUBOLED T8 TL18P4AO OL	A667_FU	4	2	145,98	5,117974143
3	28	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A612_FU	2	1	173,28	5,144520793
2	4	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A14_FU	2	1	175,28	5,214547927
8	31	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	A664_FU	2	1	89,46	5,341997311
56	32	TUBULAR T8 LED-0613/ 16W L&D	A667_FU	4	2	154,9	5,4870808
3	4	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A14_FU	2	1	183,66	5,507961618
9	32	LUMILUX T5 HO 54 W/865 OSRAM	A667_FU	2	1	94,87	5,720844105
8	9	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	A314_FU	2	1	95,46	5,762160114
7	31	LUMILUX T5 HO 54 W/830 OSRAM	A664_FU	2	1	96,46	5,832187248
51	32	TUBULAR T8 SMART 433959 BRILIA	A667_FU	4	2	166,42	5,963774599
69	32	SUPERLED TUBE GLASS T8 18W OUROLUX	A667_FU	4	2	166,82	5,980326467
8	30	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	A663_FU	2	1	100,44	6,117630421
7	9	LUMILUX T5 HO 54 W/830 OSRAM	A314_FU	2	1	102,46	6,267676434
70	32	SUPERLED TUBE GLASS T8 18W OURCLUX	A667_FU	4	2	174,38	6,310961535
8	26	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	A60_FU	2	1	104,75	6,437778102
44	31	TUBOLED T8 TL18P6AO OL	A664_FU	4	2	178,48	6,490922212
7	30	LUMILUX T5 HO 54 W/830 OSRAM	A663_FU	2	1	107,44	6,637591853
7	2	LUMILUX T5 HO 54 W/830 OSRAM	A08_FU	2	1	107,74	6,659875914
55	31	TUBULAR T8 LED-0636 18W L&D	A664_FU	4	2	182,36	6,661226463
37	32	LED TUBULAR vidro 1653A T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	4	2	166,22	6,682382816
9	31	LUMILUX T5 HO 54 W/865 OSRAM	A664_FU	2	1	109,6	6,72375689
8	8	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	A311_FU	2	1	108,82	6,740098535
36	32	LED TUBULAR vidro 1654A T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	4	2	168,9	6,811778932
50	31	TUBULAR T8 SMART 434451 BRILIA	A664_FU	4	2	187,72	6,896492129
28	32	LED TUBULAR 1663 T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	4	2	187,86	6,902637128
7	26	LUMILUX T5 HO 54 W/830 OSRAM	A60_FU	2	1	111,75	6,957739534
35	9	LED TUBULAR vidro 1653A T8 120cm GALAXY LED	A314_FU	4	2	174,72	7,098541521

Fonte: Autor.

Figura A 8 - Mapa de memória da melhor solução do cenário 4.

LAMPADA	LUMINARIA	LAMPADA MODELO	LUMINARIA CODIGO	N_LAMPADAS	N_LUMINARIAS	INVESTIMENTO (R\$)	PAYBACK (ano)
8	32	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	A667_FU	8	4	302,92	1,99489365
7	32	LUMILUX T5 HO 54 W/830 OSRAM	A667_FU	8	4	330,92	2,19402306
8	31	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	A664_FU	8	4	357,84	2,385873646
7	31	LUMILUX T5 HO 54 W/830 OSRAM	A664_FU	8	4	385,84	2,585349036
2	32	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A667_FU	14	7	444,15	2,614881125
8	30	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	A663_FU	8	4	401,76	2,698765044
7	30	LUMILUX T5 HO 54 W/830 OSRAM	A663_FU	8	4	429,76	2,898240435
3	32	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A667_FU	14	7	502,81	2,981818538
2	31	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A664_FU	14	7	540,26	3,228186507
43	32	TUBOLED T8 TL18P4AO OL	A667_FU	18	9	656,91	3,253600758
44	32	TUBOLED T8 TL18P6AO OL	A667_FU	18	9	679,59	3,377693404
3	31	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A664_FU	14	7	598,92	3,61568177
2	30	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A663_FU	14	7	617,12	3,735907031
43	31	TUBOLED T8 TL18P4AO OL	A664_FU	18	9	780,48	3,929708709
44	31	TUBOLED T8 TL18P6AO OL	A664_FU	18	9	803,16	4,056966548
3	30	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A663_FU	14	7	675,78	4,130524565
42	32	TUBOLED T8 TL18P3AO OL	A667_FU	18	9	823,23	4,173056596
35	32	LED TUBULAR vidro 1653A T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	20	10	676,3	4,252291242
55	32	TUBULAR T8 LED-0636 18W L&D	A667_FU	20	10	774,5	4,339266331
43	30	TUBOLED T8 TL18P4AO OL	A663_FU	18	9	879,3	4,497547537
44	30	TUBOLED T8 TL18P6AO OL	A663_FU	18	9	901,98	4,6288023
88	32	LED TUBE GLASS 11418 T8 KIAN	A667_FU	20	10	830,1	4,693214359
51	32	TUBULAR T8 SMART 433959 BRILIA	A667_FU	20	10	832,1	4,705946303
69	32	SUPERLED TUBE GLASS T8 18W OUROLUX	A667_FU	20	10	834,1	4,718678246
85	32	ULTRALED TUBULAR T8 18W GOLDEN	A667_FU	18	9	941,85	4,859539839
42	31	TUBOLED T8 TL18P3AO OL	A664_FU	18	9	946,8	4,888186712
34	32	LED TUBULAR vidro 1655 T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	20	10	874,5	4,975863504
29	32	LED TUBULAR 1664 T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	20	10	874,7	4,977136698
54	31	TUBULAR T8 LED-0612/ 18W L&D	A664_FU	20	10	931,8	5,360826829
37	32	LED TUBULAR vidro 1655A T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	20	10	831,1	5,382312169
28	32	LED TUBULAR 1663 T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	20	10	939,3	5,411401981
9	32	LUMILUX T5 HO 54 W/865 OSRAM	A667_FU	10	5	474,35	5,474789506
36	32	LED TUBULAR vidro 1654A T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	20	10	844,5	5,483977325
42	30	TUBOLED T8 TL18P3AO OL	A663_FU	18	9	1045,62	5,487356665
44	9	TUBOLED T8 TL18P6AO OL	A314_FU	20	10	952,4	5,499739914
49	32	TUBULAR T8 SMART 433935 BRILIA	A667_FU	20	10	967,9	5,604261895
3	9	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A314_FU	16	8	732,48	5,614773594
33	32	LED TUBULAR vidro 1653 T8 120cm GALAXY LED	A667_FU	20	10	974,5	5,648768029
2	26	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	A60_FU	16	8	739,76	5,679747789
23	32	LED TUBULAR T8 20W ELGIN	A667_FU	20	10	874,5	5,71156551
2	54	LUMILUX T5 HE 28 W/830 OSRAM	E62_FU	16	8	763,92	5,895376439
29	31	LED TUBULAR 1664 T8 120cm GALAXY LED	A664_FU	20	10	1012	5,901643791
35	30	LED TUBULAR vidro 1653A T8 120cm GALAXY LED	A663_FU	20	10	923,4	6,087546938
60	32	TUBO T8 LED 40 TASCHIBRA	A667_FU	20	10	896,7	6,105458052
44	26	TUBOLED T8 TL18P6AO OL	A60_FU	20	10	1045,3	6,133862021
8	26	LUMILUX T5 HO 54 W/840 OSRAM	A60_FU	10	5	523,75	6,14959842
50	30	TUBULAR T8 SMART 434451 BRILIA	A663_FU	20	10	1048,4	6,156036038
20	32	CorePro LEDtube T8 18W/865 PHILIPS	A667_FU	20	10	1066,5	6,285503683
3	26	LUMILUX T5 HE 28 W/840 OSRAM	A60_FU	16	8	806,8	6,294970768
28	31	LED TUBULAR 1663 T8 120cm GALAXY LED	A664_FU	20	10	1076,6	6,35774806

Fonte: Autor.