

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ  
ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E  
SISTEMAS**

**ALEX SANDRO DE MORAES**

**METAHEURÍSTICA DE OTIMIZAÇÃO APLICADA À REDUÇÃO DA DEMANDA  
ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL**

**CURITIBA**

**2019**

**ALEX SANDRO DE MORAES**

**METAHEURÍSTICA DE OTIMIZAÇÃO APLICADA À REDUÇÃO DA DEMANDA  
ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL**

Proposta de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção e Sistemas na Área de concentração: Modelagem e Controle de Sistemas, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Zanetti Freire  
Coorientador: Prof. Dr. Luciano Mendes

**CURITIBA**

**2019**

Dados da Catalogação na Publicação  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná  
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR  
Biblioteca Central  
Luci Eduarda Wielganczuk – CRB 9/1118

M827m  
2019

Moraes, Alex Sandro de  
Metaheurística de otimização aplicada à redução da demanda energética de sistemas de iluminação artificial / Alex Sandro de Moraes ; orientador: Roberto Zanetti Freire ; coorientador: Luciano Mendes. – 2019.  
109 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2019  
Bibliografia: f. 74-79

1. Energia elétrica – Conservação. 2. Iluminação elétrica. 3. Otimização combinatória. 4. Programação heurística. I. Freire, Roberto Zanetti. II. Mendes, Luciano. III. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. IV. Título.

CDD 22. ed. – 621.31

## TERMO DE APROVAÇÃO

### Alex Sandro de Moraes

#### METAHEURÍSTICA DE OTIMIZAÇÃO APLICADA À REDUÇÃO DA DEMANDA ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL.

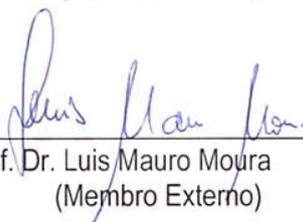
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



\_\_\_\_\_  
Presidente da Banca  
Prof. Dr. Roberto Zanetti Freire  
(Orientador)



\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luciano Antomo Mendes  
(Membro Interno)



\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luis Mauro Moura  
(Membro Externo)



\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Gustavo Valentim Loch  
(Membro Externo)

Curitiba, 07 de dezembro de 2018.

## RESUMO

Atualmente, nota-se um crescente incentivo por parte das entidades governamentais em relação ao uso consciente de energia elétrica. Levando-se em conta que as edificações, somente no Brasil, são responsáveis por mais de 40% da demanda energética do país, projetos de iluminação que desconsideram o uso da iluminação natural contribuem para este percentual. Uma das alternativas para reduzir a demanda do setor é o desenvolvimento de sistemas inteligentes, capazes de utilizar os recursos naturais disponíveis e, ainda, reduzir o consumo de energia. Devido ao constante desenvolvimento tecnológico, a diminuição dos preços dos aparelhos eletroeletrônicos e a grande quantidade de edificações projetadas desconsiderando o uso consciente de energia, o consumo aumentou drasticamente ao longo das últimas décadas. Levando-se em conta este cenário, ferramentas computacionais e estratégias capazes de reduzir a demanda energética do setor de edificações vêm sendo desenvolvidas. Esta dissertação tem por objetivo utilizar uma metaheurística bioinspirada associada a programas computacionais capazes de simular sistemas de iluminação natural e artificial de edificações, de modo a apresentar alternativas frente às estratégias de iluminação convencionais, reduzindo o consumo de energia e atendendo às especificações normativas de iluminação. Neste contexto, tomando-se como base uma predefinição dos padrões de uso, propõe-se neste trabalho uma forma de modelar o problema de iluminação artificial por meio da otimização de parâmetros. Apresenta-se ainda o desenvolvimento de um pequeno protótipo e um caso de simulação computacional baseada em um ambiente real, onde diferentes programas computacionais puderam ser utilizados. Por fim, uma versão modificada do algoritmo *Competition Over Resources* (COR) com melhorias no seu desempenho que foram avaliadas através de dois estágios: *i*) com sete funções teste *benchmark* clássicas; *ii*) com dados obtidos a partir de experimentos práticos que simulam um ambiente real. Os resultados mostram que aplicações deste tipo, envolvendo metaheurísticas bioinspiradas, são viáveis e dependem da dimensão do problema abordado e que, em alguns casos, uma implementação em hardware poderia solucionar o problema associado ao considerável esforço computacional.

**Palavras-chave:** Eficiência energética, otimização de metaheurística, simulação de edificações, sistemas de iluminação.

## ABSTRACT

Currently, there is a growing incentive by governmental entities regarding the conscious use of electric energy. Taking into account that buildings in Brazil are responsible for more than 40% of the country's energy demand, where a considerable amount of this number is caused by lighting projects without focus on the use of natural light. One of the alternatives to reduce the demand of the building sector is the development of intelligent systems, which are able to assume natural resources and to reduce energy consumption. Due to the constant technological development, the decrease in the prices of electronic devices and the large number of buildings designed without focus on the conscious use of energy, energy consumption had drastically increased over the last decades. Taking into account this scenario, computational tools and strategies capable of reducing the energy demand of building are being developed. This dissertation aims to use a bioinspired metaheuristic associated to computer programs capable of simulating natural and artificial lighting systems of buildings, in order to present alternatives to conventional lighting strategies, reducing energy consumption and meeting the normative specifications of lighting. In this context, based on a preset of the use patterns, this work presents an alternative approach for modeling the problem of artificial lighting through parameters optimization assuming natural lighting when available. It also presents the development of a small prototype and a case based on computer simulation of a real environment, where different computer programs were used and associated with the optimization technique. A modified version of the Competition Over Resources (COR) algorithm was proposed, where two performance enhancements were proposed and tested considering two performance evaluation criteria: *i)* with seven classic benchmark test functions; *ii)* with data obtained from practical experiments simulating a real environment. Results show that this type of applications involving bioinspired metaheuristics would be feasible, however, they depend on the dimension of the problem and sometimes hardware implementation could solve the problem associated with considerable computational effort.

**Keywords:** Energy efficiency, metaheuristic optimization, building simulation, lighting systems.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – ETIQUETA ATRIBUÍDA AS EDIFICAÇÕES AVALIADAS PELO PROGRAMA PROCEL EDIFICA.....	18
FIGURA 2 – DIVISÃO DE ZONAS DE CONTROLE DE ILUMINAÇÃO EM UM AMBIENTE COM MAIS DE 250M².....	22
FIGURA 3 – CIRCUITOS COM CONTROLE DE ACIONAMENTO PERTO DAS JANELAS.	22
FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO COR.....	31
FIGURA 5 – PROBLEMA DE ILUMINAÇÃO.....	39
FIGURA 6 – COMPONENTES DO SISTEMA E INTERFACE DO SOFTWARE DE MONITORAMENTO.....	40
FIGURA 7 – FLUXO DO SISTEMA: COMUNICAÇÃO DE HARDWARE E SOFTWARE .....	41
FIGURA 8 – DISPOSIÇÃO DE FONTE DE LUZ E FOTOSENSORES (TODAS AS DIMENSÕES EM MILÍMETROS.....	43
FIGURA 9 – CIRCUITOS LED E LDRS.....	43
FIGURA 10 –FOTOS QUE DESCREVEM AMBIENTE CONSIDERADO NESTE ESTUDO .	44
FIGURA 11 – DISPOSIÇÃO DAS LÂMPADAS DA SALA.....	45
FIGURA 12 – LUXÍMETRO.....	46
FIGURA 13 – MALHA DE PONTOS DE MEDIÇÃO.....	48
FIGURA 14 – MODELO EDIFICAÇÃO 3D.....	51
FIGURA 15 – SUPERFÍCIE COM VALORES EM LUX.....	52
FIGURA 16 – SUPERFÍCIE COM NOVOS VALORES EM LX DE ILUMINÂNCIA .....	53
FIGURA 17 – CONSUMO DE ENERGIA EM WH DO PERÍODO 20 JUNHO. ....	61
FIGURA 18 – CONSUMO DE ENERGIA EM WH DO PERÍODO 21 JUNHO.. ....	61
FIGURA 19 – CONSUMO DE ENERGIA EM WH DO PERÍODO 20 DEZEMBRO.....	62
FIGURA 20 – CONSUMO DE ENERGIA EM WH DO PERÍODO 21DEZEMBRO.....	62
FIGURA 21 – CONVERGENCIA MELHOR VALOR ÀS 09:00 HORAS.....	67
FIGURA 22 – CONVERGENCIA MELHOR VALOR ÀS 19:00 HORAS.....	68

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 1 – ÁREAS E ESPECIFICAÇÃO DA ILUMINÂNCIA. ....	12
TABELA 2 - LIMITE MÁXIMO ACEITÁVEL DE FLUXO DE ILUMINAÇÃO (DPIL) PARA O NÍVEL DE EFICIÊNCIA PRETENDIDO. ....	20
TABELA 3 – RELAÇÃO ENTRE PRÉ-REQUISITOS E NÍVEIS DE EFICIÊNCIA. ....	21
TABELA 4 – MÉTODO DAS ATIVIDADES DA EDIFICAÇÃO. ....	24
TABELA 5 – RELAÇÃO ENTRE ÁREAS DE AMBIENTES E ÁREAS DE CONTROLE INDEPENDENTES. ....	25
TABELA 6 – LEITURA LUX REFLETORES. ....	34
TABELA 7 – DEFINIÇÕES DE PROBLEMAS DE BENCHMARK. ....	35
TABELA 8 – RESULTADOS PARA AS FUNÇÕES DE BENCHMARK. ....	35
TABELA 9 – DIMENSÕES DO AMBIENTE. ....	44
TABELA 10 – LEITURA LUX REFLETORES COM LUXÍMETRO. ....	47
TABELA 11 – LUX POR REFLETOR LIGADO NO PONTO DE TRABALHO, SIMULAÇÃO COM DIALUX. ....	54
TABELA 12 – REGIME DE TESTE PREDEFINIDO (PADRÃO DE USO HIPOTÉTICO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO. ....	56
TABELA 13 – RESULTADO DA EXECUÇÃO DAS MODIFICAÇÕES DO ALGORITMO COR. ....	57
TABELA 14 – REGIME DE TESTE PREDEFINIDO (PADRÃO DE USO HIPOTÉTICO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO. ....	59
TABELA 15 – PERCENTUAL DE LUZ NATURAL EM CADA ESTAÇÃO TRABALHO CASO 20/06. ....	63
TABELA 16 – PERCENTUAL DE LUZ NATURAL EM CADA ESTAÇÃO TRABALHO CASO 21/06. ....	64
TABELA 17 – PERCENTUAL DE LUZ NATURAL EM CADA ESTAÇÃO TRABALHO CASO 20/12. ....	64

TABELA 18 – PERCENTUAL DE LUZ NATURAL EM CADA ESTAÇÃO TRABALHO CASO 21/12 .....	65
TABELA 19 – VALOR EM LX PARA CADA ESTAÇÃO, LUZ NATURAL COM ARTIFICIAL PERÍODO 20 JUNHO E 20 DEZEMBRO, MANTER MELHOR .....	65
TABELA 20 – VALOR EM LX PARA CADA ESTAÇÃO, LUZ NATURAL COM ARTIFICIAL PERÍODO 20 JUNHO E 20 DEZEMBRO, NÃO MANTER MELHOR.....	66
TABELA 21 – VALOR EM LX PARA CADA ESTAÇÃO, LUZ NATURAL COM ARTIFICIAL PERÍODO 21 JUNHO E 21 DEZEMBRO, MANTER MELHOR .....	66
TABELA 22 – VALOR EM LX PARA CADA ESTAÇÃO, LUZ NATURAL COM ARTIFICIAL PERÍODO 21 JUNHO E 21 DEZEMBRO, NÃO MANTER MELHOR.....	67
TABELA 23 – AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA COM OTIMIZAÇÃO NO DIA 20 JUNHO. ....	69
TABELA 24 – AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA COM OTIMIZAÇÃO NO DIA 21 JUNHO. ....	69
TABELA 25 – AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA COM OTIMIZAÇÃO NO DIA 20 DEZEMBRO. ....	70
TABELA 26 – AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA COM OTIMIZAÇÃO NO DIA 21 DEZEMBRO. ....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
CAD	Desenho auxiliado por computador, do inglês <i>Computer-Aided Design</i>
DA	<i>Daylight Autonomy</i>
DF	<i>Daylight Factor</i>
DPI	<i>Densidade de Potência de Iluminação</i>
EE	<i>Eficiência Energética</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
NBR	Norma Brasileira
NRCC	<i>National Research Council Canada</i>
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o. Nível de Eficiência Energética de Edificações. Comerciais, de Serviços e Públicas
UDI	<i>Daylight Illuminance</i>

# SUMÁRIO

RESUMO.....	III
ABSTRACT.....	IV
LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	V
LISTA DE TABELAS E QUADROS.....	VI
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	VIII
SUMÁRIO .....	IX
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	3
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	3
1.3 METODOLOGIA .....	3
1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO .....	4
<b>2. SISTEMA DE ILUMINAÇÃO .....</b>	<b>5</b>
2.1 HISTÓRIA DA ILUMINAÇÃO .....	6
2.2 DEFINIÇÕES E CONCEITOS .....	8
2.2.1 <i>Luz</i> .....	8
2.2.2 <i>Propagação de Calor em Sistemas de Iluminação</i> .....	8
2.2.3 <i>Medidas de Iluminação</i> .....	10
2.3 ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL.....	11
2.3.1 <i>Iluminação em Edifícios</i> .....	11
2.4 ILUMINAÇÃO NATURAL .....	12
2.4.1 <i>Iluminação Natural em Edificações</i> .....	13
2.4.2 <i>Eficiência Energética e a Relação com a Iluminação de Interiores</i> .....	14
2.4.3 <i>Métodos para Cálculo de Iluminação Natural</i> .....	15
2.5 EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO EM EDIFICAÇÕES.....	16
2.6 INFLUÊNCIAS DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NO PROCESSO DE CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES NO BRASIL.....	17
2.6.1 <i>Densidade de Potência de Iluminação (DPI)</i> .....	18

2.6.2 Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços públicos (RQT-C) .....	20
2.6.3 Divisão dos Circuitos .....	21
2.6.4 Contribuição da Luz Natural .....	22
2.6.5 Desligamento Automático do Sistema de Iluminação .....	23
2.6.6 Método das atividades do edifício .....	23
2.6.7 Método da Área do Edifício .....	25
2.6.8 Absortividade de calor e Refletividade .....	26
2.7 ARQUIVO CLIMÁTICO .....	27
2.8 NORMAS .....	28
<b>3. ALGORITMO EVOLUTIVO .....</b>	<b>29</b>
3.1 MÉTODO COMPETITION OVER RESOURCES (COR) .....	30
3.2 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO COMPETITION OVER RESOURCES.....	32
3.3 PROPOSTA DE MODIFICAÇÕES NO ALGORITMO.....	35
<b>4. EXPERIMENTOS .....</b>	<b>38</b>
4.1 CASO 1 – PROTÓTIPO EM ESCALA REDUZIDA .....	38
4.2 CASO 2 – ESCALA REAL .....	44
4.2.1 Coleta de Dados.....	45
4.2.2 Simulação de Sistema de Iluminação .....	47
4.2.2.1 SKetchUp.....	47
4.2.2.2 DAYSIM .....	49
4.2.2.3 Características do modelo .....	50
4.2.2.4 Variáveis de Simulação .....	51
4.2.2.5 DIALux .....	52
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>55</b>
5.1 CASO 1 – PROTÓTIPO EM ESCALA REDUZIDA .....	55
5.1.1. Parâmetros.....	55
5.1.2 Análise dos Resultados.....	56
5.2 CASO 2 – ESCALA REAL .....	58
5.2.1 Parâmetros.....	58
5.2.2 Análise dos Resultados.....	59
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>72</b>

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE 1.....</b>	<b>80</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o uso excessivo dos recursos naturais do planeta vem chamando a atenção de governos de diversos países. Buscam-se medidas e soluções para redução da demanda de elementos da natureza úteis ao homem, de modo a preservar o meio ambiente, através do consumo sustentável. Pesquisas nesta área estão sendo realizadas e programas para certificação energética de edificações já estão sendo aplicados, ou se encontram em desenvolvimento, com o objetivo em reduzir a demanda por energia elétrica. No Brasil, estudos estatísticos do governo brasileiro mostraram que a demanda de energia em 2050 aumentará, quando comparadas a 2014, em um fator de três (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015).

Na literatura especializada, muitos estudos têm sido propostos para reduzir o consumo de energia dos sistemas de iluminação de edifícios. Estes trabalhos são geralmente focados em: desenvolvimento de luzes artificiais e sensores de luminância (CRAWFORD, E PANDHARIPANDE, 2009; CAICEDO, 2015) sistemas baseados na ocupação (BOURGEOIS, REINHART, MACDONALD, 2016; SANTAMOURIS e LEE, 2015) e sistemas adaptativos que incluem mais de uma abordagem para obter uma decisão ótima em termos de conforto visual e eficiência energética (E.-N.D. MADIAS, P.A. KONTAXIS, TOPALIS, 2016; ZENG, J. QIU, X. SHEN, DAI, LIU, LE, 2011; e MÉNDEZ ECHENAGUCIA, CAPOZZOLI, CASCONI, SASSONE, 2015).

O uso da inteligência computacional, a qual busca através de técnicas inspiradas na natureza o desenvolvimento de sistemas inteligentes que imitem aptidões baseadas em sistemas biológicos, tais como: aprendizado, percepção, raciocínio, evolução e adaptação, para prever e corrigir os níveis de luminosidade, estimar o desperdício de energia e seu potencial de economia estão em evidência, principalmente no que diz respeito aos sistemas adaptativos. Um exemplo pode ser encontrado em (SAHIN, OGUZ, e BUYUKTUMTURK, 2016), onde redes neurais artificiais foram utilizadas para estimar a distribuição de luminância em espaços internos, e ainda para prever e corrigir a depreciação das lâmpadas ao longo do tempo.

Um sistema de controle de energia capaz de adaptar a saída de luz em um sistema de LEDs (*Light Emitting Diodes*) recebidos por sensores foi apresentado por

SOORI e VISHWAS (2013); neste caso, foi proposta uma estratégia de controle avançado para economia de energia de sistemas de iluminação com base em sensores de ocupação, cortinas de janela com atuadores de modulação motorizados, sensores de iluminância e *dimmers*. Já em (YIN *et al.*, 2015), foi proposto outro controlador avançado para um sistema de iluminação híbrido, onde um protótipo *hardware-in-the-loop* de uma planta de controle de iluminação cognitiva foi projetado e construído com base em controladores de ordem fracionária (FO).

Levando-se em consideração os trabalhos anteriormente citados, minimizar o consumo de energia e fornecer iluminação adequada podem ser definidos como problemas de otimização, com funções objetivo e restrições. Estas duas funções objetivo também podem ser associadas em um único problema de otimização da seguinte forma: encontrar um conjunto de níveis operacionais combinados provenientes das múltiplas fontes de luz, capazes de extrair a potência mínima requerida das fontes de luz para manter os níveis de iluminação necessários em diferentes pontos de iluminação, estes distribuídos no ambiente.

## 1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

No contexto global, o consumo de energia apresenta uma tendência crescente, devido ao rápido crescimento dos países em desenvolvimento. Conforme apontado por Frost e Sullivans (2010), China, Índia, Oriente Médio, América Latina e África já vêm contribuindo para o crescimento insustentável do consumo de energia, onde previsões indicam que, já em 2030, torna-se necessário reduzir drasticamente a demanda de energia, já que o aumento da matriz energética mundial, no panorama atual de conversão, iria causar um impacto ambiental negativo ainda maior no planeta.

Levando-se em conta que as edificações são responsáveis por mais de 40% da demanda energética do país, residencial 23,3 %, comercial 15,4 % e público 8,0 % e que os sistemas de iluminação são considerados um dos principais responsáveis por este número, juntamente com os sistemas de climatização e as características do próprio envoltório (LAMBERTS *et al.*, 2014). O consumo da iluminação é de 22 % nos edifícios comerciais, nos edifícios públicos a iluminação corresponde a 23 % do consumo, e as residências de 14 %. Reduzir a demanda de energia atribuída aos

sistemas de iluminação pode significar uma redução considerável da demanda energética no país.

## 1.2 OBJETIVOS

Neste tópico são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Aplicar um método metaheurístico de otimização na simulação de sistemas de iluminação artificial de edificações para gerar economia no uso de energia elétrica, mantendo condições mínimas de iluminação desejada.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Simular computacionalmente um sistema de iluminação;
- Modelar o problema de otimização considerando;
- Atender o menor consumo de energia possível;
- Atender as normas de iluminação adequadas para o ambiente em questão;
- Testar os métodos de otimização usando funções de teste estabelecidas na literatura de otimização contínua;
- Integrar o método de otimização ao problema de iluminação.

## 1.3 METODOLOGIA

Esta pesquisa tem natureza aplicada, pois avalia possibilidade da redução do consumo de energia de edificações através da utilização de um sistema alternativo de iluminação artificial. A abordagem do problema é quantitativa, devido à origem exata dos procedimentos e medidas consideradas.

Quanto aos objetivos, esta pesquisa é exploratória e explicativa, pois procura expor a análise de alguns exemplos encontrados em diversas fontes. Em relação aos procedimentos técnicos esta pesquisa baseia-se na revisão bibliográfica e análise experimental, já que o conteúdo exposto nessa dissertação foi concebido baseado

em diversos trabalhos previamente publicados e testes de experimentação sob condições de controle.

#### 1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O capítulo 1 desta dissertação apresentou uma breve introdução ao problema abordado neste trabalho e definiu os objetivos desta pesquisa. O capítulo 2 traz conceitos de iluminação iniciando por um histórico, definições de variáveis relevantes, iluminação artificial e natural e uma revisão bibliográfica contendo a evolução dos sistemas de iluminação e normas e padrões utilizados na especificação de sistemas de iluminação de ambientes. O capítulo ainda apresenta o contexto de eficiência energética de edificações e como os sistemas de iluminação influenciam na certificação de uma edificação no Brasil.

No capítulo 3 aborda-se o tema de algoritmos evolutivos bioinspirados com foco na técnica *Competition over Resources* (COR), a qual foi modificada neste trabalho com o objetivo de melhorar seu desempenho. Já o capítulo 4 descreve os experimentos (estudos de casos) de otimização de sistemas de iluminação. O primeiro caso é baseado em um protótipo em escala reduzida, de modo a testar o desempenho do algoritmo proposto. Já o segundo caso leva em consideração na análise um estudo de caso referente a um laboratório de ensino e pesquisa em escala real, simulado computacionalmente. Os resultados dos estudos de casos são apresentados no capítulo 5 deste trabalho. As modificações propostas no algoritmo COR e que foram apresentadas no capítulo 3 também são avaliadas e discutidas neste capítulo. Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho e sugestões para continuidade da pesquisa.

## 2. SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO

O objetivo da iluminação é a obtenção de boas condições associadas à visibilidade, segurança e orientação dentro de um determinado ambiente. Este objetivo está ligado às atividades laborativas e produtivas (escritórios, escolas, bibliotecas, bancos, indústrias, entre outras). Para as atividades produtivas, ou iluminação da razão, os objetivos dos diferentes sistemas de iluminação podem ser classificados em iluminação localizada, iluminação de tarefa, iluminação geral, e iluminação de emergência. A iluminação geral caracteriza-se pela distribuição aproximadamente regular das luminárias pelo teto. Esta, tem como principal vantagem uma grande flexibilidade na disposição interna do ambiente. Como desvantagem, pode-se citar alto consumo de energia, não atende as necessidades especiais de iluminância mais elevadas (ABNT NBR 5413991).

Já iluminação localizada é aquela onde as luminárias concentram-se em locais de interesse. As luminárias devem ser instaladas em altura suficiente para cobrir as superfícies adjacentes, possibilitando altos níveis de iluminância sobre o plano de trabalho, ao mesmo tempo em que asseguram uma iluminação geral suficiente para eliminar fortes contrastes. Este tipo de iluminação apresenta a desvantagem de necessitar mudança do local da luminária em caso de alteração de layout.

Uma outra classificação de iluminação é a iluminação de tarefa, a qual possui as luminárias próximas do plano de trabalho iluminando uma área bastante restrita. Esta possui vantagem na economia de energia e no controle dos efeitos luminotécnicos. Como desvantagem deve ser complementada por outro tipo de iluminação.

Por fim, a iluminação de emergência dispõe as luminárias em locais que permitem clarear áreas escuras de passagens, horizontais e verticais, incluindo áreas de trabalho e áreas técnicas de controle de restabelecimento de serviços essenciais, isso quando ocorre falha no sistema principal de iluminação. A intensidade da iluminação deve ser suficiente para evitar acidentes e garantir a evacuação das pessoas, levando em conta a possível penetração da fumaça nas áreas. Deve sinalizar as rotas de fuga utilizáveis no momento do abandono do local.

## 2.1 HISTÓRIA DA ILUMINAÇÃO

Antes do domínio do fogo pelo homem, este dependia totalmente da luz natural para poder realizar suas tarefas, uma vez que o homem depende muito da visão para executar a maioria das suas atividades. O primeiro artefato que o homem construiu para transportar o fogo foram as tochas, que aos poucos foram aperfeiçoadas por povos como os fenícios, babilônicos e egípcios, que construíram suas tochas com madeira resinada, cipó, espargidas de piches e resinas. Posteriormente, a gordura animal veio a ser o primeiro líquido utilizado com fins para iluminação de ambientes. Estas eram as primeiras velas construídas com fibras vegetais e gordura animal que ficavam armazenadas em recipientes construídos de pedra, chifres de animais ou conchas marinhas, conhecidas por lucernas (BONALI 2001).

Na Idade Média as velas eram consideradas artigos de luxo. Ainda produzidas de sebo animal, estavam acessíveis apenas a pessoas de poder aquisitivo. Na Inglaterra passou-se a produzir velas feitas também de cera de abelhas, está sendo preferida, pois a vela feita de sebo de animal deixava um cheiro ruim. Vários outros materiais menos prejudiciais ao meio ambiente começaram a ser utilizados. Em 1830 a vela começou a ganhar a composição atual. Com a exploração do petróleo, veio a parafina e a combinação com esterine, que permitiu às pessoas a iluminar seus lares com velas parecidas com as atuais. O mundo da iluminação não seria mais o mesmo depois da descoberta da lâmpada elétrica por Thomas Edison em 1879. A parafina sintética surgiu depois da 2ª Guerra Mundial. Ainda no século 19 aconteceu a descoberta da iluminação a gás.

A iluminação a gás pouco a pouco foi sendo substituída pela elétrica, que atualmente é a nossa principal fonte de luz artificial. Com a iluminação por energia elétrica, foram surgindo diversos tipos de luminárias que atendem as mais diversas finalidades. A lâmpada incandescente é um dispositivo que transforma energia elétrica em energia luminosa e energia térmica através do efeito Joule, produz luz pela elevação da temperatura do filamento de tungstênio. Suas vantagens o funcionamento imediato, custo baixo e a desnecessidade de aparelhos auxiliares. As desvantagens, vida útil curta em torno de 1.000 horas, eficiência luminosa baixa, elevada dissipação de calor e a possibilidade de ofuscamento. O americano Peter Cooper Hewitt patenteou a lâmpada de vapor de mercúrio, em 1901. Esta foi uma lâmpada de arco que usava vapor de mercúrio fechado em ampola de vidro. Em

1927, Friedrich Meyer, Hans Spanner, e Edmund Germer patentaram a lâmpada fluorescente, que funciona através da emissão de energia eletromagnética na forma de luz, diferente da lâmpada incandescente que emite calor na forma de luz. Geralmente tubulares, as lâmpadas fluorescentes funcionam com eletrodos em cada ponta, contendo vapor de mercúrio em baixa pressão, utiliza um reator que fornece alta voltagem para iniciar o funcionamento. Além disso, essas lâmpadas possuem uma boa eficiência luminosa, sua vida média é de até 9.000 horas e, com baixa luminância, reduz o ofuscamento.

Em 1958 surgiram as lâmpadas halógenas, que também funcionam com filamento constituído por tungstênio. O filamento fica posicionado dentro de um compartimento com um gás inerte e uma pequena quantidade de alógeno (bromo ou iodo) no interior do bulbo de quartzo, que suporta altas temperaturas. Esta lâmpada é mais eficiente que a incandescente, cerca de 30 % mais econômica, com uma vida útil de 2.000 horas. Necessitam de transformadores para uso na rede elétrica.

Alguns anos mais tarde em 1962 o primeiro diodo emissor de luz (LED) foi produzido pela General Electric. O LED é um diodo semiconductor que ao ser energizado emite luz visível com tonalidade branca em abundância. Possui vantagens com relação aos outros modelos de lâmpadas, tamanho reduzido, variedades de cores, alta resistência a choque e vibração, pequena dissipação de calor, durabilidade de 40.000 horas e um consumo baixo energia elétrica. Seu custo inicial é alto mais os benefícios compensam. (Lâmpada Led – Inmetro 2016).

Com as novas descobertas de fontes de luz, a luminotécnica estuda a qualidade destas fontes em ambientes internos, externos, estético e funcional, buscando bons resultados da qualidade de luz prevista, consumo e impacto estético fornecido pelo sistema de iluminação. O estudo busca uma melhor adequação na sua utilização, tanto para uma maior eficiência das fontes de luz e equipamentos no rendimento e melhoria do design das luminárias, quanto na descoberta de novas tecnologias na geração de luz. Por outro lado, se intensificam os estudos na área da sua aplicação para alcançar o ideal de sua performance técnica, na otimização e racionalização de energia.

## 2.2 DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Dentre os conceitos que envolvem a iluminação, algumas definições importantes utilizadas neste trabalho são descritas a seguir, como densidade de potência de iluminação (DPI), luz, propagação de calor em sistemas de iluminação e medidas de iluminação.

### 2.2.1 Luz

A luz é uma forma de energia radiante que atuando nos órgãos visuais, produz a sensação da visão. Quando visualiza-se um objeto, os olhos absorvem ondas eletromagnéticas da parte visível do espectro, que foram emitidos pelo Sol (ou luz artificial) e foram refletidos pelo objeto em direção aos olhos. Energia radiante é aquela que se propaga na forma de ondas eletromagnéticas, dentre as quais pode-se destacar as ondas de rádio, TV, micro-ondas, raios X, raios gama, radar, raios infravermelho, radiação ultravioleta e a luz visível (MICHAEL, 2003). Uma das características das ondas eletromagnéticas é a sua velocidade de propagação, que no vácuo tem o valor de aproximadamente 300 mil quilômetros por segundo, podendo ter este valor reduzido em meios diferentes como ar e água (DEP, 2018).

A óptica é uma área da física que estuda fenômenos associados à luz e seus mecanismos de propagação, abrangendo a radiação eletromagnética visível ou não. Ela explica os fenômenos de reflexão, refração e difração, a interação entre a luz e o meio, entre outros fenômenos, divide-se em óptica geométrica e óptica física, de acordo com a forma que a luz se comporta.

### 2.2.2 Propagação de Calor em Sistemas de Iluminação

Calor é a energia térmica em trânsito entre corpos que estão em temperaturas diferentes, de um lugar “quente” para um lugar “frio”. O calor passa de um corpo para o outro até que seja atingido o equilíbrio térmico. Para que ocorra troca de calor, é necessário que ele seja transferido de uma região a outra através do próprio corpo, ou de um corpo para outro (MARCELO R. DA BARROSA, 2004).

A condução térmica consiste na propagação de calor no interior de um corpo sólido, aquecido irregularmente ou entre corpos sólidos distintos em contato direto. Esta precisa de um meio material para ocorrer (MICHAEL, 2003). Os diversos tipos

de materiais apresentam condutividade térmica distintas, parâmetro este responsável por quantificar o poder de condução térmica de calor. Os materiais mais densos como o ferro, apresentam uma condutividade térmica maior, enquanto que os menos densos como a borracha, possuem condutibilidade térmica menor. Neste caso, pode-se considerar que os materiais menos densos apresentam menos moléculas para propagar o calor por toda a sua área.

A propagação de calor por irradiação possui a propriedade de emitir ondas eletromagnéticas ou radiação, neste tipo de transferência a energia não necessita de um meio material para se propagar, pois as ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo (MICHAEL, 2003).

Outro processo na transferência de calor é a convecção, que é a transferência de energia térmica de um lugar para outro pelo movimento de fluidos. A presença de movimento do fluido (líquido ou gás) acelera o processo de transferência de calor entre a superfície sólida e o fluido, é normalmente a forma dominante de transferência de calor em líquidos e gases, exatamente pela mobilidade destes.

Os sistemas de iluminação, com alguns tipos lâmpadas iluminam e acabam esquentando o ambiente. Para transformar a energia elétrica em energia luminosa, algumas lâmpadas com filamento ou resistência, permite que a energia não sofra uma alteração muito grande. A resistência absorve parte da energia elétrica, transformando-a em energia térmica. É essa energia térmica que faz a lâmpada esquentar e dissipar o calor no ambiente.

A lâmpada incandescente, quando transforma energia elétrica em forma de luz, pode ser considerada ineficiente, já que apenas 4% da energia é transformada em luz e os outros 96% dizem respeito a geração de calor. A lâmpada fluorescente é um pouco mais eficiente, ao transformar energia elétrica em forma de luz, apenas 20% da energia elétrica é transformada em luz, o restante é gerado calor. A lâmpada de LED é a que apresenta um melhor desempenho, utiliza 87% da energia elétrica para transformar em luz. (Perguntas e Respostas sobre Lâmpadas, 2018). Este trabalho envolve um estudo utilizando LEDs, justamente com foco em sua durabilidade acima das outras lâmpadas, baixa emissão de calor no ambiente, e na eficiência energética.

### 2.2.3 Medidas de Iluminação

Esta seção descreve medidas e termos utilizados em sistemas de iluminação (PROCEL, 2011).

São elas:

- Fluxo luminoso:

O fluxo luminoso é a quantidade de energia produzida por uma fonte luminosa por segundo medida conforme a sensação luminosa que produz no visível. Sua unidade de medida é o lúmen, que se define como o fluxo luminoso emitido por um foco puntiforme, com intensidade de uma candela, segundo um ângulo sólido de um esferorradiano Unidade (lm);

- Eficiência luminosa:

Toda fonte de luz ao emitir fluxo luminoso consome energia, expressa em Watts e a relação entre o número de lúmens irradiados pelos Watts consumidos exprime sua eficiência luminosa em lúmens por Watt (lm/W). Unidade (lm/W);

- Intensidade luminosa:

É a concentração de luz, ou uma porção do fluxo luminoso, numa direção específica, radiado por unidade de ângulo sólido. Sua unidade é a candela (cd);

- Iluminância:

É a quantidade de luz (fluxo luminoso) atingindo uma área de uma superfície por unidade de área ( $m^2$ ). Sua unidade é o lux (lx). Uma unidade lx equivale a um lúmen por metro quadrado ( $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm}^2$ ). Portanto, iluminância é a razão do fluxo luminoso incidente numa superfície pela área da mesma. Unidade (lx);

- Luminância:

De todas as grandezas até agora descritas, nenhuma é visível (os raios de luz não são visíveis), o que nos causa a sensação de claridade é chamada de luminância. Pode-se definir a luminância como sendo a quantidade da radiação emitida por uma superfície luminosa, vista de uma direção específica. Sua unidade é candela por metro quadrado ( $\text{cd}/m^2$ ).

## 2.3 ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

Os sistemas de iluminação artificial são compostos por luminárias, lâmpadas e equipamentos como transformadores e reatores. O conjunto luminária e lâmpada pode ser classificados em função da forma como o fluxo luminoso é irradiado, sendo de forma direta, semi-direta, uniforme, semi-indireta e indireta.

A forma direta pode ser caracterizada quando o sistema ótico direciona 90% a 100% de seu fluxo luminoso emitido para baixo. A distribuição pode variar de muito espalhada a altamente concentrada dependendo do material do refletor, acabamento e controle ótico empregado. Já a forma semi-direta pode ser definida quando o fluxo luminoso é emitido predominantemente para baixo (60% a 90%), mas uma pequena parte é direcionada para cima, iluminando o teto e a parte superior das paredes. A forma uniforme ou difusa possui uma distribuição mais uniforme do fluxo luminoso, onde as porções do fluxo luminoso ascendente e descendente se equivalem, medindo cada uma delas entre 40% e 60%, respectivamente. No caso da forma semi-indireta, esta é caracterizada pela distribuição luminosa inversa ao caso semi-direta, quando a maior parte do fluxo luminoso é direcionada para o teto, entre (60% a 90%), e o restante é direcionado para baixo. Por fim, a forma indireta do fluxo luminoso caracteriza-se como sendo predominantemente ascendente (90% a 100%), iluminando o teto e a parte superior das paredes.

### 2.3.1 Iluminação em Edifícios

Determinar a quantidade de luz necessária em uma edificação diz respeito a especificação da quantidade de luz necessária para o desempenho de tarefas visuais de forma rápida, segura e confortável. A quantidade de luz no espaço precisa ser considerada como o principal elemento do projeto. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da norma NBR 8995-1 (NBR 8995-1, 2013), dispõe valores de iluminação para diversos tipos de estabelecimentos e ambientes de acordo com as atividades que serão executadas no espaço. Alguns exemplos podem ser encontrados na Tabela 1.

<b>Ambiente</b>	<b>Iluminância (lx)</b>
Saguão de entrada	100
Sala de espera	200
Refeitório/Cantina	200
Cabeleireiro	500
Relojoaria	1500
Inspeção e reparo	750
Recepção	300
Escritório	500

Tabela 1 – Áreas e especificação da iluminância.

Fonte: NBR 8995-1 (2013).

Para avaliar se um conjunto de iluminação artificial está bem dimensionado para o ambiente e para as tarefas que ali serão executadas, precisa-se calcular o nível de iluminância  $E$ , descrita na equação 2.1, e confrontar com a tabela apresentada pela norma ABNT(NBR 8995-1, 2013).

$$E = (N * n * f * U * F_{pl}) / C * L \quad (2.1)$$

onde  $E$  a iluminância (lx),  $N$  representa quantidade de luminárias,  $n$  a quantidade de lâmpadas por luminária,  $f$  o fluxo luminoso da lâmpada (lm),  $U$  o fator de utilização e  $F_{pl}$  o fator de perdas luminosas,  $C$  o comprimento do ambiente (m) e  $L$  a largura do ambiente (m) (PROCEL, 2011).

## 2.4 ILUMINAÇÃO NATURAL

A luz natural influência na fisiologia humana, como controle do relógio biológico e o ritmo circadiano<sup>1</sup>.

Na fase inicial de um projeto de arquitetura, deve-se ter em conta as estratégias e benefício da aplicação da luz natural. No interior de um edifício, um bom emprego da luz natural pode melhorar a carga térmica evitando problemas de ofuscamento e contraste. Nas últimas décadas os projetos arquitetônicos têm priorizado a iluminação natural. A técnica se resume basicamente em utilizar a luz do Sol para iluminar os ambientes internos, aproveitando ao máximo as condições naturais na região onde a edificação está inserida. Para utilizar bem a luz natural nos ambientes do imóvel é necessário analisar a localização do terreno, se atentando à

<sup>1</sup>O ritmo circadiano regula todos os ritmos materiais bem como muitos dos ritmos psicológicos do corpo humano, com influência sobre a digestão, o estado de vigília e sono, a renovação das células e o controle da temperatura do organismo (ANA LAURA PARAGINSKI, 2014).

posição do Sol ao nascer e ao se pôr, aproveitando essa iluminação nos cômodos que vão necessitar de mais luz.

Um bom projeto de iluminação natural irá englobar aspectos relacionados à adequação de dimensionamento e forma das aberturas para melhor aproveitamento da luz, e irá fazer uso de sistemas de iluminação artificial complementares, para obter níveis adequados de iluminação para o desenvolvimento das tarefas visuais requeridas no ambiente.

O uso da iluminação natural em edificações é compreendido tanto como arte quanto ciência, sendo elemento estético de projeto quanto elemento técnico que exige dimensionamento e avaliação de desempenho. O uso da luz natural pode afetar o arranjo funcional do espaço, o conforto visual e térmico dos ocupantes, a estrutura do edifício, o uso de energia na edificação, o tipo e uso de iluminação elétrica e de sistemas de controle associados, sendo que o calor vindo da entrada direta de radiação solar deve ser contrabalançado com adequada ventilação natural dos ambientes. De fato, se a luz natural for considerada uma fonte viável de iluminação na edificação, seu uso pode ter ramificações em todos os aspectos do processo de projeto, do planejamento urbano ao projeto de interiores, da programação do projeto até sua especificação e construção. Um ambiente muito profundo necessitará sempre de complementação de luz à medida que se afasta das aberturas.

#### 2.4.1 Iluminação Natural em Edificações

Dentro do estudo da iluminação, destaca-se o uso da iluminação natural como fonte primária de iluminação, sendo usada desde os primórdios da arquitetura e a qual se deve dar atenção especial por suas características e potencial de aproveitamento, conforme descrito na seção anterior deste capítulo.

Chama-se natural a iluminação que se obtém com a luz proveniente do Sol e representada quer pelos raios solares diretos, quer pelos raios indiretos da mesma proveniência, mas retransmitidos pelo céu, pelas nuvens, pela vegetação, pelos edifícios ou por outros corpos (PRADO, 1961). A qualidade da luz natural como uma fonte iluminante é uma razão importante para seu uso em uma edificação. Sendo a combinação da luz do céu e da luz do Sol, a luz natural é uma das fontes de luz que

mais se adéqua à resposta visual humana e fornece um bom ambiente visual (ROBBINS, 1986).

A luz natural como elemento de projeto pode salientar aspectos estéticos e qualitativos de uma construção e deve ser parte integrante da filosofia do projeto. Como um sistema ambiental, ele se sujeita ao mesmo grau de análise rigorosa que qualquer sistema ambiental recebe e como tal seus atributos de desempenho devem ser descritos (incluindo iluminação, energia e economia), bem como suas características físicas e sua interação com outros sistemas ambientais (iluminação artificial, estrutura, aquecimento e refrigeração), geralmente de forma quantitativa (ROBBINS, 1986).

#### 2.4.2 Eficiência Energética e a Relação com a Iluminação de Interiores

Levando-se em conta o contexto nacional do consumo de energia de edificações dos setores comercial, de serviços e público, os sistemas de iluminação, juntamente com os sistemas de climatização e as envoltórias das edificações, são os elementos que tem maior impacto no consumo de energia de um edifício (PROCEL, 2010).

A eficiência energética em edifícios tem por objetivo economizar energia elétrica através do projeto de subsistemas associados as edificações energeticamente eficientes, além de promover níveis de saúde, conforto e produtividade adequados aos ocupantes. Em outras palavras, utilizar menos energia no uso diário do edifício.

A eficiência energética de edificações é um dos indicadores de desempenho dos edifícios e é um dos requisitos avaliados quando se aborda o tema de construções sustentáveis. Em diversos países do mundo, normas e critérios de projeto com o foco em redução do consumo de energia já estão sendo aplicados. Levando-se em conta que os edifícios são responsáveis por uma parcela significativa do consumo de energia no Brasil.

A luz natural nem sempre está disponível durante todo o período de trabalho, ou para utilização no desenvolvimento de tarefas visuais. Isso se deve ao fato de que nem sempre as condições de céu fornecem luminosidade suficiente e nem as condições arquitetônicas permitem. Em casos com luminosidade insuficiente para promover uma boa iluminação interna dos ambientes, como por exemplo em dias

nublados, chuvosos, atmosfera com alta concentração de poluentes, ou por estar presente em apenas parte do dia, não cobrindo os períodos noturnos e, em alguns casos, os primeiros horários da manhã e do fim de tarde, normalmente existe a necessidade de utilização da luz artificial. Existem ainda tarefas que exigem níveis de iluminação especiais e uniformes para seu desenvolvimento, por vezes não proporcionados apenas pela utilização de luz natural, também exigindo o uso de iluminação complementar (HOPKINSON, 1975).

O uso da luz natural pode trazer uma relevante contribuição para a diminuição do consumo de energia elétrica em edificações industriais, comerciais, institucionais e residenciais. Um melhor aproveitamento da luz natural pode reduzir sensivelmente o dimensionamento e sobrecarga do sistema de iluminação durante o período do dia. Em um sistema de iluminação corretamente projetado, que incorpore conservação de energia como critério de projeto, a luz elétrica seria desligada ou diminuída sempre que uma quantidade suficiente de luz natural estivesse presente para fornecer iluminação de tarefa ou de fundo (ROBBINS, 1986).

#### 2.4.3 Métodos para Cálculo de Iluminação Natural

A distribuição da iluminação natural interna pode ser obtida por meio de três metodologias distintas: métodos gráficos simplificados, simulações com modelos em escala reduzida e modelagem matemática através de simulações computacionais (PEREIRA, 1994-B).

Segundo Pereira (1994-B), os métodos gráficos são de fácil aplicação e permitem uma rápida análise do efeito relativo de diversos parâmetros de projeto. No entanto, permitem a análise de apenas um ponto de cada vez, dificultando a realização de estudos paramétricos, sendo ainda limitados por suposições teóricas inerentes à sua implementação. A modelagem matemática por computador como método de análise de projetos de iluminação é rápida e flexível, permitindo extensas avaliações paramétricas, podendo ser desenvolvida simultaneamente com avaliações térmicas e de consumo de energia. A modelagem, além de requerer equipamento computacional adequado, pode exigir ainda uma entrada extensiva de dados, sendo limitada por suposições teóricas assumidas em algoritmos de problemas complexos.

Os procedimentos experimentais com modelos em escala se mostram uma forma bastante efetiva para se fazer a determinação dos níveis de iluminação

internos, permitindo a investigação de sistemas de aberturas complexos. Suas desvantagens são a demanda de tempo, a limitação com relação a realização de estudos paramétricos e a necessidade de instrumentação fotométrica. Na sequência deste trabalho será apresentado um modelo em escala reduzida (seção 4.1) que foi utilizado como ponto de partida para análise da abordagem de otimização proposta nesta dissertação.

## 2.5 EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO EM EDIFICAÇÕES

No que diz respeito ao setor de edificações, a iluminação artificial se tornou um item importante, principalmente, em grandes estruturas construtivas. Sem ela não seria possível pavimentos com profundidade, onde a luz natural não consegue chegar no seu interior. A luz artificial permite utilizar os ambientes a noite, sem restringir as atividades. O projeto de um sistema de iluminação deve possibilitar a execução de atividade visual com precisão e segurança. Atualmente, tais projetos visam aumentar a eficiência energética e a qualidade do ambiente, integrando as fontes de luz artificial com a luz natural.

No uso racional da energia, um dos principais itens a ser considerado associado a edificações é a iluminação. Medidas simples como a troca de luminárias já podem proporcionar resultados significativo de melhoria quanto a qualidade visual e ao consumo de energia. Alguns edifícios adotam minuterias e sensores de presença. Os modelos básicos de minuterias são dois, as coletivas (para vários andares) e as individuais (para cada andar). Os sensores de presença proporcionam o acendimento automático das luzes quando ocorrer movimento no ambiente, desligando-se automaticamente quando o local for desocupado. Em geral, podem ser usados em corredores, escadarias e áreas comuns do edifício.

Outras formas de economia se aplicam em garagem e hall de entrada, onde concentra, na maioria das vezes, o maior gasto de energia elétrica do edifício. A substituição de lâmpadas incandescentes, halogênicas por fluorescentes ou diodos emissores de luz (LEDs), distribuição de vários disjuntores para acendimento parcial das luminárias. A pintura nas paredes com cores claras reduz a necessidade de muitas lâmpadas acesas.

## 2.6 INFLUÊNCIAS DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NO PROCESSO DE CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES NO BRASIL

No Brasil a aplicação do conceito de eficiência energética nas edificações surge com o Decreto Nº 34.979, de 23 de novembro de 1993 com o programa estadual de conservação de energia nas edificações, em 1996, foi feita uma tentativa de consolidar as informações referentes ao estado da arte de eficiência energética em edificações com o objetivo de definir ações do Procel (Procel Edifica) e criar referências para profissionais da área (Eletrobras; Procel, 2004). Em novembro de 2014 é estabelecido o selo Procel. O processo de etiquetagem de edificações, obtida através de avaliação dos requisitos contidos no Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) é um instrumento de adesão voluntária.

A etiquetagem de eficiência energética de edifícios deve ser realizada através do método prescritivo ou do método de simulação. O método prescritivo é baseado na análise de simulações de um número limitado de casos através de regressão. Em edificações onde o percentual de área de abertura na fachada total (PAFT) é elevado, os vidros possuem alto desempenho e/ou os elementos de sombreamento são diferenciados por orientação, recomenda-se utilizar o método de simulação ou ferramentas de simulação simplificadas Portaria 372(2010). O RTQ especifica a classificação do nível de eficiência de edificações, dividida nesses três sistemas individuais:

- Envoltória;
- Sistema de iluminação;
- Sistema de condicionamento de ar.

Todos os sistemas individuais têm níveis de eficiência que variam de A (mais eficiente) a E (menos eficiente).

A importância dos sistemas de iluminação, foco desta pesquisa, pode ser ilustrada na Figura 1, onde o sistema de iluminação de uma edificação é considerado como um dos três itens prioritários na certificação de eficiência energética.



utilizado quando o edifício possui no máximo três atividades principais, ou quando elas ocupam mais de 30% do edifício, enquanto o método das atividades classifica cada ambiente de forma individual (INMETRO, 2010).

A avaliação segue algumas etapas. A primeira é a identificação da atividade principal do edifício, depois a Densidade de Potência de Iluminação Limite (DPIL – em  $W/m^2$ ) para cada nível de eficiência.

A Densidade de Potência de Iluminação (DPI) é a razão entre o somatório da potência de lâmpadas e reatores, e a área de um ambiente (INMETRO, 2010).

A DPIL está relacionada ao nível de iluminância mínimo nos planos de trabalho de cada atividade, para que se utilize apenas a densidade necessária. Este estudo tem como principal função atividades de escritório, e a DPIL para cada nível de eficiência pode ser observada na Tabela 2.

A segunda etapa é determinar a área iluminada do edifício, que é o valor multiplicado pela densidade de potência de iluminação limite (DPIL), já definida para cada nível de eficiência, encontrando assim a potência limite do edifício. Em seguida comparar a potência instalada no edifício, que pode ser verificada através da soma das potências de cada ambiente analisado, com a potência limite para cada nível de eficiência, determinando assim o nível de eficiência para toda a edificação.

Analisar separadamente cada ambiente, verificando o atendimento do pré-requisito de potência para cada caso. Para os ambientes que não o atenderam, o equivalente numérico para cada nível de eficiência, fazendo com que se adequassem ao nível de eficiência desejada.

<b>Função do Edifício</b>	<b>DPILW/m<sup>2</sup> (Nível A)</b>	<b>DPIL W/m<sup>2</sup> (Nível B)</b>	<b>DPIL W/m<sup>2</sup> (Nível C)</b>	<b>DPIL W/m<sup>2</sup> (Nível D)</b>
Academia	9,5	10,9	12,4	13,8
Armazém	7,1	8,2	9,2	10,3
Biblioteca	12,7	14,6	16,5	18,4
Bombeiros	7,6	8,7	9,9	11
Centro de Convenções	11,6	13,3	15,1	16,8
Cinema	8,9	10,2	11,6	12,9
Comércio	15,1	17,4	19,6	21,9
Correios	9,4	10,8	12,2	13,6
Venda e locação de Veículos	8,8	10,1	11,4	12,8
Escola/Universidade	10,7	12,3	13,9	15,5
Escritório	9,7	11,2	12,6	14,1
Estádio de esportes	8,4	9,7	10,9	12,2
Garagem - Ed. Garagem	2,7	3,1	3,5	3,9
Ginásio	10,8	12,4	14	15,7

Tabela 2 - Limite máximo aceitável de fluxo de iluminação (DPIL) para o nível de eficiência pretendido.

Fonte: INMETRO (2010).

### 2.6.2 Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços públicos (RQT-C)

O RTQ especifica a classificação do nível de eficiência de edificações que são reunidos em uma equação geral de classificação do nível de eficiência da edificação. Este nível será condicionado ao atendimento dos pré-requisitos gerais e específicos. É possível também obter a classificação de apenas um sistema, deixando os demais em aberto. Neste caso, no entanto, não é fornecida uma classificação geral da edificação, mas apenas do(s) sistema(s) analisado(s) (RTQ-C, 2010).

A eficiência da iluminação é determinada calculando a densidade de potência instalada (DPI) do sistema de iluminação interno, de acordo com as diferentes atividades exercidas pelos usuários de cada ambiente. Quanto menor a potência utilizada, menor é a energia consumida e mais eficiente é o sistema, desde que garantidas as condições adequadas de iluminação. Para classificação do sistema de iluminação, além dos limites de potência instalada estabelecidos, deverão ser

respeitados os critérios de controle do sistema de iluminação, de acordo com o nível de eficiência pretendido.

Quanto mais elevado o nível de eficiência maior o número de pré-requisitos a atender. A Tabela 3 mostra quais pré-requisitos devem ser atendidos para cada nível de eficiência do RQT-C.

<b>Pré-requisitos</b>	<b>Nível A</b>	<b>Nível B</b>	<b>Nível C</b>
Divisão dos circuitos	Sim	Sim	Sim
Contribuição da luz natural	Sim	Sim	
Desligamento automático do sistema de iluminação	Sim		

Tabela 3 – Relação entre pré-requisitos e níveis de eficiência.

Fonte: RTQ-C (2010).

### 2.6.3 Divisão dos Circuitos

O item de divisão de circuitos define que cada ambiente deve possuir no mínimo um dispositivo de controle manual que permita o acionamento independente da iluminação interna do ambiente com facilidade, localizado de forma que permita a visão clara de todo ambiente. Este requisito permite que os usuários de cada ambiente controlem o seu uso, ajustando a iluminação às suas necessidades específicas. Para o caso de ambientes com área inferior a 250 m<sup>2</sup>, é permitido um controle para todo o ambiente. No caso de ambientes com grandes áreas, acima de 250 m<sup>2</sup>, o RTQ-C determina a divisão do sistema em parcelas menores, de no máximo 250 m<sup>2</sup>, cada uma com um controle independente, a fim de setorizar o sistema de acionamento quando houver poucos usuários no local, evitando grandes áreas iluminadas sem ocupação. Se o ambiente apresenta área maior que 1000 m<sup>2</sup> (por exemplo, um galpão), então o sistema de iluminação deve ser dividido em parcelas com áreas máximas de 250 m<sup>2</sup>.

A Figura 2 ilustra a divisão de circuitos de um sistema que ilumina 600 m<sup>2</sup> de área de piso. Ele foi dividido em três circuitos de controle, sendo que os dois laterais possuem a área máxima permitida, de 250 m<sup>2</sup>, e o circuito central possui 100 m<sup>2</sup>. Desta forma, o sistema completo não necessita permanecer ligado nos momentos em que há ocupantes somente na área central.

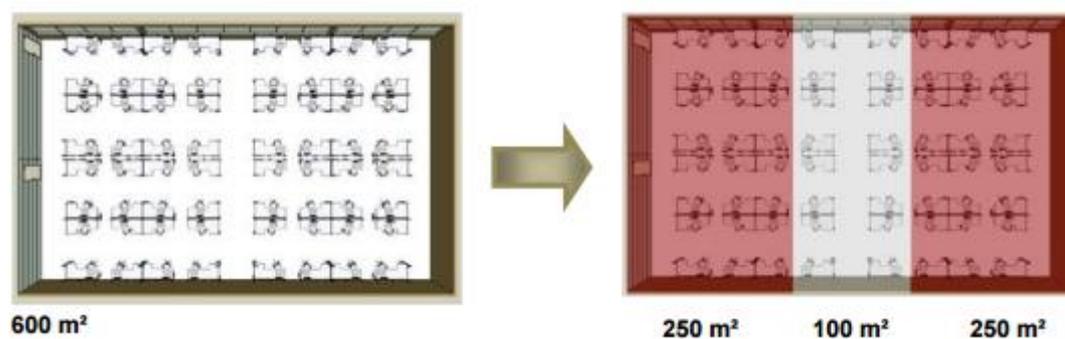


Figura 2 – Divisão de zonas de controle de iluminação em um ambiente com mais de 250m<sup>2</sup>.

Fonte: SILVA *et al.*(2014).

#### 2.6.4 Contribuição da Luz Natural

Para reduzir a necessidade de uso da iluminação artificial quando há luz natural suficiente para prover a iluminância adequada no plano de trabalho, o RTQ-C determina que as luminárias próximas às janelas devem possuir um dispositivo de desligamento independente do restante do sistema. A figura 3 ilustra esta aplicação, onde as luminárias não precisam estar alinhadas entre si, mas sim que o circuito seja alinhado às janelas. Desta forma, o posicionamento das luminárias é também um item importante a ser considerado no projeto luminotécnico.

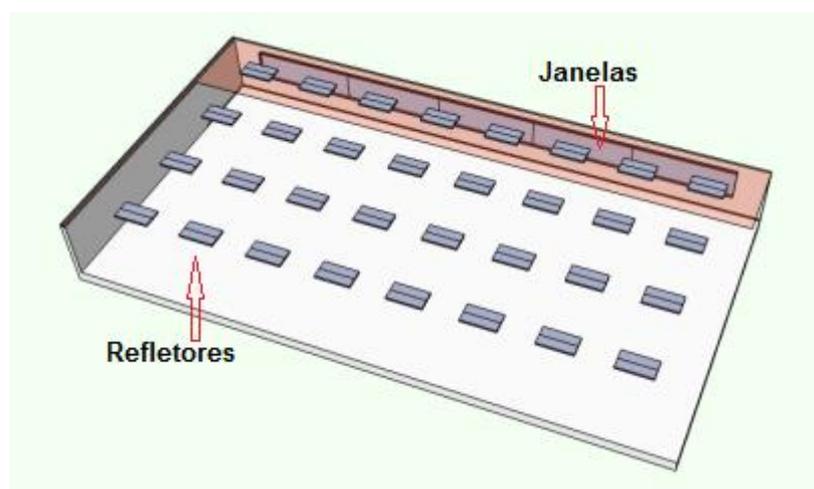


Figura 3 – Circuitos com controle de acionamento perto das janelas.

Fonte: SILVA *et al.*(2014).

### 2.6.5 Desligamento Automático do Sistema de Iluminação

Para evitar ambientes desocupados com iluminação artificial ativada, o RTQ-C determina a utilização de dispositivos que garantam o desligamento dos sistemas de iluminação quando ninguém se encontra presente. O RTQ-C estipula três métodos para garantir que ambientes não ocupados não continuem com o sistema de iluminação ligado. A aplicação de um destes métodos é obrigatória para ambientes com área superior a 250 m<sup>2</sup> para o nível A. O controle independente de acionamento do sistema de iluminação, visa permitir que os usuários possam controlar o uso da iluminação de acordo com a necessidade. Já o desligamento automático, visa melhorar o uso do sistema de iluminação na ausência de usuários.

Caso o ambiente possua área inferior a 250 m<sup>2</sup> e não possua sistema com desligamento automático, considera-se que o pré-requisito foi atendido. Durante este capítulo explicasse como determinar a eficiência do sistema de iluminação segundo o RTQ-C em diversos tipos de ambientes mostrando exemplos de aplicação.

### 2.6.6 Método das atividades do edifício

O método das atividades da edificação avalia através de limites de densidade de potência em iluminação para cada ambiente considerando as atividades desempenhadas no edifício. Os ambientes são avaliados separadamente tanto para obter o nível de eficiência energética quanto para analisar o atendimento dos pré-requisitos. Identificar adequadamente as atividades encontradas no edifício, de acordo com a Tabela 4, da seguinte forma:

- Consultar a densidade de potência de iluminação limite (DPIL – W/m<sup>2</sup>) para cada nível de eficiência para cada uma das atividades (Tabela 4);
- Multiplicar a área iluminada de cada atividade pela DPIL, para encontrar a potência limite para cada atividade. A potência limite para o edifício será a soma das potências limites das atividades;
- Calcular a potência instalada no edifício e comparar com a potência limite do edifício, identificando o EqNum do sistema de iluminação;
- Se existirem ambientes que não atendam aos pré-requisitos, o EqNum deverá ser corrigido através da ponderação entre os níveis de eficiência e potência

instalada dos ambientes que não atenderam aos pré-requisitos e a potência instalada e o nível de eficiência encontrado para o sistema de iluminação.

Ambientes/Atividades	Limite do Ambiente		DPIL NÍVEL A(W/m <sup>2</sup> )	DPIL NÍVEL B(W/m <sup>2</sup> )	DPIL NÍVEL C(W/m <sup>2</sup> )	DPIL NÍVEL D(W/m <sup>2</sup> )
	Índice ambiente	Relação cavidade do quarto				
Armazém, Atacado:						
Material pequeno/leve	0,8	6	10,20	12,24	14,28	16,32
Material médio/volumoso	1,20	4	5,00	6,00	7,00	8,00
Átrio - por metro de altura:						
até 12,20 m de altura		–	0,30 <sup>1</sup>	0,36 <sup>2</sup>	0,42 <sup>2</sup>	0,48 <sup>2</sup>
acima de 12,20 m de altura		–	0,20 <sup>2</sup>	0,24 <sup>2</sup>	0,28 <sup>2</sup>	0,32 <sup>2</sup>
Auditório e Anfiteatro:						
Auditório	0,80	6	8,50	10,20	11,90	13,60
Centro de Convenções	1,20	4	8,80	10,56	12,32	14,08
Cinema	1,20	4	5,00	6,00	7,00	8,00
Teatro	0,60	8	26,20	31,44	36,68	41,92
Banco/Escritório - Área de atividades bancárias						
	0,8	6	14,9	17,88	20,86	23,84
Banheiros						
	0,6	8	5	6	7	8
Biblioteca:						
Área de arquivamento	1,20	4	7,80	9,36	10,92	12,48
Área de leitura	1,20	4	10,00	12,00	14,00	16,00
Área de estantes	1,20	4	18,40	22,08	25,76	29,44
Casa de máquinas						
	0,8	6	6	7,2	8,4	9,6
Centro de Convenções - Espaço de exposições						
	1,2	6	15,6	18,72	21,84	24,96
Circulação						
	< 2,4m Largura		7,1	8,52	9,94	11,36
Comércio:						
Área de vendas	0,8	6	18,10	21,72	25,35	28,96
Pátio de área comercial	1,20	4	11,80	14,16	16,52	18,88
Provador	1,20	8	10,20	12,24	14,28	16,32
Cozinha						
	0,8	6	10,7	12,84	14,98	17,12
Depósitos						
	0,8	6	5	6	7	8
Dormitório - Alojamentos						
	0,6	8	4,1	4,92	5,74	6,56
Escadas						
	0,6	10	7,4	8,88	10,36	11,84
Escritório						
	0,6	8	11,9	14,28	16,66	19,04
Escritório - Planta Livre						
	1,20	4	10,50	12,60	14,70	16,80

Tabela 4 – Método das atividades da edificação.

Fonte: SILVA *et al.*(2014).

Após o resultado é preciso conferir os pré-requisitos para cada ambiente e fazer a ponderação entre a potência instalada e o nível de eficiência dos ambientes. Para manter o nível A, é necessário que os ambientes atendam aos pré-requisitos de Divisão de Circuitos, Contribuição da Luz Natural e Desligamento Automático, este último apenas nos ambientes maiores de 250m<sup>2</sup>.

### 2.6.7 Método da Área do Edifício

O método da área do edifício apresentado na Tabela 4 determina limites de densidade de potência em iluminação para edificações como um todo. Os limites determinados pelo regulamento já consideram a existência de ambientes com funções secundárias, como copas, circulações, escadas e depósitos, desta forma utiliza-se apenas os valores das atividades principais da edificação. Edifícios que possuem mais de três atividades principais devem ser avaliados pelo método das atividades. Através do método da área Tabela 5, o edifício é avaliado como um todo, no entanto para o atendimento dos pré-requisitos os ambientes são avaliados separadamente.

Para a avaliação deve-se seguir as etapas abaixo:

- Identificar a atividade principal do edifício, e a densidade de potência de iluminação limite (DPIL, definida em W/m<sup>2</sup>) para cada nível de eficiência;

<b>Área total de piso do ambiente</b>	<b>Área máxima de piso da parcela iluminada por sistema com um controle independente</b>
≤ 1000 m <sup>2</sup>	250 m <sup>2</sup>
> 1000 m <sup>2</sup>	1000 m <sup>2</sup>

Tabela 5 – Relação entre áreas de ambientes e áreas de controle independentes.

Fonte: SILVA *et al.* (2014).

- Determinar a área iluminada do edifício;
- Multiplicar a área iluminada pela DPIL, para encontrar a potência limite do edifício;
- Quando o edifício for caracterizado por até três atividades principais determina-se a densidade de potência de iluminação limite (DPIL) para cada atividade e a área iluminada para cada uma. A potência limite para

o edifício será a soma das potências limites para cada atividade do edifício;

- Comparar a potência total instalada no edifício e a potência limite para determinar o nível de eficiência do sistema de iluminação;
- Após determinar o nível de eficiência alcançado pelo edifício deve-se verificar o atendimento dos pré-requisitos em todos os ambientes;
- Se existirem ambientes que não atendam aos pré-requisitos, o equivalente numérico (EqNum) deverá ser corrigido através da ponderação entre os níveis de eficiência e potência instalada dos ambientes que não atenderam aos pré-requisitos e a potência instalada e o nível de eficiência encontrado para o sistema de iluminação.

#### 2.6.8 Absortividade de calor e Refletividade

Outros fatores importantes que podem influenciar a qualidade da iluminação no interior de ambientes são a absortividade e a refletividade. As propriedades e características dos materiais e componentes construtivos da edificação, quando expostos à radiação solar, podem ser classificados em opacos ou transparentes. Os materiais transparentes são aqueles que permitem a transmissão direta da radiação solar, janelas, claraboias, fachadas de vidros, enquanto os materiais opacos não transmitem radiação solar para o ambiente na forma de luz, mas na forma de calor, (ADRIANA *et al.*, 2003).

A absortância à radiação solar é definida como o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície. A refletância à radiação solar é definida como o quociente da taxa de radiação solar refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície (ABNT, 1998a).

A região chamada visível do espectro solar compreende uma faixa espectral bem definida, aquela para a qual o olho humano é sensível, causando a sensação de visão e cores. As cores são criadas pela mistura dos vários comprimentos de onda do espectro eletromagnético.

O infravermelho próximo, invisível ao olho humano, interfere nas condições internas do ambiente através do calor e corresponde a mais da metade do espectro solar, sendo, portanto, de extrema importância sua consideração (CARAM, 1998).

A relação dos materiais transparentes, pode-se citar o trabalho de Caram (1998), e os materiais opacos, o de Oiticica *et al.* (2000), onde foi medida a refletância de cores em superfícies construtivas de acabamentos variados, adotando-se a cor branca como 85% de reflexão e medindo-se a refletância de outras cores, sempre em relação à cor branca. O experimento realizado com várias cores de tintas em pinturas externas em uma superfície real buscam os valores de refletância a radiação de onda curta (ultravioleta, visível e infravermelha) (Adriana *et al.* 2003).

A refletância das pastilhas na região do ultravioleta é bastante baixa em todas as amostras, compreendendo um intervalo de 4 a 8 %, há uma uniformidade na refletância de todas as cores ensaiadas. Na região do visível, a cor branca apresentou a maior refletância (88 %) e a cor preta a menor (4 %).

As outras cores, as mais claras refletem mais a luz, enquanto cores mais escuras absorvem mais. No infravermelho, observa-se que algumas cores que refletem mais no visível não necessariamente têm maior refletância.

Os dados mostram que cores consideradas escuras, por sua baixa refletância no visível, podem apresentar um bom desempenho térmico em relação ao ganho de calor solar, devido à alta refletância no infravermelho. Adriana *et al.* (2003).

## 2.7 ARQUIVOS CLIMÁTICOS

As condições climáticas influenciam praticamente todas as atividades humanas. Na agricultura, pode-se avaliar a aptidão de um cultivo, a necessidade de irrigação e a melhor época de semeadura, conhecendo-se o clima da região. O clima também afeta a formação e as espécies dos diferentes ecossistemas do Brasil. Para que proporcione conforto e sejam energeticamente eficientes, as edificações devem ser projetadas e construídas em função das características climáticas específicas de cada região.

Para descrever os valores anuais de luz natural disponível no interior de um edifício, é necessário saber os valores de radiação solar e números de horas de Sol ao longo do ano na localidade. Este tipo de informação é fornecido em arquivos climáticos que contêm dados meteorológicos considerados típicos de dada localidade, considerado, portanto, o ano de referência, o TRY (*Test Reference Year*). Nestes arquivos são fornecidos o perfil anual típico do clima da localidade em dados horários, tais como temperatura, direção e velocidade do vento, tipo do céu, radiação

direta e difusa (REINHART, 2010). O DAYSIM (2016) importa dois tipos de formato de arquivos climáticos que contém o TRY, os arquivos em formatos EPW (*EnergyPlus Weather Data*) e WEA (*Ecotect Weather Format*), e extrai as informações necessárias para a simulação (REINHART, 2010). Neste trabalho, foi utilizado o arquivo climático da cidade de Curitiba disponibilizado no site do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina, o qual fornece gratuitamente dados climáticos de diversas localidades brasileiras em formato “epw”.

Neste estudo foi utilizado um arquivo com extensão epw, que contém informações climáticas de uma determinada região do país. O arquivo é composto por informações do município de estudo, como dados de ano, mês, dia, hora, temperatura, luminância horizontal difusa, visibilidade, temperatura, entre outras.

## 2.8 NORMAS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o órgão que tem a responsabilidade de definir a normalização técnica em nosso país, a agência é reguladora de normas de iluminância de interiores, e disponibiliza as normas NBR ISO 8995-1 e NBR 5461. A NBR ISO 8995-1 especifica os requisitos de iluminação para locais de trabalho internos e requisitos para que as pessoas desempenhem tarefas visuais de maneira eficiente, com conforto e segurança durante todo o período de trabalho ABNT 8995-1 (2013). A nova norma substitui a ABNT NBR 5413 de 1992 (iluminância de interiores), e a ABNT NBR 5382 de 1985 (Iluminação de ambientes de trabalho), que havia sido inicialmente publicada em 1977.

Esta norma não especifica como os sistemas ou técnicas de iluminação de iluminação devem ser projetados a fim de aperfeiçoar as soluções para locais de trabalho. A NBR ISO 5461 define termos relacionados com radiações, grandezas, unidades, visão, reprodução das cores, colorimetria, emissão, propriedades ópticas dos materiais, medições radiométricas, fotométricas, colorimétricas, detectores físicos, efeitos actínicos da radiação óptica, fontes de luz, componentes de lâmpadas e dispositivos auxiliares, luminotécnica, iluminação diurna, luminárias e seus componentes, sinalização visual e suas aplicações (ABNT NBR 5461, 1991).

### 3. ALGORITMOS EVOLUTIVOS

Os algoritmos evolutivos são métodos computacionais baseados em indivíduos ou populações que evoluem baseados em um conjunto inicial de candidatos aleatoriamente definidos para formar uma solução final adequada a uma determinada classe de problemas considerados de alta complexidade para solução através de um método direto de otimização. Uma população de indivíduos sofre algumas transformações e durante as iterações do algoritmo os indivíduos competem pela sobrevivência. O termo algoritmo metaheurístico é usado para representar uma classe de algoritmos heurísticos (SIMON, 2013), que pode ser modelado com problemas de maximização ou minimização, do qual os algoritmos evolutivos fazem parte em conjunto com outros algoritmos inspirados na natureza ou bioinspirado (YANG, 2008). Os algoritmos evolutivos são empregados principalmente para resolver tarefas de otimização, em vários campos do conhecimento.

Algoritmos de otimização podem ser aplicados a problemas em diversas áreas da engenharia e indústria, como engenharia mecânica, engenharia civil, indústria aeroespacial e engenharia elétrica, para encontrar a solução com melhor resultado ao problema. Os algoritmos de otimização, podem ser classificados de acordo às suas características e estruturas de dados utilizadas para serem aplicados em um determinado problema, como codificar um indivíduo, operadores genéticos empregados, métodos para criar a população inicial e métodos para selecionar indivíduos para a geração seguinte.

A programação linear é uma área da otimização em que a função objetivo e as restrições lineares. Quando se trata de problemas de otimização não-linear, existem algoritmos efetivos que podem resolver o problema com reduzido tempo computacional se a função objetivo e as funções de restrição forem convexas. Com relação a problemas gerais de otimização não-linear, técnicas clássicas conhecidas e bem desenvolvidas têm como objetivo encontrar uma solução, com base em derivadas e estimativas iniciais dadas pelo usuário (BOYD; VANDENBERGHE, 2004).

Os algoritmos de busca global podem ser considerados na solução de problemas de otimização especialmente quando as funções envolvidas no procedimento de otimização não são convexas ou diferenciáveis. Entre eles, podem ser citadas técnicas evolutivas e técnicas populacionais.

Os algoritmos metaheurísticos mais recentes são inspirados na natureza. Eles são adequados para otimização global, e são uma das técnicas mais utilizadas para otimização (YANG, 2011). Exemplos de tais técnicas são os algoritmos genéticos (AG), busca tabu (TS), recozimento simulado (SA), colônia de formigas (ACO), evolução Diferencial (DE), otimização por enxame de partículas (PSO), colônia artificial de abelhas (ABC), busca cuco (CS), algoritmo do vaga-lume (FA), algoritmo de morcego (BA), concorrência sobre recursos (COR), algoritmo de rebanho de *krill* (KHA), entre outros.

Uma das aplicações de metaheurísticas associadas ao projeto de edificações está na fase de concepção dos sistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar (HVAC, do inglês *heating, ventilation, and air conditioning*), bem como em sistemas de iluminação (SHAN, 2014), para definir a geometria do edifício, a fim de otimizar a iluminação natural e minimizar o consumo de energia, conforme apresentado por Hamdy (2016).

A próxima seção deste trabalho trata da técnica de otimização adotada neste trabalho, a *Competition Over Resources* (COR).

### 3.1 COMPETITION OVER RESOURCES (COR)

O algoritmo bioinspirado COR foi inicialmente proposto por Mohseini *et al.* (2014). Este algoritmo imita o contexto de grupos de animais que competem para encontrar recursos naturais, o que na representação metafórica é atribuído aos valores da função do objetivo apresentados pelos indivíduos. Os conteúdos genéticos são transmitidos pelo melhor indivíduo em cada geração a seus descendentes, que são candidatos a assumir a posição de “líder” de acordo com a qualidade do alimento que encontram, isso em comparação com o indivíduo já classificado como o melhor. O algoritmo COR é detalhado no fluxograma apresentado na Figura 4 e seu pseudocódigo é apresentado na Figura 5.

O número de grupos é mantido constante com um mecanismo que elimina os grupos com pior desempenho, aqueles que não encontram alimentos acabam passando fome. Além disso, o segundo melhor indivíduo do melhor grupo para ser o cabeça de um novo grupo (Mohseini, 2014).

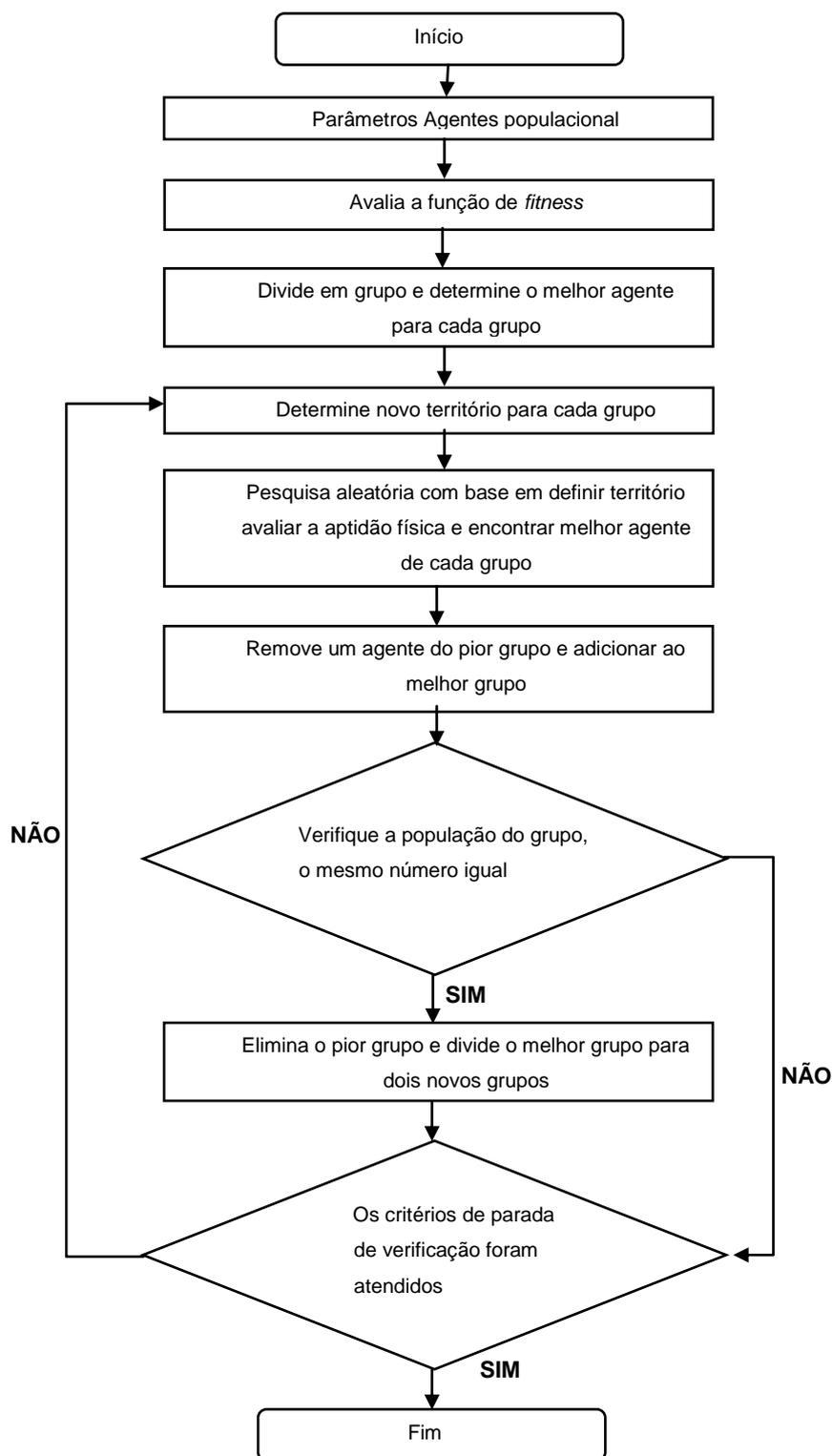


Figura 4 – Fluxograma do algoritmo COR.

Fonte: MOHSENI *et al.* (2014).

As áreas de busca de grupos são atualizadas a cada geração através de medidas das distâncias. Uma primeira parte dos indivíduos de um grupo poderá explorar o espaço entre seu genitor (cabeça de grupo) e o chefe do grupo de vizinhos

mais próximos, executando a exploração local que pode levar à melhoria da melhor solução trazida por esse grupo. Por outro lado, uma segunda parte dos indivíduos tem permissão para explorar além das fronteiras do grupo. Porém, a distância alcançável é limitada a uma porcentagem de espaço de busca sobre a posição de cabeças.

A exploração balanceada é desejável em um algoritmo de otimização e pode ser sintonizada no algoritmo COR por meio de seus parâmetros:  $nPop$  é o tamanho da população,  $NGrp$  é o número de grupos,  $D_{rate}$  define a taxa de mortalidade de grupos (grupos/geração),  $P_{search}$  é proporção de indivíduos internos para externos nos grupos ( $p_{search} > 1$ ) e  $d_{search}$  é a faixa de busca tal que  $0 < d_{search} < 1$ .

**Algoritmo:** *Competition Over Resources (COR)*.

Inicializa toda a população  $nPop$  com agentes com aptidão de avaliação para seleciona  $NGrp$  melhor agente.

**While** ( $t < \text{max number of iterations}$ )

    Calcular a distância euclidiana entre os cabeças dos grupos

**For** ( $i=1 : 1: n\_group$ )

        Pesquisa em cada território de grupo individualmente;

    Classifique os agentes em cada grupo;

        Mantenha o Grupo melhor.

**End for**

    Remova alguns agentes do pior grupo;

    Adicione agentes à melhor população do grupo.

**If** ( $\text{group\_population} < 2$ )

            Eliminar o pior grupo;

            Divida o melhor grupo em duas partes.

**End if**

**EndWhile**

Quadro 1 – Pseudocódigo do *Competition Over Resources (COR)*.

Fonte: MOHSENI *et al.* (2014).

### 3.2 AVALIAÇÃO DESEMPENHO COMPETITION OVER RESOURCES

Para avaliar o desempenho do algoritmo COR, foram testados sete problemas baseados em funções matemáticas. A escolha destas funções tomou como referência o artigo original do algoritmo (Mohseini, 2014), deste modo as

modificações podem ser comparadas com o desempenho do algoritmo original. As funções problema utilizadas foram descritas na sequência deste documento.

1) Função Esfera: a chamada primeira função de De Jong é contínua, convexa e uni-modal.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (3.1)$$

2) A função *Michalewicz* é uma função de teste multimodal. Isto tem  $n!$  ótimos locais e o parâmetro  $m!$  define a “inclinação” dos valores ou bordas.

$$f(x) = - \sum_{i=1}^n \sin(x_i) \left[ \sin\left(\frac{ix_i^2}{\pi}\right) \right]^{2m} \quad (3.2)$$

3) A função *Rastrigin* é baseada na função De Jong com adição de modulação de cosseno. Assim, a função de teste é altamente multimodal.

$$f(x) = 10n + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - \cos(2\pi x_i)] \quad (3.3)$$

4) *Hyper-elipsoide* paralelo do eixo: também conhecido como ponderado de Jong é semelhante à função De Jong.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (i \cdot x_i^2) \quad (3.4)$$

5) *Rosenbrock* é um problema clássico de otimização. Também conhecida como segunda função de De Jong.

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + 1 - x_i^2] \quad (3.5)$$

6) A função de *Griewangk* é semelhante à função de *rastrigin*.

$$f(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1 \quad (3.6)$$

O desempenho do algoritmo COR considerando as modificações II, III-p e III-d foram testados e avaliados contra a sua forma original, utilizando o teste de Wilcoxon (Wilcoxon, 1945), com amostras pareadas. O nível de significância foi ajustado para 0,05 e o  $p - value$  observado. Um experimento fatorial completo com os parâmetros selecionados e seus níveis atribuídos foram realizados, com 25 execuções em cada condição, produzindo amostras de melhores valores de aptidão até 1000 iterações. Estas amostras foram usadas nos testes de hipótese estatística, onde resultando o  $p - value$  menor do que o nível de significância, que indica o desempenho do algoritmo modificado ultrapassa sua forma original. As combinações dos parâmetros foram tiradas da Tabela 6.

A melhor combinação encontrada para um conjunto de funções de referência está listada na Tabela 7. Na Tabela 8, a coluna Melhor\* indica o respectivo mínimo global, que não foi considerado no algoritmo para comparação. Os resultados apresentados na Tabela 8, o COR modificado é capaz de alcançar soluções mais próximas do ótimo global do que sua versão original, exceto para o problema *Sphere*, no qual os  $p - values$  obtidos são superiores a 5%. A principal razão para a melhoria do desempenho verificada pode ser atribuída à modificação II.

Parâmetros	Valores	Detalhes
nPop, nGrp, $p\_search$ , $d\_search$ , D rate, F (modificaçãoII) Usar $P\_search\_feedback$ Usar $d\_search\_feedback$	100, 10, 1.1, 0.6, 2  F ∈ [0; 1.5] Sim (T), Não (F) Sim (T), Não (F)	Manter-se constante 0 significa não usado 1.0 ≤ p search ≤ 1.3 0,48 ≤ d search ≤ 0,72

Tabela 6 – Leitura lux refletores.

Problemas de Benchmark	Dimensão	Espaço de Pesquisa [Xd,MIN,Xd,MAX]	Ótimo Global
Michalewicz	5	[0, 3]	-1801
HyperEllipsoid	20	[-5, 5]	0
Griewangk	30	[-600, 600]	0
Rastrigin	128	[-5, 5]	0
Rosenbrock	5	[-2, 2]	0
Sphere (De Jong function)	128	[-50, 50]	0
Zakharov	20	[-10, 10]	0

Tabela 7 – Definições de problemas de *benchmark*.

Função	II(F)	III-d	III-p	Melhor tempo de execução	Melhor Interação	Melhor	Média	p-value
Michalewicz	0.5500	F	F	2.02	151	-4.687658	-4.6876580	6.15E-06
	0.5500	T	T	2.08	163	-4.687658	-4.6876580	6.15E-06
	0.0000	F	F	2.14	578	-4.645895	-4.2575440	-
HyperEllipsoid	0.0100	F	F	2.15	1000	7.808701E-20	7.375565E-17	6.95E-06
	0.0055	T	T	2.15	1000	1.918767E-20	1.306365E-16	6.95E-06
	0.0000	F	F	2.06	1000	9.887445E-19	2.957758E-13	-
Griewangk	0.0550	F	F	2.33	820	3.330669E-16	5.613857E-03	3.42E-03
	0.0550	T	T	2.41	770	2.220446E-16	7.379577E-03	6.09E-02
	0.0000	F	F	2.26	806	1.110223E-16	1.102994E-02	-
Rastrigin	0.5500	F	F	3.53	997	7.421818E+01	1.056109E+02	6.15E-06
	0.5500	T	T	3.55	980	9.592335E+01	1.198712E+02	6.15E-06
	0.0000	F	F	3.45	1000	5.740891E+02	6.727085E+02	-
Rosenbrock	0.0055	F	F	2.04	1000	1.656065E-02	1.873754E-01	2.88E-05
	0.0055	T	T	2.04	1000	3.141973E-02	2.206498E-01	2.57E-05
	0.0000	F	F	2.03	1000	6.986036E-03	7.416495E-01	-
Sphere	0.0000	T	T	3.17	1000	1.596562E-05	3.856309E-05	7.89E-02
	1.5000	T	T	3.21	1000	2.518703E-05	4.308459E-05	3.99E-01
	0.0000	F	F	3.26	1000	1.963382E-05	4.579611E-05	-
Zakharov	0.5500	T	F	2.38	1000	1.735503E-62	3.637859E-58	6.15E-06
	0.5500	T	T	2.39	1000	6.915988E-62	6.847881E-57	1.81E-05
	0.0000	F	F	2.33	1000	7.449955E-60	6.877383E-46	-

Tabela 8 – Resultados para as funções de *benchmark*.

### 3.3 PROPOSTA DE MODIFICAÇÕES NO ALGORITMO

Para este trabalho uma versão modificada do algoritmo *Competition Over Resources* (COR) foi proposta para melhorar o desempenho do algoritmo original. Para verificar a eficiência das modificações na técnica original, foram apresentadas

comparações usando funções de referência. A modificação proposta sobre o problema de iluminação seguiu em três etapas.

**Modificação I:** a primeira modificação visa melhorar a forma como os valores fora dos limites são tratados. Em seu original, o algoritmo COR usa um recurso de saturação para mover valores fora dos limites, que eventualmente são gerados por meio de operações aleatórias, de volta para a divisão espacial da pesquisa na (s) dimensão(ões) afetada(s). Dessa forma, modificamos a rotina de geração de valores aleatórios para realizar uma nova tentativa a cada vez que essa situação é detectada, até que os valores dentro da faixa sejam produzidos. Em qualquer dimensão, as chances de produzir valores entre seus limites superior e inferior, dentro de um intervalo ditado pelo parâmetro  $d\_search$ , sendo estas de 50% ou mais. Essa probabilidade é alta o suficiente para garantir que apenas uma quantia inexpressiva de (re)cálculos seja acrescentada, um preço baixo para um provável aumento da utilidade dos indivíduos gerados.

**Modificação II:** a segunda modificação de melhoria é uma estratégia para superar o baixo desempenho do COR na resolução da função não convexa função *Rastrigin* (com 128 dimensões). Com base nos resultados apresentados em MOHSENI et al. (2014), o algoritmo COR, ao tentar resolver este problema, fica estagnado em um mínimo local, distante do mínimo global no espaço de busca de  $[-5, 5]$ , cuja valor ótimo é zero. Esse comportamento é agravado pela alta dimensionalidade do problema que lhe confere uma forte característica multi-modal. Uma vez preso em um mínimo local, as tentativas de uma pesquisa aleatória para uma posição vizinha com um melhor valor de aptidão em todas as dimensões, ao mesmo tempo, são menos efetivas do que tentar mover uma de cada vez.

Ao rodar todas as dimensões do problema ao longo das gerações (iterações), uma saída pode ser progressivamente construída sobre o melhor indivíduo atual e a busca então pode se tornar mais efetiva novamente. Neste caso, o algoritmo pode avançar na busca do mínimo global. A inclusão de um indivíduo extra em cada grupo aumenta o número de avaliações da função. A regra de algoritmo descrita pode ser escrita como:

- Calcular o índice  $d$  da dimensão a ser variado no melhor  $X$  individual da atual geração;

- Use a dimensão  $d\_search$  de busca  $(Xd, MAX - Xd, MIN)$ , e atualize o  $X_d$  como na Equação 2.2.

$$Xd = Xd \pm dsearch. (Xd, MAX - Xd, MIN) .rnd (0,1).F \quad (3.7)$$

**Modificação III:** a terceira modificação foi implementada inserindo *feedbacks* nos parâmetros  $p\_search$  e  $d\_search$ , ambos governados por uma medida de diversidade populacional pelo modelo descrito RIGET *et al.*(2002). A ideia é melhorar o caráter exploratório do algoritmo quando a população está mudando de forma indesejável, o que retarda a convergência ou trava a busca em um mínimo local. Nesse sentido, a derivada da variação da diversidade populacional em várias gerações recentes é usada para impulsionar variações lentas em  $p\_search$  e  $d\_search$  para compensar a tendência em curso, limitada a  $\pm 1\%$  do valor atual por geração e limitado pelos limites superior e inferior em torno dos valores dos parâmetros originalmente definidos. A compensação foi projetada para ser bidirecional, de modo a evitar a heterogeneidade excessiva da população, pois isso poderia resultar em menor eficiência de exploração.

Para o *feedback* do  $p\_search$ (modificação III-p), pode ser escrito como:

- Calcular a razão  $r$  entre o último valor de diversidade populacional e aquele obtido a partir da 30ª iteração precedente;
- Usando  $\varepsilon = 0.01$ , para atualizar o  $p\_search$  como:

$$\begin{aligned} psearch &= psearch. \min \{r. (1 + \varepsilon. \text{sgn}(r - 1)), r\} \\ psearch &= psearch. \max \{r. (1 - \varepsilon. \text{sgn}(r - 1)), r\} \\ psearch &= \max \{psearch, psearch, \min\} \\ psearch &= \min \{psearch, psearch, \max\} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Para o *feedback* do  $d\_search$ (modificação III-d), atualize  $d\_search$  com:

$$\begin{aligned} dsearch &= dsearch. \min \{r - 1. (1 + \varepsilon. \text{sgn}(r - 1 - 1)), r - 1\} \\ dsearch &= dsearch. \max \{r - 1. (1 - \varepsilon. \text{sgn}(r - 1 - 1)), r - 1\} \\ dsearch &= \max \{dsearch, dsearch, \min\} \\ dsearch &= \min \{dsearch, dsearch, \max\} \end{aligned} \quad (3.9)$$

## 4. EXPERIMENTOS

Este capítulo descreve os experimentos realizados para validar a abordagem de otimização proposta nesta dissertação. Neste caso, considera-se primeiramente um protótipo em escala reduzida, depois um estudo por simulação computacional de uma sala, esta utilizada para atividades acadêmicas em geral na Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR).

### 4.1 CASO 1 – PROTÓTIPO EM ESCALA REDUZIDA

Em um ambiente iluminado por  $N$  fontes e com  $M$  alvos de interesse arbitrariamente localizados (ver Figura 5), os circuitos elétricos individuais alimentam as fontes de luz. A distribuição da iluminação pode ser medida por fotossensores localizados em alvos distintos (que representam locais de trabalho). Esses fotossensores podem detectar indistintamente as influências das fontes de luz (mesmo a iluminação natural) e podem fornecer informações sobre a iluminação adicional necessária para um computador. Neste caso, o nível operacional a ser comandado a cada circuito de fonte de luz artificial pode ser tratado como a solução de um problema de otimização, onde o objetivo principal é fornecer iluminação predefinida necessária (ou superior), minimizando o consumo de energia de todo o sistema de iluminação artificial.

A matriz de influências  $Q_{ijk}$  demonstra a contribuição da fonte de luz  $i$  operando no nível  $j$  ao fluxo luminoso no alvo  $k$ . O fluxo luminoso total no alvo considerado  $k$  será, portanto:

$$L_k = \sum_{j=1}^N Q_{ijk} + Xl_k \quad (4.0)$$

Onde  $Xl_k$  significa a iluminação externa incidente (seja natural ou de qualquer outra) no alvo. Se um ambiente iluminado for muito forte, então o  $Xl_k$  é zero para todos os alvos. A avaliação de  $L_k$  exigirá a interpolação das influências  $Q_{ijk}$ , valores adquiridos experimentalmente para níveis finitos. O nível de operação em cada fonte está relacionado com a energia elétrica  $W_i = f(i, j)$  através de uma relação não-linear, consequente da lei de decaimento da intensidade inversa do quadrado e da

natureza construtiva do sistema de acionamento de energia do dispositivo de iluminação. Desta forma, a fonte total de iluminação pode ser descrita por

$$T = \sum_{i=1}^N W_i \quad (4.1)$$

O problema de minimização pode ser escrito como

$$F_{obj} = \min_{L_k \geq L_{k,MIN}} (T + P) \quad (4.2)$$

e a desigualdade restrita é modelada através de uma função de penalidade, onde  $\alpha$  é um fator de escala constante.

$$P = \alpha \sum_{K=1}^M \max\{(L_k - L_{k,MIN}), 0\} \quad (4.3)$$

Onde  $L_{k,MIN}$  é o fluxo luminoso mínimo requerido em cada alvo.

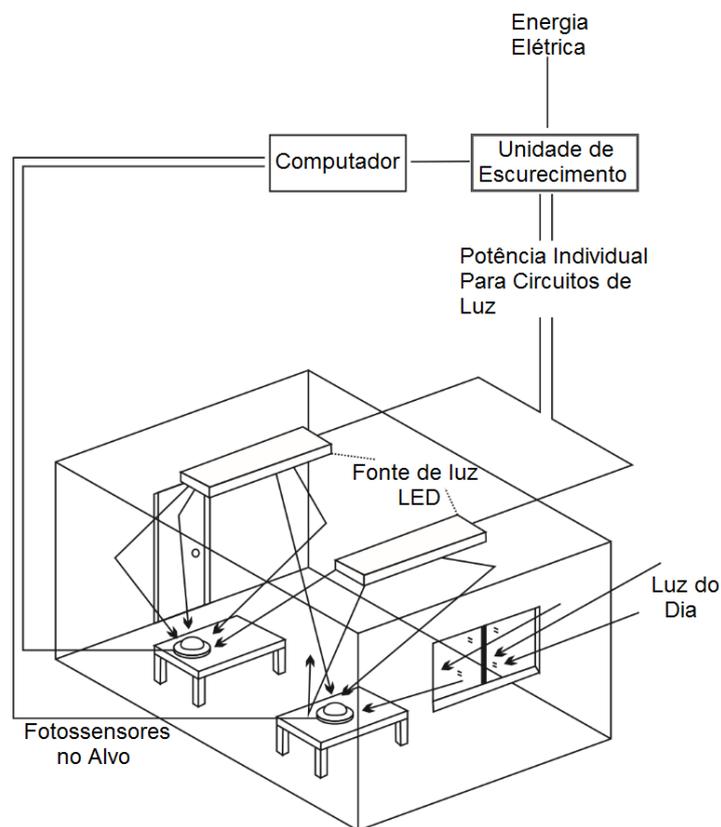


Figura 5 – Problema de iluminação.

Fonte: MENDES *et al.*(2017).

A pesquisa foi focada em técnica de convergência rápida e esforço de computação baixa, pois o problema é a otimização em tempo real de sistemas de iluminação de edifícios.

Em aplicações em tempo real de sistemas de iluminação, onde os métodos de otimização metaheurística são adotados, um algoritmo de convergência rápida deve ser usado para encontrar a solução da demanda de iluminação à medida que os ocupantes se movem de um lugar para outro. Nesse cenário, a convergência rápida implica em uma taxa de atualização mais rápida, que está diretamente relacionada à eficiência energética do sistema de iluminação. Em uma condição tão exigente, um algoritmo rápido é preferível, como Competição sobre Recurso (COR), Algoritmo Genético (GA), Otimização de enxame de Partícula (PSO). O exemplo do sistema de pequena dimensão e os componentes são mostrados na Figura 6, onde a interface do software de monitoramento também é ilustrada.



Figura 6– Componentes do sistema e interface do software de monitoramento.

Fonte: Autor.

O protótipo do ambiente de teste em escala reduzida, permite a coleta de dados reais e comparações com resultados de um modelo baseado em valores realistas, como a influência de fontes em alvos e os respectivos perfis de uso de energia. A integração de uma camada de automação de teste com o sistema físico permite a análise de monitoramento completo da experiência de hardware.

Um aparelho de pequena escala foi configurado usando fontes de luz LED *off-the-shelf*, com o nível de operação de fontes de luz impulsionadas por circuitos de modulação de largura de pulso (PWM) e LDR (resistência dependente da luz), este último utilizado na detecção de iluminação. Os sinais PWM e os DC que carregam a informação de iluminação detectada são emitidos / inseridos através de um

dispositivo Microchip *CHIP KIT Max32*, (chipKIT Max32 2011), que está conectado a um computador que executa um aplicativo LabVIEW (LabVIEW, 2016), conforme ilustrado na Figura 7. Este aplicativo foi criado para automatizar toda a aquisição de dados e gerenciamento de testes experimentais associados.



Figura 7 – Fluxograma do sistema: comunicação de *hardware e software*.

Fonte: Autor.

As funcionalidades de aplicativos do sistema de teste relacionadas com a coleta de dados ao modelo de problema de alimentação são: reunir as influências usadas em  $Q$ , calibrar os sinais dos LDR para obter uma relação de resistência real (Ohms) versus fluxo de iluminância (lx), e capturar a potência exigida por cada circuito de fonte de luz de acordo com o nível de operação. Esta informação é armazenada em arquivos locais como conjuntos de dados e carregada na memória para execuções experimentais do algoritmo de otimização de iluminação. Os dados de comportamento do sistema são capturados com números finitos de amostras ao longo de intervalos selecionados, então a interpolação linear foi usada para valores intermediários.

As funcionalidades dos testes incluem: inserir a iluminação mínima necessária em alvos para teste único ou ao longo de rotinas operacionais definidas em um cronograma e fazer cálculos de execução, tais como a integração contínua do uso de energia nos circuitos de fontes de luz e avaliação da eficiência.

O sistema físico foi posicionado em uma caixa retangular de plástico preto, acessível pela parte superior e coberta com uma tampa bege clara perfurada. No presente caso, uma cobertura plana externa com o lado inferior em preto foi usada para restringir a análise experimental considerando somente as fontes de luz artificiais do experimento, sem influência externa. Cinco fontes de luz brancas LED de 6 mm foram fixadas a 10 mm do lado interno da tampa com fita de prata, e três células fotocondutoras CdS (sulfeto de cádmio), ou fotossensores LDR (*Light Dependent Resistors*), foram posicionados cerca de 23 mm acima do fundo da caixa.

Os LDRs têm o vetor normal aproximadamente na vertical, pois são suportados por fios rígidos conectados aos terminais de uma placa pequena e branca de 30 x 40 x 10 mm. As dimensões aproximadas são exibidas na Figura 8. O sistema é alimentado através de uma interface padrão USB 2.0.

Os esquemas para fontes de luz de nível variável e sensor de fluxo de luminância são mostrados na Figura 8. A tensão medida no emissor de transistor bipolar permite o cálculo da corrente e potência do circuito. Os componentes do sistema são mostrados na Figura 9, onde a interface do software de monitoramento também é ilustrada. As posições LDRs (círculos na Figura 8) foram arbitrariamente definidas, representando pontos de interesse onde a iluminação predefinida deve ser alcançada. As fontes de luz (estrelas na Figura 8) foram intencionalmente posicionadas de tal forma que podem afetar significativamente a luminância em todos os alvos. Além disso, a placa quase branca na parte inferior da caixa permite uma reflectância adicional, aumentando a desigualdade na distribuição da luz. As superfícies restantes ficaram em preto.

As reflectâncias das superfícies brancas, cinzas e pretas no sistema experimental são estimadas em 75%, 30% e 4%, respectivamente, MENDES *et al.*(2017). Estes são apenas valores referenciais, utilizados aqui para uma descrição melhorada do sistema, já que as influências resultantes totais das fontes em alvos foram capturadas experimentalmente.

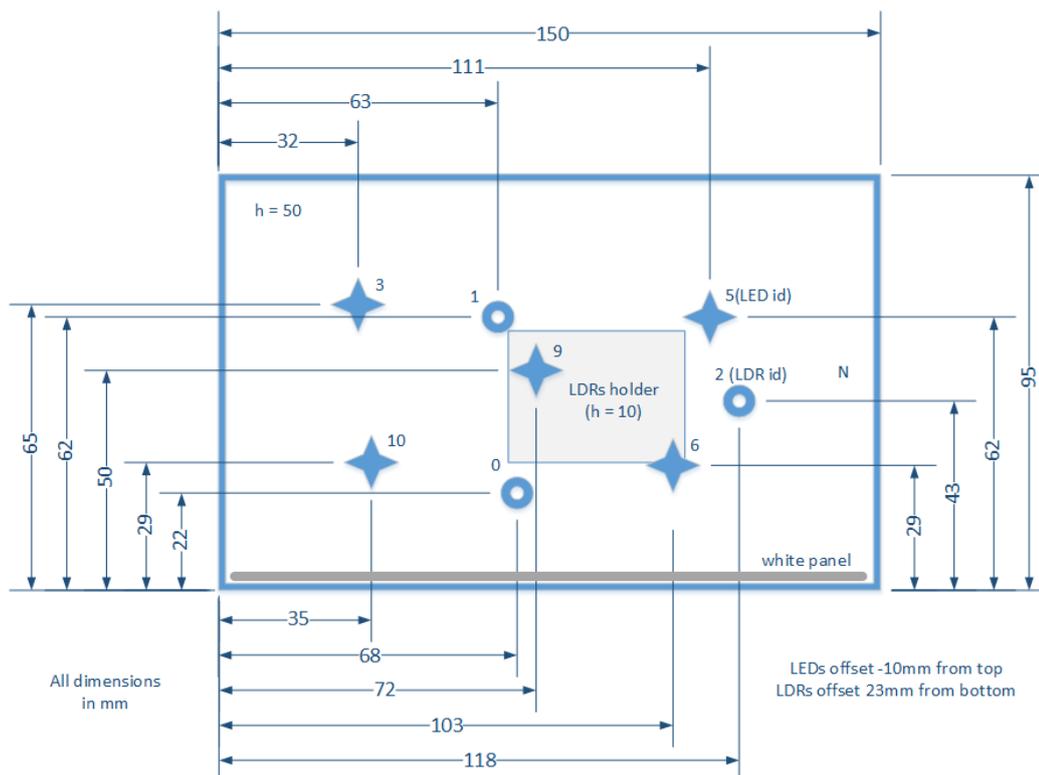


Figura 8 – Dispositivo de fontes de luz e fotosensores (todas as dimensões em milímetros).

Fonte: Autor.

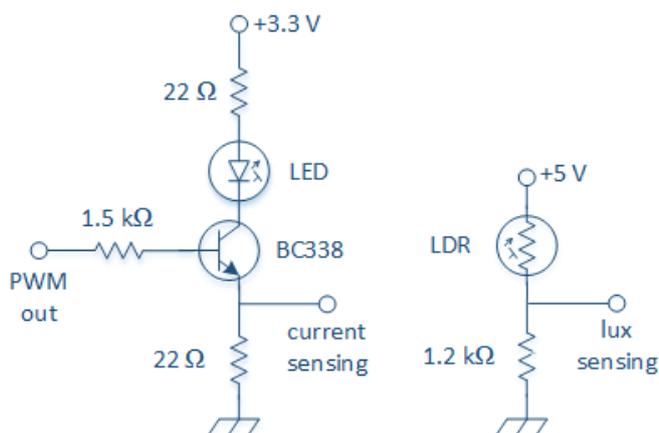


Figura 9 – Circuitos LED e LDRs.

Fonte: Autor.

## 4.2 CASO 2 – ESCALA REAL

O laboratório de pesquisa avaliado, mostrada na Figura 10, é um modelo convencional, utilizada para atividades de escritório e estudo em geral.



Figura 10 – Fotos que descrevem o ambiente considerado neste estudo.

Fonte: Autor.

As características do ambiente como medidas, móveis e matérias da estrutura da sala podem ser identificados na Figura 10 e na Tabela 9.

<b>Especificação</b>	<b>Dimensão (m)</b>
Comprimento	9,84
Largura	4,84
Pé direito	4,57
Altura da luminária em relação ao solo	3,47
Altura da luminária em relação ao <i>workstation</i>	2,47

Tabela 9 – Dimensões do ambiente.

Fonte: Autor.

A sala é composta por três paredes com revestimento de tijolos de cerâmica marrom claro e por uma parede lisa branca. A janela está posicionada à 1,43 metros do chão e cobrindo quase toda a extensão de uma das paredes, teto de cor cinza e mesas de madeira creme fosco. A sala é constituída por um conjunto de oito

luminárias distribuídas de acordo com a Figura 11, cada qual contendo duas lâmpadas.

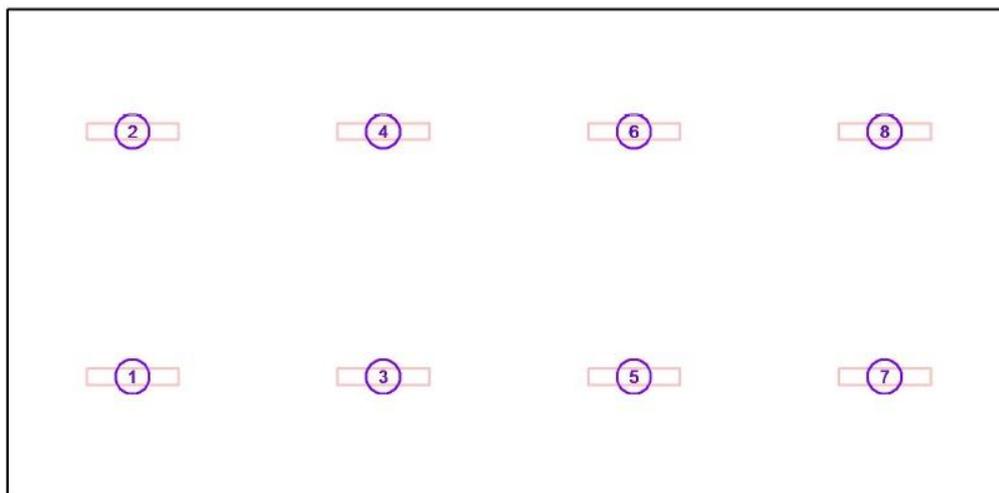


Figura 11– Disposição das lâmpadas da sala.

Fonte: Autor.

#### 4.2.1 Coleta de Dados

A coleta de dados no ambiente ocorreu no período do dia. Para a coleta dos dados da iluminação utilizou-se um luxímetro, modelo LX1330B, fabricante Drmeter, como apresentado na Figura 12, que mede a intensidade da luz. Este equipamento é constituído por um mini amperímetro ligado a uma célula fotoelétrica.



Figura 12 – Luxímetro.

Fonte: Autor.

A leitura ocorreu em algumas etapas, na primeira foi mensurada a quantidade de luz (em lux) que chegava em cada ponto logo abaixo do refletor, neste todos os refletores estavam ligados em potência máxima e a cortina fechada impedindo a entrada de luz natural em quase 100 %. A segunda etapa a coleta ocorreu individualmente, apenas um refletor por vez era ligado, coletando em cada ponto a influência, a leitura ocorreu abaixo de cada refletor. Na tabela 10 os resultados dos dados obtidos.

		Valores lx			Valores lx
<b>Todos Ligados</b>	Refletor 1	413,00	<b>Individualmente</b>	Refletor 1	229,00
	Refletor 2	387,00		Refletor 2	254,00
	Refletor 3	450,00		Refletor 3	233,00
	Refletor 4	437,00		Refletor 4	208,00
	Refletor 5	396,00		Refletor 5	234,00
	Refletor 6	401,00		Refletor 6	239,00
	Refletor 7	379,00		Refletor 7	229,00
	Refletor 8	370,00		Refletor 8	209,00

Tabela 10 – Leitura lux refletores com luxímetro.

Fonte: Autor.

#### 4.2.2 Simulação de Sistema de Iluminação

Para simular o sistema de iluminação e o ambiente citado na seção anterior, necessita-se de programas computacionais específicos para este fim. Neste sentido, foram utilizados alguns como o DIALux (DIALux, 2016), que é direcionado para cálculos luminotécnicos, sendo utilizado por diversos profissionais e companhias da área de engenharia e arquitetura. Também foi feita a implementação no programa DAYSIM do ambiente (DAYSIM, 2010), este programa computacional serve para a análise da iluminação natural e utiliza o algoritmo Radiance4 para calcular as iluminâncias internas de um ambiente durante o período de um ano (GRYNBERG, 1989). Para que análise pudesse ser feita usando o programa DAYSIM, foi utilizado computacional software SketchUp, que é um programa CAD (*Computer-Aided Design*), para criar o modelo 3D do ambiente.

A seguir, apresenta-se uma revisão dos principais programas computacionais para estudo e simulação de sistemas de iluminação de edificações.

##### 4.2.2.1 SKetchUp

O SketchUp é um software CAD muito utilizada por arquitetos, engenheiros e decoradores para visualizarem previamente seus projetos, pois é de fácil aprendizado quando comparada com outros programas 3D. Foi lançado no mercado

no ano 2000 pela empresa @Last Software e, em 2006, foi comprado pela Google. Após algumas versões em 2012, foi vendido para a empresa Trimble, a qual suporta e desenvolve o produto hoje. Para a aplicação de simulação de luminosidade usou dois plug-ins do DAYSIM, que é o Su2rad um exportador para *Radiance* escrito por Thomas Bleicher (2010). O outro Su2ds é um plug-in do Google SketchUp que foi desenvolvido por Josh Kjenner para facilitar a análise da geometria. O plug-in permite aos usuários especificar todas as informações do modelo necessárias para realizar uma análise DAYSIM e exibir os resultados dessa análise, no SketchUp.

Para a modelagem 3D do ambiente foi utilizado o software SketchUp versão 2017, com medidas do ambiente real de 47,62 m<sup>2</sup>. Para verificar o alcance da luz natural em todo ambiente, a altura definida como plano de trabalho foi de 1,10 m em uma malha de pontos de medição dividido em partes iguais num total de 476 pontos, com espaço de 10 centímetros entre si (Figura 13). Para realizar a simulação da luz natural no software DAYSIM, é necessário efetuar a modelagem 3D, com o uso do plug-in Su2ds, o qual cria a malha para simular os pontos de alcance da luz natural.

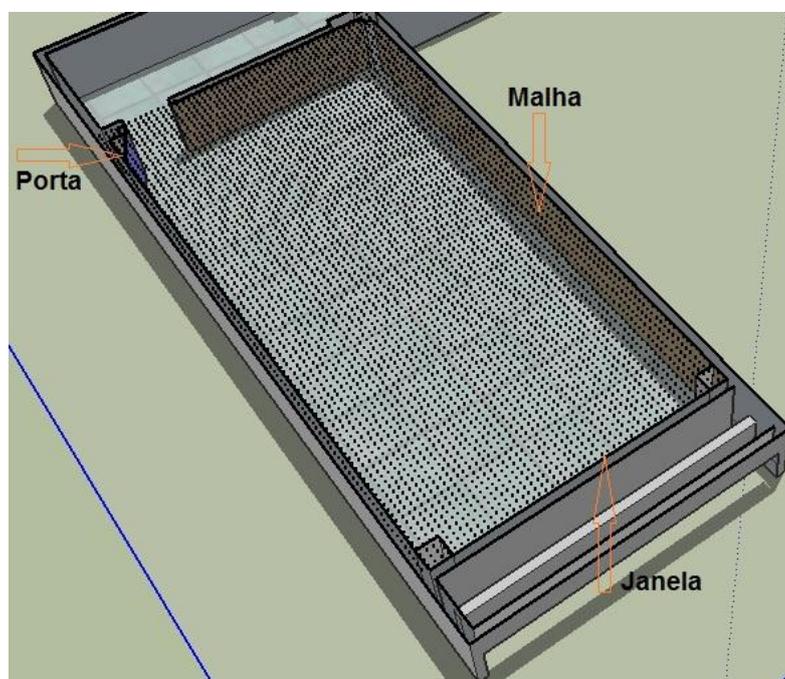


Figura 13 – Malha de pontos de medição.

Fonte: Autor.

#### 4.2.2.2 DAYSIM

O *DAYSIM*(2016) simula a luz natural no interior de ambientes, e apresenta como dados de saída uma pasta de resultados, em formato ".htm", com informações sobre diversos parâmetros que podem ser avaliados quanto a luz natural que incide no ambiente. A seguir são relacionados os parâmetros fornecidos pelo programa computacional.

O relatório de saída do software começa por apresentar o fator de luz do dia (DF) e autonomia de luz natural (*Daylight Autonomy* – DA). Este programa ainda utiliza a iluminação no plano de trabalho como um indicador da existência de luz natural suficiente em um espaço para que um ocupante possa trabalhar sem luz artificial. Além disso, a iluminância natural útil (UDI), a qual visa determinar quando os níveis de luz são aceitáveis para os ocupantes, nem muito escuro (<100 lux), nem muito brilhante (>2000 lux), também é apresentada. O limite superior fornecido pelo software é utilizado para detectar ocasiões em que um excesso de luz pode levar a desconforto térmico e/ou visual.

A autonomia de luz natural contínua (DAcon) avalia quando a iluminação natural fica abaixo do nível da iluminância do projeto. Por exemplo, no caso de serem necessários 500 lux, e se são fornecidos 400 lux por um determinado período, têm-se 400lux/500lux, que equivale a um crédito parcial 0,8 (DAcon de 0,8). Esta métrica facilita a visualização entre o cumprimento ou não dos níveis de iluminância e reconhece uma contribuição parcial de luz natural (REINHART, MARDALJEVIC e ROGERS, 2006). Já a autonomia de luz natural máxima (DAmax) indica a porcentagem de horas no ano onde a luz solar está extremamente elevada, podendo ocorrer nos ambientes problemas como reflexos indesejáveis. Por fim, o programa ainda apresenta o percentual de saturação da autonomia de luz natural (DSP).

Há ainda arquivos complementares, como o DA, que contém os seguintes dados: autonomia da luz do dia, autonomia de luz natural contínua, autonomia de luz natural máxima e o percentual de saturação da autonomia de luz natural. Já o arquivo DC reporta o coeficiente de luz natural. O arquivo ".dir" representa informação de ofuscamento da luz natural, o arquivo ".il" diz respeito ao perfil anual de iluminância e arquivo ".csv" (*Comma Separated Values*) é um arquivo utilizado na simulação térmica do ambiente.

As métricas descritas acima surgem como medidas de avaliação da luz natural que são expressas em séries anuais de iluminância e que levam em consideração as características específicas da região na qual o objeto de estudo se encontra. Destaca-se ainda que as métricas indicam uma maneira para facilitar a avaliação da luz natural no ambiente. O DA é uma métrica que auxilia a avaliar se a luz natural está “adequada e suficiente” no ambiente, pois esta métrica indica o percentual de ocupação ao longo do ano, quando a exigência mínima de iluminação é cumprida apenas por iluminação natural. No entanto, é o avaliador e/ou usuário do sistema quem deve julgar a exigência mínima de iluminação, ao qual é o nível de iluminância considerado é “suficiente”. Dessa forma, para complementar a avaliação do ambiente, no Brasil, pode-se fazer uso da NBR 8995-1 (2013).

Para iniciar as simulações foi necessário importar para o Software DAYSIM no formato 3D, o modelo tridimensional construído e caracterizado no programa Sketchup. Depois de carregado o arquivo 3D e a malha de pontos de medição do ambiente e configurado os parâmetros, o DAYSIM simula a iluminação através do *Radiance*, e possui parâmetros que podem ser definidos individualmente para cada situação e que guiam o programa como realizar esta simulação (REINHART 2010). O *Radiance* calcula os caminhos da luz traçados a partir dos sensores para as fontes de luz, e os parâmetros indicam o número de raios de luz que devem ser considerados (REINHART, 2010).

Após o término do processamento o DAYSIM produz um relatório com valores em métricas de análise da luz natural para cada ponto da malha, identificados por coordenadas (x, y e z). As métricas fornecidas são as seguintes: fator de luz diurna (FLD), autonomia de luz natural (DA), autonomia de luz natural contínua (DAcon), autonomia de luz natural máxima (DAmáx) e iluminância natural útil (UDI). Há também a informação sobre a exposição anual de luz (*annual light exposure*) que é o montante de luz incidente visível acumulado em um ponto ao longo de um ano, que é expressa em lux horas por ano.

#### **4.2.2.3 Características do modelo**

Para usar o software DAYSIM optou-se em construir o modelo 3D no programa Sketchup, versão 8.0, pois é um programa de rápido aprendizado e gratuito nesta versão. Foi levantado as medidas da sala de estudo da Pontifícia Universidade

Católica (PUCPR). O ambiente da sala corresponde 4,84 m de largura e 9,84 de profundidade e com pé-direito de 4,57m. Com boa incidência de luz natural que adentra pela janela que ocupa quase toda a parede.

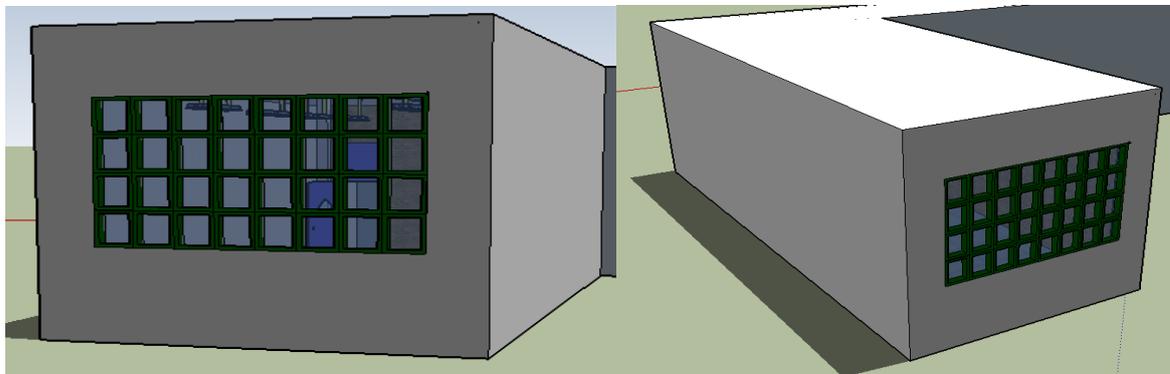


Figura 14—Modelo edificação 3D.

Fonte: Autor

#### 4.2.2.4 Variáveis de Simulação

Para a avaliação do comportamento da luz natural nos modelos criados, além das variáveis relacionadas às características físicas do modelo, foi necessário estabelecer critérios para o que deve ser considerado no desempenho da iluminação natural. Assim, foram definidas outras cinco variáveis que foram analisadas juntamente com o modelo base:

Estas variáveis são determinantes para a avaliação da profundidade de penetração da luz natural no ambiente, e estão detalhadas a seguir:

- Iluminância de Projeto: a iluminância de projeto (IP) é a exigência mínima do nível de iluminância fornecida apenas com luz natural (REINHART, MARDALJEVIC E ROGERS, 2006). Para verificar a influência desta variável foram analisados os resultados das simulações com a condição de iluminância de projeto;
- Autonomia da Iluminação Natural (*Daylight Autonomy-DA*): indica a porcentagem de horas em que o nível de iluminância de projeto é atendido durante o período de um ano (REINHART, MARDALJEVIC e ROGERS, 2006);
- Horário de ocupação: É o horário em que a simulação calculará os valores de luz natural. Para definir o padrão de uso dessa variável foram realizadas simulações com o horário de ocupação das 8h às 18h. Este horário foi definido considerando um período aproximado de horas de sol no Brasil.

#### 4.2.2.5 DIALux

O DIALux é um dos principais programas computacionais utilizados para cálculos luminotécnicos, sendo utilizado por diversos profissionais e companhias da área de engenharia e arquitetura. Diversos catálogos de produtos são disponibilizados por fabricantes em arquivos compatíveis com o software, ampliando as possibilidades de testes. O software possibilita simulações de ambientes internos, externos e até mesmo ruas. Uma vez escolhido o ambiente, neste caso apenas ambientes internos devem ser modelado, incluindo suas medidas, posição e mobiliário, portas e janelas, de modo que represente o ambiente analisado.

Para o ambiente escolhido, são utilizadas luminárias fixas penduradas no teto direcionadas para baixo, com lâmpadas de potência de 39 W, a luminárias com corpo branco em chapa de aço, as lâmpadas utilizadas em todas as salas são da marca ELEKTROSKANDIA\_SE, LED, no modelo E7212929 LED44, possuem fluxo luminoso nominal de 4.200 lm.

Realizadas as simulações para lux artificial com as luminárias todas acesas com potência de 100%, e as cortinas fechadas, chegou-se à potência mínima no plano de trabalho de 275 lx, e máxima chegou a 420 lx, como mostrado na Figura 15.

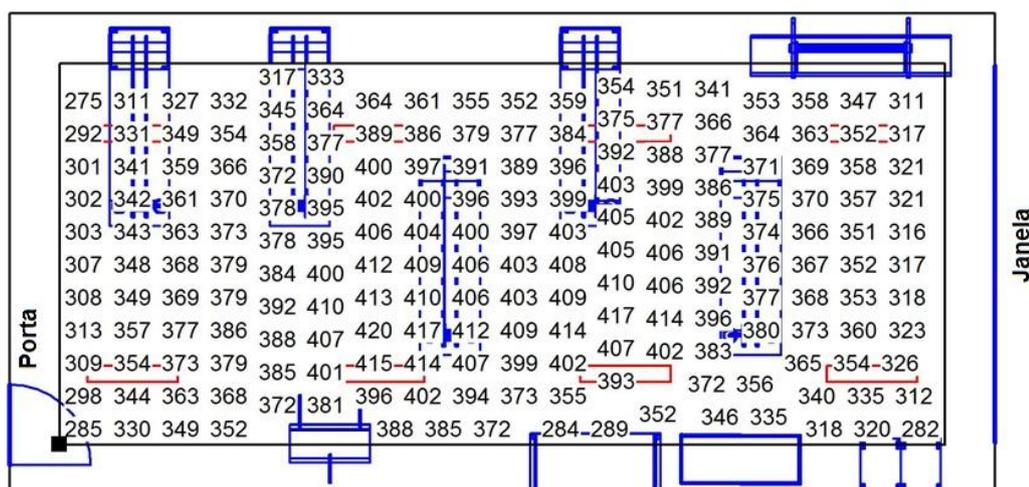


Figura 15 – Superfície com valores em lux.

Fonte: Autor.

As lâmpadas podem sofrer alteração de potência e se ajustar de acordo com a necessidade do ambiente de uso. Cada refletor pode variar sua potência



<b>Luminárias (100 %)</b>	<b>Ponto Trab. 1 (Lux)</b>	<b>Ponto Trab. 2 (Lux)</b>	<b>Ponto Trab. 3 (Lux)</b>	<b>Ponto Trab. 4 (Lux)</b>	<b>Ponto Trab. 5 (Lux)</b>
<b>1</b>	373	166	57	20	9
<b>2</b>	135	73	59	19	9
<b>3</b>	89	301	198	127	30
<b>4</b>	52	99	197	62	35
<b>5</b>	15	46	135	339	182
<b>6</b>	14	28	154	109	169
<b>7</b>	5	11	26	60	179
<b>8</b>	6	10	27	39	186

Tabela 11 – Lx por refletor ligado no ponto de trabalho, simulação com DIALux.

Fonte: Autor.

## 5. RESULTADOS

Este capítulo tem o objetivo apresentar os resultados da técnica de otimização COR quando aplicada ao estudo de caso com o protótipo em escala reduzida e ao ambiente em escala real simulado. Além disso, compara-se o algoritmo original com a versão modificada proposta neste trabalho, a qual mostrou melhorias no desempenho. Neste sentido, foi possível identificar as condições que minimizaram o esforço computacional necessário para atender às demandas de iluminação e ao uso de energia. A estratégia "manter o melhor" permitiu uma avaliação mais realista do impacto da contribuição das modificações do algoritmo proposto para a melhoria da eficiência energética.

### 5.1 CASO 1 – PROTÓTIPO EM ESCALA REDUZIDA

Esta seção descreve os resultados obtidos levando-se em conta o protótipo em escala reduzida. A seguir são apresentados os parâmetros de simulação adotados para este caso, e na sequência a discussão dos resultados obtidos.

#### 5.1.1. Parâmetros

Foi definido uma iluminação mínima de interesse para os locais em uso e uma para locais desocupados, com iluminação baixa de 50 lx, assumindo que os locais totalmente escuros são indesejáveis. A iluminação normal para locais em uso foi configurada para 250 lx. Apenas como referência, a iluminação mínima recomendada para a segurança ocupacional humana em locais de trabalho de escritório é de 500 lx (ABNT 8995-1, 2013). A referência de 250 lx foi adotada devido à limitação de potência do protótipo de pequena escala. Em um experimento de construção real, o ponto de ajuste de iluminação pode ser definido de acordo com a necessidade de cada usuário, contexto de uso do ambiente e classificações de energia do sistema de iluminação.

Definido que o sistema real passará por uma rotina de demanda de iluminação arbitrária que observa proporções temporais de um ambiente hipotético e seu contexto de uso. O regime de teste arbitrado apresentado na Tabela 12 foi inspirado em um possível cronograma de demanda de iluminação para um escritório de trabalho em dias úteis. Esta abordagem visa abranger configurações de iluminação de múltiplos alvos, explorando a capacidade do algoritmo para encontrar soluções

razoáveis em diferentes condições de iluminação. O sistema piloto possui apenas três pontos de medição, um número baixo que permite cobrir todas as combinações de locais de trabalho ocupados ou não.

Um fator de escala de tempo foi definido como o número de minutos de tempo de execução do sistema (módulo de tempo) que representa um período de uma hora em situações reais. O número de módulos de tempo atribuídos a cada condição de demanda é o peso a ser usado na avaliação do desempenho de uso de energia observado nessa condição, simplesmente calculando a energia total.

Requisitos de Iluminação	Condições de demanda de Iluminação (lx)								
Sensor 0	250	50	50	250	50	250	250	50	
Sensor 1	50	250	50	250	250	50	250	50	
Sensor 2	50	50	250	50	250	250	250	50	
$n(\text{total} = 24 \text{ horas})$	0,333	0,333	0,333	1,5	1,5	1,5	8	10,5	
$k$	1	2	3	4	5	6	7	8	

Tabela 12 – Regime de teste predefinido (padrão de uso hipotético do sistema de iluminação).

Fonte: Autor.

### 5.1.2 Análise dos Resultados

Ao aliar a estratégia com as modificações propostas no algoritmo COR, configurado para ser executado com pequenas populações, estas resultaram em um melhor desempenho tanto para economia de energia quanto para custo computacional, como poder ser visto no grupo S (Tabela 13). Neste grupo, a condição 24/3, o tamanho da população não afetou significativamente a economia de energia. Sobre esses valores, portanto, situa-se a condição operacional ideal para a configuração do sistema.

$nPop / nGrp$	Conjunto de melhores Soluções	Manter o Melhor	Chamadas do alg.,	J / 24h (experim.)	J / 24h (alg. calc.)
<b>Grupo Q</b>					
100/10	Desabilitado	Desabilitado	429	716,7	763,8
24/3			1101	726,6	783,5
<b>Grupo R</b>					
100/10	Desabilitado	Habilitado	780	706,9	749,5
24/3			1186	704,8	750,1
<b>Grupo S</b>					
100/10	Habilitado	Habilitado	1351	707,5	749,7
<b>24/3</b>			<b>3782</b>	<b>705,9</b>	<b>757,0</b>
<b>Grupo T</b>					
100/10	Habilitado	Habilitado	439	712,2	760,9
24/3			5690	729,6	788,4

Tabela 13 – Resultados da execução das modificações do algoritmo COR.

Fonte: Autor.

O uso de parâmetros de melhor desempenho para as diferentes condições de demanda de iluminação é vantajoso. Uma vez que cada condição de demanda de iluminação representa um problema diferente, é naturalmente esperado que seja alcançado um maior desempenho. Comparando os grupos T e Q que resultam em resultados de uso de energia como ilustra a Tabela 13. A estratégia "manter o melhor", que é o processo de manter o último valor nas mesas de trabalho quando não tem luz natural, provavelmente ultrapassará a maior parte dessa diferença quando R e S forem comparados. O número de chamadas para o algoritmo de otimização varia devido ao tempo necessário para cada execução, de modo a alcançar o desvio padrão predefinido. Os grupos são as alterações no algoritmo, o grupo Q foi desabilitado "manter o melhor" e o "conjunto de melhores soluções", resultou no algoritmo COR original, cada modificação nestes dois parâmetros geram resultados diferentes, MOHSENI *et al.* (2014).

Os tamanhos grandes das populações exigem mais tempo para completar cada iteração. Por outro lado, quando essa população é muito pequena, a capacidade de exploração do algoritmo é prejudicada. Uma vez que ambos os efeitos competem, o que prevalece determina quantas vezes o algoritmo terá a oportunidade de executar durante o período do teste. Ao comparar os números de execuções gravados para os grupos Q e T, ou R e S, há uma indicação de que o uso das modificações propostas e os melhores parâmetros associados levam a um número maior de interação.

Estes podem ser considerados fatores benéficos, porque o sistema hardware computacional necessário para executar o sistema de otimização de iluminação pode ser mais simples, e mais barato.

## 5.2 CASO 2 – ESCALA REAL

Esta seção descreve os resultados obtidos levando-se em conta o ambiente em escala real. A seguir são apresentados os parâmetros de simulação adotados para este caso, e na sequência a discussão dos resultados obtidos.

### 5.2.1 Parâmetros

A iluminação mínima definida para os locais desocupados é de 50 lux, para os locais em uso a referência é de 500 lux para um ambiente de laboratório de ensino e pesquisa (ABNT 8995-1, 2013). Os dados referentes a posição das mesas, dia, mês, hora e a incidência em lx da luz natural foram gerados pelo software *Daysim* para a cidade de Curitiba em um arquivo com extensão .csv. As informações da luz artificial foram geradas pelo software *DiaLux*, o qual simulou individualmente cada refletor ligado em 100 % de sua capacidade, e obteve os valores em lx de iluminância em cada mesa.

Os períodos escolhidos para a simulação computacional foram os dos solstícios de inverno e verão. O primeiro período de simulação inicia no dia 20 de junho de 2018 e termina no dia 21 (dois dias), esse é o período onde as noites são mais longas e os dias mais curtos. Já o segundo período de simulação inicia no dia 20 de dezembro e finaliza no 21 (também 2 dias), representando o período onde os dias são mais longos e as noites são mais curtas. Essa escolha foi feita levando em conta dias com menor e maior incidência de luz natural ao longo dos dias escolhidos.

O padrão de uso foi definido considerando um ambiente de sala de aula, com início das aulas às 07:00 horas da manhã e finalizando às 23:00 horas. O sistema possui cinco pontos de medição (estações de trabalho), oito fontes de luz artificial e a influência da luz natural proveniente da face onde encontram-se as janelas.

A aplicação, ao ser executada, teve um tempo total de 6:52 hs para obter os melhores resultados de um único dia, um tempo longo considerando a aplicação e a

dimensão do problema. Para solucionar este problema e reduzir o tempo de processamento, foram criadas algumas modificações no código. Assim, a partir de 50 iterações, dá-se início a verificação da estagnação do algoritmo quando este encontra uma determinada solução. Se o melhor valor gerado (Wh) permanecer o mesmo sem nenhuma melhoria no resultado da função objetivo por 50 iterações, a aplicação inicia o cálculo (otimização) da próxima hora.

Outra modificação feita na aplicação para melhorar o tempo de processamento do algoritmo diz respeito ao valor gerado na função objetivo, sendo este menor que 1 Wh, interrompe-se a iteração se dá início o próximo ciclo. Para esta interrupção ocorrer não pode ter influência de luz natural, se houver a aplicação pode zerar o consumo de luz artificial e manter somente a fonte natural.

Definido que o sistema real vai passar por uma demanda de iluminação, a Tabela 14 define o padrão de uso de iluminação das estações de trabalho, sendo as que estiverem em uso a demanda é de 500 lx e as sem 50 lux. Como esta abordagem visa abranger predefinições de iluminação nas estações de trabalho, pretende-se assim explorar a capacidade do algoritmo para encontrar soluções em diferentes condições de iluminação.

<b>Requisitos de Iluminação</b>	<b>Demanda de Iluminação (lx)</b>
Sensor 1	50
Sensor 2	500
Sensor 3	500
Sensor 4	500
Sensor 5	50

Tabela 14 – Regime de teste predefinido (padrão de uso hipotético do sistema de iluminação).

Fonte: Autor.

### 5.2.2 Análise dos Resultados

O algoritmo COR foi executado considerando a variação de dois parâmetros, o primeiro foi a estratégia manter o melhor citado na seção 5.1.2, onde esta foi habilitada (sim) e desabilitada (não) durante os testes. Quando esta está

desabilitada, representa o algoritmo COR original. Alterações no tamanho da população também foram feitas e analisadas, neste caso indivíduos/grupos de 100/10 e 24/3 foram considerados. Nestes casos as outras modificações propostas no algoritmo não foram testadas para este caso por falta de tempo.

O número de chamadas para o algoritmo de otimização varia devido ao tempo necessário para cada execução, onde cada modificação destes dois parâmetros gera resultados diferentes. Quanto maior a população, exigem mais tempo o algoritmo demora para resolver o problema de otimização a cada iteração. Um exemplo podemos pegar o dia 20/12 usando indivíduos/grupos de 100/10 e 24/3, às 8:00 horas da manhã.

Os indivíduos/grupos de 100/10 gerou um tempo de execução de 11 minutos e 16 segundos, o segundo com os indivíduos/grupos de 24/3 gerou um tempo de execução de 4 minutos e 34 segundos.

Nota-se que a solução com a opção em manter o melhor (sim) exige menos do hardware, não tendo influência da luz natural nas estações de trabalho o algoritmo executa o processo de otimização com uso de fontes de luz artificial, na próxima checagem se permanecer a ausência da fonte natural é mantido os valores obtidos na última otimização nas estações.

As Figuras 17, 18, 19 e 20 mostram os resultados obtidos para o consumo de energia em (Wh) dos dias 20 e 21 de junho e 20 e 21 de dezembro, no período de 17 horas de uso do ambiente em cada dia. A iluminação sem o algoritmo de otimização (constante) tem uso de 640 Wh. Neste caso, o consumo constante representa todas as lâmpadas estão ligadas em 100% da potência, um caso comumente encontrado em ambientes de ensino em todo o país.

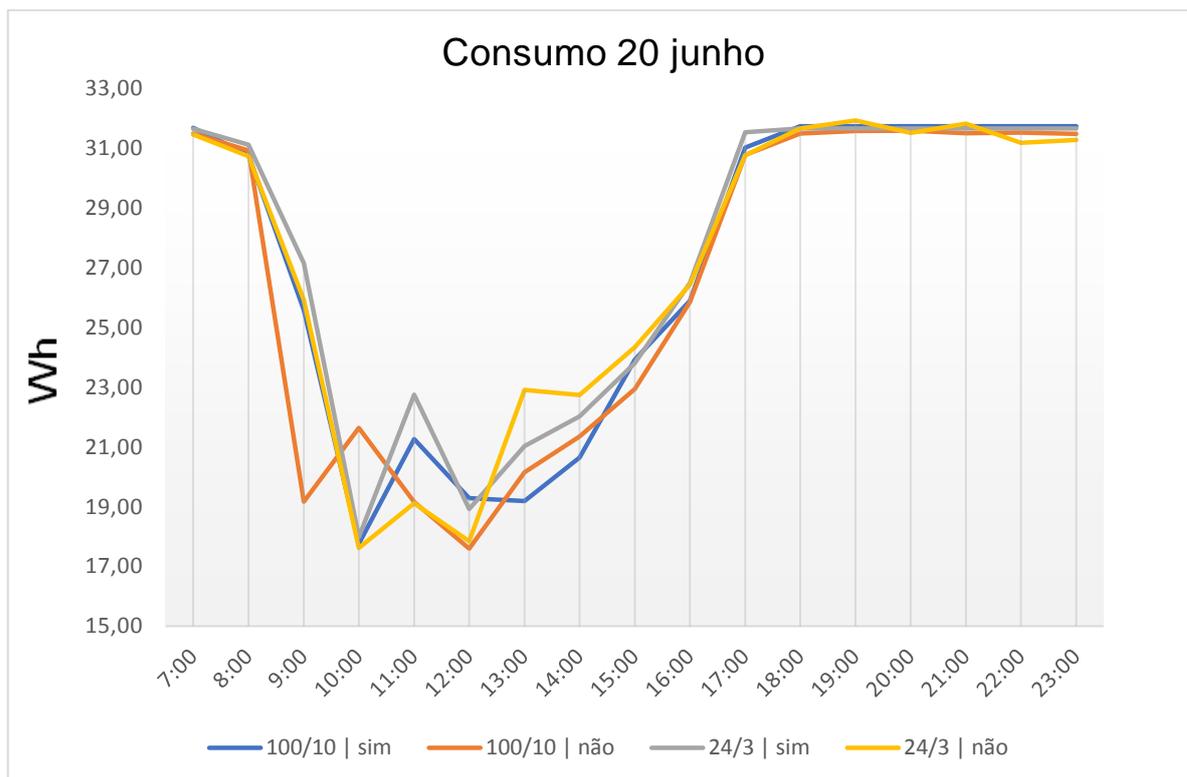


Figura 17 – Consumo de energia em Wh do período 20 junho.

Fonte: Autor.

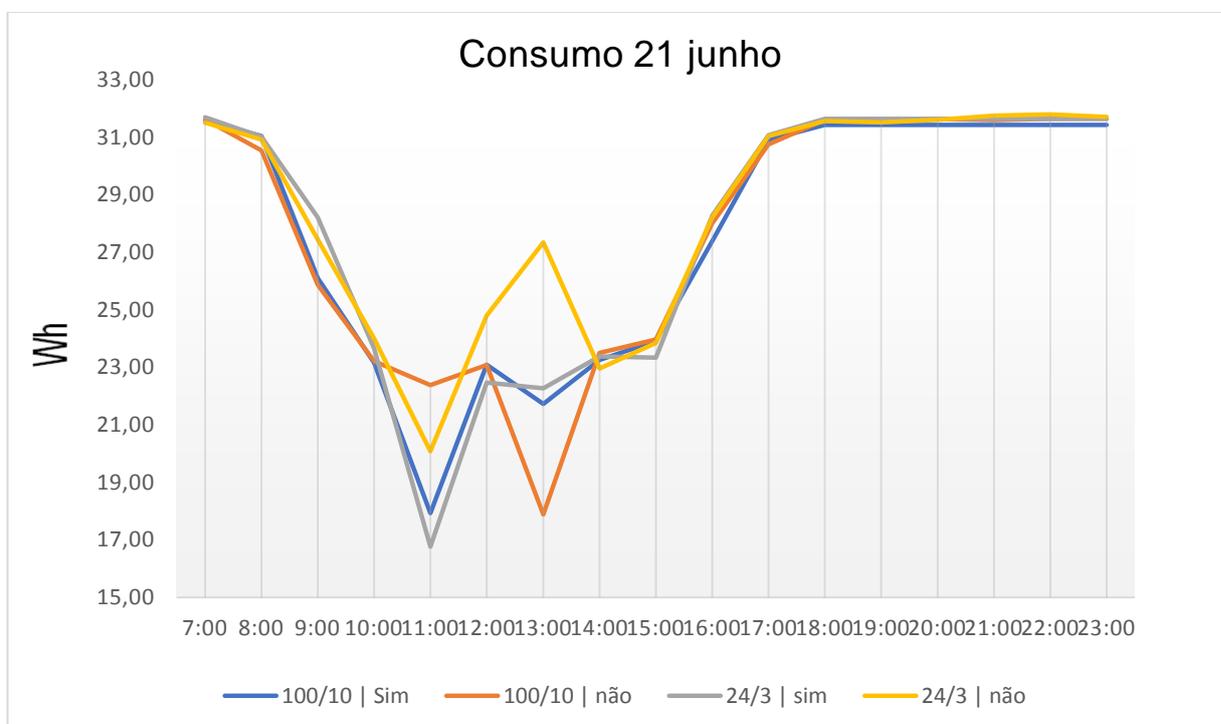


Figura 18 – Consumo de energia em Wh do período 21 junho.

Fonte: Autor.

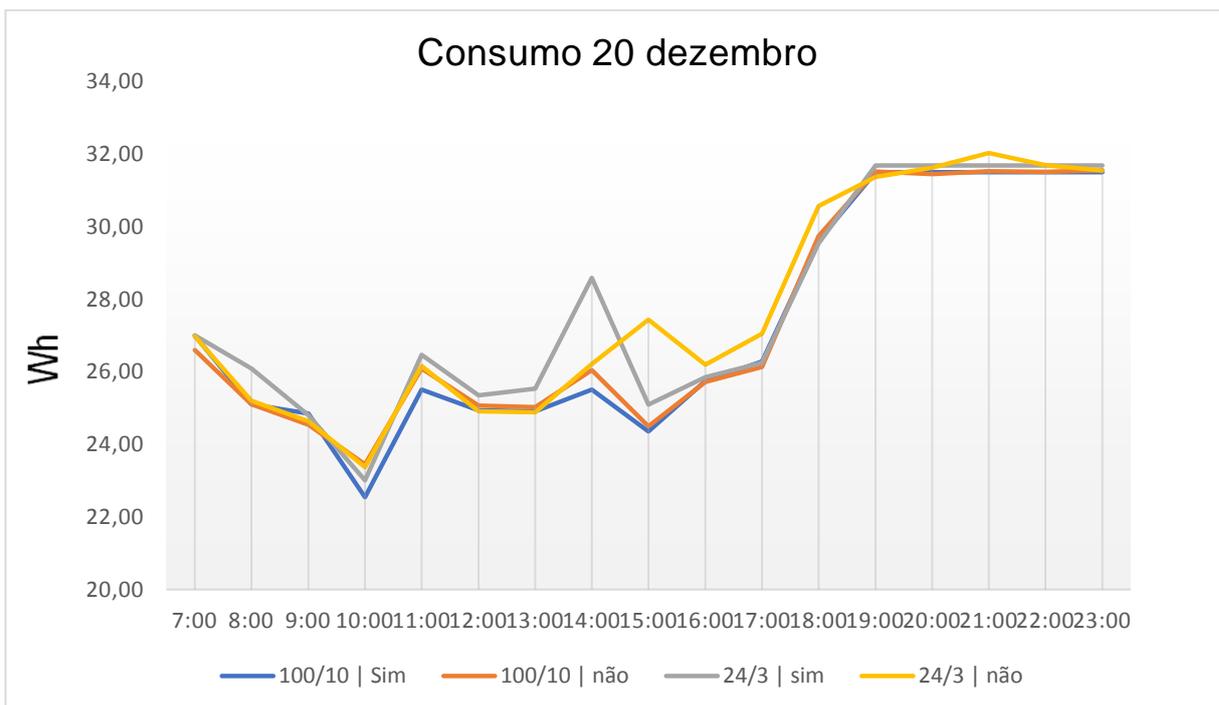


Figura 19 – Consumo de energia em Wh do período 20 dezembro.

Fonte: Autor.

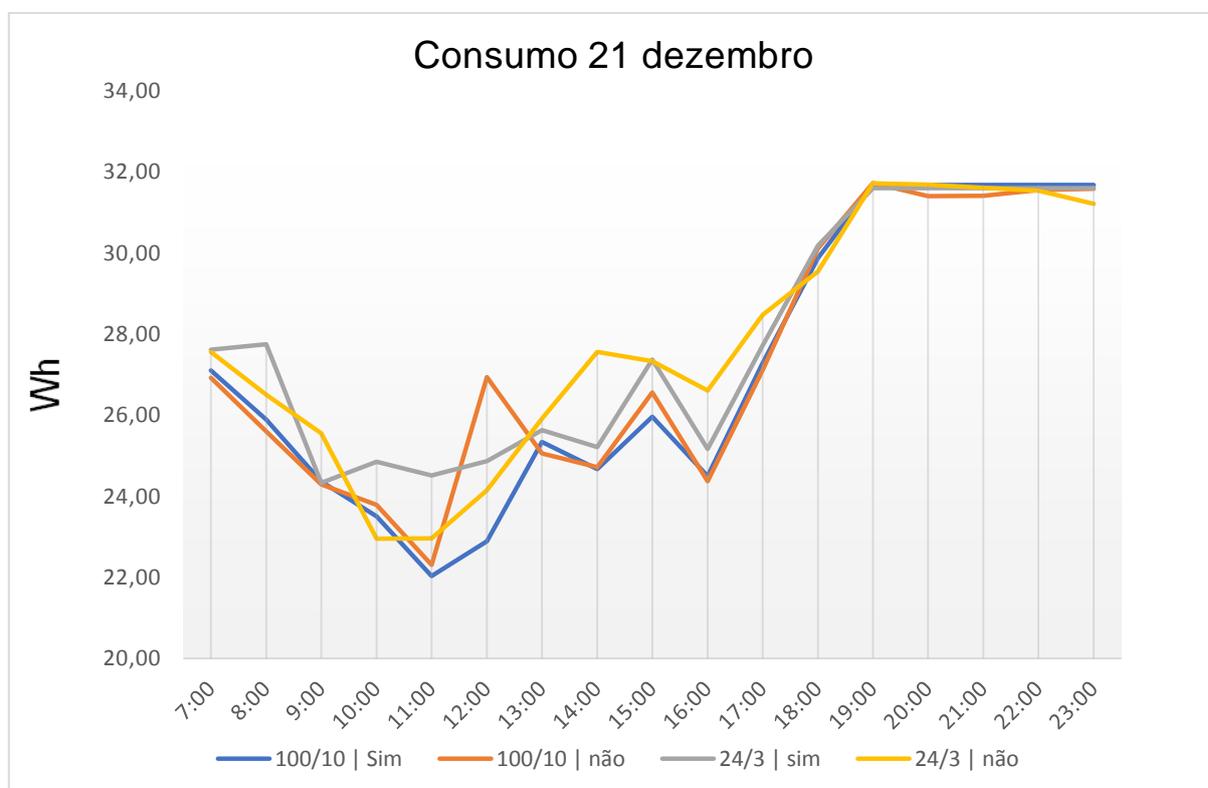


Figura 20 – Consumo de energia em Wh do período 21 dezembro.

Fonte: Autor.

Observa que o uso do algoritmo de otimização COR gera uma economia significativa no consumo de energia elétrica comparado ao projeto elétrico normal. Isto se dá por considerar a participação da luz natural e de outras fontes e a diminuição de incidência de luz artificial quando não necessário.

Nas Tabelas 15, 16, 17 e 18 apresentam-se os resultados em percentual da luz natural em comparação com a influência da luz artificial em cada estação de trabalho, nos quatro dias e no período das 7:00 horas até às 23:00 horas. Nas Tabelas 19, 20, 21 e 22 apresentam-se alguns dos valores gerados em lx para cada mesa, com a soma da luz natural e da artificial.

	nPop nGrp	Mesa	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
Dia 20/06	100/10 Sim	1	0	5,6	33,2	98,3	97,5	100	89,8	64,8	41,0	25,1	4,07	0
		2	0	1,39	8,42	26	19,5	26,3	21,7	16,5	11,0	7,15	1,18	0
		3	0	0,4	2,35	7,0	8,0	7,2	5,85	4,5	3,0	1,93	0,4	0
		4	0	11,5	63,0	100	100	94,5	100	92,4	89,5	70,8	9,8	0
		5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100/10 Não	1	0	5,37	33,2	97,8	98,9	99,4	89,8	59,2	41,0	25,5	4,09	0
		2	0	1,36	8,42	26,8	29,5	26,4	21,9	15	11,3	7,07	1,18	0
		3	0	0,39	2,36	7,0	8,0	7,2	5,87	4,8	3,1	1,93	0,4	0
		4	0	12,6	50,9	85,2	97,0	100	99,7	100	79,8	70,8	8,58	0
		5	0	0	0	0	0	0	0,19	0,19	0	0,19	0	0
	24/3 Sim	1	0	5,35	27,3	88,5	62,3	68,0	56,2	64,8	41,0	25,8	3,9	0
		2	0	1,34	7,52	24,2	31,4	27,9	21,4	13,5	10,9	7,22	1,15	0
		3	0	0,4	2,4	7,0	8,0	7,2	6,2	4,76	3,06	1,96	0,39	0
		4	0	10,9	60,5	81,0	97,8	91,7	93,6	100	97,9	48,6	9,29	0
		5	0	0	0	0	0	0	0,19	0,18	0	0,19	0	0
	24/3 Não	1	0	5,46	31,3	98,6	98,9	98,6	72,6	64,8	41,0	25,8	4,01	0
		2	0	1,37	8,07	26,3	30,0	26,1	22,8	16,4	11,0	6,98	1,13	0
		3	0	0,39	2,29	7,0	8,0	7,2	6,2	4,57	2,99	1,87	0,4	0
		4	0	12,6	74,2	100	100	100	91,3	91,6	99,9	63,6	9,06	0
		5	0	0	0	0	0	0	0,17	0,19	0	0,19	0	0

Tabela 15 – Percentual de luz natural em cada estação trabalho caso 20/06.

Fonte: Autor.

	nPop nGrp	Mesa	Dia 21/06										
			7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
100/10 Sim	1	0	5,0	29,2	48,0	93,3	49,8	56,4	43,7	46,2	18,5	4,15	0
	2	0	1,38	7,3	11,3	28,9	11,8	13,1	12,2	12,2	5,15	1,18	0
	3	0	0,39	2,12	2,91	7,8	2,96	3,51	4,0	3,41	1,4	0,39	0
	4	0	11,3	68,0	99,1	100	84,5	100	92,3	82,2	39,7	10,2	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0,38	0,19	0	0	0
100/10 Não	1	0	4,71	30,4	48,0	100	49,8	43,2	46,6	46,2	16,9	4,14	0
	2	0	1,36	7,62	12,2	30,1	12,0	12,5	12,6	12,5	5,09	1,17	0
	3	0	0,39	2,19	3,15	7,8	3,02	3,8	3,67	3,4	1,37	0,39	0
	4	0	11,4	60,7	61,2	84,3	92,4	100	99,9	83	48,2	10,2	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0,37	0,19	0	0	0
24/3 Sim	1	0	4,64	29,3	48,0	88,0	36,9	56,4	36,8	46,2	17,6	4,13	0
	2	0	1,29	7,45	11,7	31,2	12,2	13,0	13,2	12,1	4,96	1,18	0
	3	0	0,38	2,2	3,0	7,8	3,2	3,48	4,0	3,35	1,32	0,38	0
	4	0	11,2	43,2	75,3	82,1	65,5	98,5	95,9	99,9	45,9	10,2	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0,38	0,19	0	0	0
24/3 Não	1	0	5,0	30,4	48,0	75,6	35,6	54,1	46,6	45,8	18,8	4,07	0
	2	0	1,35	7,63	11,5	30,3	12,4	13,7	13,1	12,3	5,09	1,15	0
	3	0	0,39	1,95	3,03	7,8	3,2	3,8	3,76	3,6	1,35	0,4	0
	4	0	11,2	45,0	72,3	88,3	55,9	70,0	98,4	62,1	47,0	9,7	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0,38	0,2	0	0	0

Tabela 16 – Percentual de luz natural em cada estação trabalho caso 21/06.

Fonte: Autor.

	nPop nGrp	Mesa	Dia 20/12										
			7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
100/10 Sim	1	24,4	38,0	29,9	47,0	30,2	28,8	36,6	29,3	38,4	29,1	28,4	9,82
	2	6,14	10,0	10,8	11,2	9,16	10,8	10,4	9,9	10,8	8,57	7,87	2,8
	3	1,74	2,85	3,2	3,14	3,48	3,8	3,4	3,25	3,25	2,7	2,32	0,96
	4	52,8	58,9	63,8	100	63,2	62,7	76,2	71,8	81,0	69,6	65,4	22,6
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100/10 Não	1	20,3	36,1	31,4	35,9	28,9	35,0	35,7	32,3	35,9	30,6	27,7	10,3
	2	6,13	9,86	10,5	11,9	9,18	10,5	10,5	9,83	10,5	8,82	7,88	2,92
	3	1,72	3,0	3,2	3,4	3,43	3,66	3,43	3,25	3,19	2,69	2,34	1,0
	4	54,0	60,3	77,2	66,2	63,2	79,6	81,4	71,8	89,2	69,6	65,4	22,3
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24/3 Sim	1	18,8	31,0	38,6	44,4	31,2	37,0	33,5	26,5	33,9	28,5	28,4	10,0
	2	5,69	10,1	10,5	11,1	9,16	10,4	10,6	10,2	10,8	8,39	8,08	2,82
	3	1,78	3,0	3,07	3,4	3,38	3,63	3,6	3,4	3,4	2,55	2,31	1,0
	4	54,0	52,7	81,2	93,3	63,2	60,7	61,8	53,3	72,2	69,6	65,4	21,5
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24/3 Não	1	23,4	35,8	30,4	47,0	25,8	34,5	36,6	32,7	32,3	31,2	23,3	10,6
	2	6,22	9,83	10,6	11,6	9,42	10,2	10,5	9,77	10,8	8,82	7,56	2,88
	3	1,8	2,84	3,08	3,24	3,6	3,56	3,4	3,28	3,4	2,61	2,4	0,96
	4	42,3	74,8	81,2	78,1	46,6	79,6	66,9	71,8	52,0	67,6	47,0	21,5
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 17 – Percentual de luz natural em cada estação trabalho caso 20/12.

Fonte: Autor.

	nPop nGrp	Mesa	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
		<b>Dia 21/12</b>												
<b>100/10 Sim</b>	1	22,1	31,2	39,2	37,9	53,6	43,4	31,4	37,8	27,4	32,9	19,3	10,1	
	2	5,65	7,75	9,5	10,5	12,6	10,2	10,0	10,9	8,66	10,6	6,41	2,99	
	3	1,57	2,07	2,45	3,0	3,17	2,95	3,68	3,55	3,07	3,01	1,97	1,0	
	4	51,2	71,8	82,8	96,9	100	100	70,0	60,6	59,4	90,2	49,8	22,8	
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>100/10 Não</b>	1	22,4	28,0	39,2	44,4	53,6	34,3	29,7	37,8	23,3	38,8	18,2	10,5	
	2	5,87	7,98	9,91	10,7	12,5	10,7	9,87	10,9	8,8	10,5	6,34	2,88	
	3	1,57	2,2	2,51	2,89	3,11	3,2	3,8	3,46	3,15	3,13	1,95	1,0	
	4	51,2	53,0	67,0	70,8	100	65,7	59,9	61,6	59,4	69,3	49,8	22,4	
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>24/3 Sim</b>	1	22,2	31,8	39,2	32,0	42,4	43,4	30,7	36,5	27,3	29,2	18,6	10,3	
	2	5,7	7,82	9,67	9,38	12,9	10,4	9,46	10,6	8,65	10,5	6,47	2,97	
	3	1,54	2,12	2,46	3,0	3,4	3,06	3,6	3,37	3,13	3,2	2,0	1,0	
	4	51,2	68,8	61,1	66,5	79,8	80,7	70,0	86,2	59,4	74,8	48,8	18,0	
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>24/3 Não</b>	1	18,3	30,8	39,2	44,4	43,8	43,4	30,0	28,2	28,2	38,8	22,1	10,3	
	2	5,85	7,78	9,68	10,7	13,1	10,3	9,37	11,1	7,01	10,8	6,16	2,91	
	3	1,6	2,14	2,52	2,78	3,4	3,04	3,62	3,6	3,09	3,18	1,86	1,0	
	4	37,8	71,8	61,1	96,3	57,2	87,6	70,0	60,7	54,6	46,8	49,8	22,5	
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabela 18 – Percentual de luz natural em cada estação trabalho caso 21/12.

Fonte: Autor.

		<b>Manter o Melhor   nPop/nGrp 100/10</b>									
		<b>20/jun</b>					<b>20/dez</b>				
Hora	Posição	Lux Trab1	Lux Trab2	Lux Trab3	Lux Trab4	Lux Trab5	Lux Trab1	Lux Trab2	Lux Trab3	Lux Trab4	Lux Trab5
		Em Uso	Vazio	Em Uso	Em Uso	Vazio	Em Uso	Vazio	Em Uso	Em Uso	Vazio
7:00	<b>Manter Melhor</b>	511,18	508,42	563,24	500,00	518,63	500,00	520,86	517,94	511,12	531,32
8:00		500,00	503,52	506,06	548,35	512,24	500,00	517,77	526,74	635,49	545,11
9:00		500,00	510,57	509,91	588,65	508,73	679,53	510,74	500,00	636,46	519,43
10:00		565,78	542,50	500,00	2058,00	544,40	500,00	545,03	540,56	508,00	532,11
11:00		681,23	830,30	500,00	4481,00	555,10	519,26	524,07	517,55	500,00	538,54
12:00		601,00	543,20	500,00	2684,50	532,30	642,13	510,75	500,00	634,75	531,95
13:00		500,00	539,10	530,20	5391,60	548,30	500,00	527,44	529,91	534,14	528,88
14:00		500,00	527,70	533,70	2145,70	538,40	560,60	515,31	522,33	500,00	530,08
15:00		500,00	525,60	532,45	668,92	541,25	500,00	520,10	523,21	550,53	549,24
16:00		514,51	517,61	517,67	500,00	527,39	536,47	536,61	518,69	500,00	520,09
17:00		515,66	507,28	504,60	500,00	570,10	510,66	520,65	517,99	500,00	520,07
18:00		517,48	511,81	500,00	509,18	523,05	539,46	535,12	520,31	500,00	521,68
19:00		517,48	511,81	500,00	509,18	523,05	500,00	507,05	508,10	507,52	511,26
20:00	517,48	511,81	500,00	509,18	523,05	500,00	507,05	508,10	507,52	511,26	
21:00	517,48	511,81	500,00	509,18	523,05	500,00	507,05	508,10	507,52	511,26	
22:00	517,48	511,81	500,00	509,18	523,05	500,00	507,05	508,10	507,52	511,26	
23:00	517,48	511,81	500,00	509,18	523,05	500,00	507,05	508,10	507,52	511,26	

Tabela 19 – Valor em lx para cada estação, luz natural com artificial, período 20 junho e 20 dezembro, manter melhor.

Fonte: Autor.

		Não Manter o Melhor   nPop/nGrp 100/10									
		20/jun					20/dez				
Hora		Lux Trab1	Lux Trab2	Lux Trab3	Lux Trab4	Lux Trab5	Lux Trab1	Lux Trab2	Lux Trab3	Lux Trab4	Lux Trab5
Posição		Em Uso	Vazio	Em Uso	Em Uso	Vazio	Em Uso	Vazio	Em Uso	Em Uso	Vazio
7:00	Não Manter Melhor	542,91	511,43	500,00	508,83	510,02	602,24	522,20	524,07	500,00	517,53
8:00		521,30	514,01	507,34	500,00	503,70	526,45	527,25	500,00	619,89	527,95
9:00		500,00	510,73	507,91	728,53	520,83	645,80	521,98	500,00	526,21	540,12
10:00		568,40	526,70	500,00	2415,00	510,60	654,04	510,84	500,00	767,10	503,50
11:00		671,13	549,20	500,00	4619,10	541,10	542,58	522,83	524,78	500,00	522,96
12:00		604,87	541,10	500,00	2537,60	542,10	529,11	522,14	519,17	500,00	531,71
13:00		500,00	534,30	527,90	5406,10	543,00	512,72	524,39	524,83	500,00	530,41
14:00		547,18	578,29	500,00	1982,00	518,02	508,31	519,00	523,09	500,00	531,03
15:00		500,00	513,10	515,48	750,34	537,45	535,22	531,94	532,94	500,00	540,72
16:00		506,60	523,13	516,80	500,00	537,00	510,58	521,46	520,04	500,00	512,83
17:00		513,11	506,35	500,00	570,97	512,53	523,11	520,11	513,15	500,00	519,94
18:00		500,00	510,55	506,78	503,51	510,70	515,09	514,18	500,00	505,86	506,16
19:00		503,32	504,76	500,00	514,56	515,07	508,74	507,34	504,71	500,00	501,10
20:00		500,00	511,47	503,60	506,96	514,82	500,00	517,67	520,27	510,15	515,96
21:00		526,94	511,35	508,09	500,00	505,64	500,00	508,01	511,45	527,68	516,11
22:00		500,00	515,52	501,92	501,70	515,85	516,46	518,71	500,00	504,68	511,65
23:00		526,82	514,31	500,00	520,18	507,40	515,47	508,16	500,00	508,47	515,42

Tabela 20 – Valor em lx para cada estação, luz natural com artificial, período 20 junho e 20 dezembro, não manter melhor.

Fonte: Autor

		Manter o Melhor   nPop/nGrp 24/3									
		21/jun					21/dez				
Hora		Lux Trab1	Lux Trab2	Lux Trab3	Lux Trab4	Lux Trab5	Lux Trab1	Lux Trab2	Lux Trab3	Lux Trab4	Lux Trab5
Posição		Em Uso	Vazio	Em Uso	Em Uso	Vazio	Em Uso	Vazio	Em Uso	Em Uso	Vazio
7:00	Manter Melhor	523,88	514,92	500,00	515,56	500,98	517,07	525,87	519,37	500,00	518,26
8:00		538,50	540,82	529,98	509,02	527,19	500,00	524,17	519,51	521,51	514,13
9:00		517,91	523,27	500,00	786,47	516,80	500,00	516,89	527,67	738,57	525,29
10:00		500,00	519,72	533,44	967,49	533,49	694,44	597,06	500,00	779,97	521,89
11:00		743,60	506,50	500,00	2906,50	512,30	631,63	518,07	500,00	795,99	530,91
12:00		675,41	516,00	500,00	974,00	522,59	500,00	528,11	522,95	670,59	526,19
13:00		500,00	544,10	545,40	1203,30	546,20	526,83	539,36	528,08	500,00	538,16
14:00		633,20	513,90	500,00	4432,20	527,50	517,40	528,65	534,47	500,00	539,05
15:00		500,00	527,14	538,10	694,36	532,08	515,83	519,94	511,83	500,00	523,08
16:00		534,22	524,04	530,56	525,28	527,20	664,62	523,50	500,00	603,24	527,34
17:00		508,05	507,94	520,52	500,00	502,35	613,36	510,15	500,00	510,77	509,44
18:00		542,07	534,09	500,00	504,31	506,53	525,42	505,82	500,00	637,55	509,85
19:00		542,07	534,09	500,00	504,31	506,53	500,00	504,51	547,19	544,67	510,21
20:00		542,07	534,09	500,00	504,31	506,53	500,00	504,51	547,19	544,67	510,21
21:00		542,07	534,09	500,00	504,31	506,53	500,00	504,51	547,19	544,67	510,21
22:00		542,07	534,09	500,00	504,31	506,53	500,00	504,51	547,19	544,67	510,21
23:00		542,07	534,09	500,00	504,31	506,53	500,00	504,51	547,19	544,67	510,21

Tabela 21 – Valor em lx para cada estação, luz natural com artificial, período 21 junho e 21 dezembro, manter melhor.

Fonte: Autor

		21/jun					21/dez				
Hora		Lux Trab1	Lux Trab2	Lux Trab3	Lux Trab4	Lux Trab5	Lux Trab1	Lux Trab2	Lux Trab3	Lux Trab4	Lux Trab5
Posição		Em Uso	Vazio	Em Uso	Em Uso	Vazio	Em Uso	Vazio	Em Uso	Em Uso	Vazio
7:00	Não Manter Melhor	533,06	542,58	500,00	540,17	542,65	629,86	512,51	500,00	677,86	512,92
8:00		500,00	519,52	511,15	506,93	527,49	516,65	527,08	513,72	500,00	522,73
9:00		500,00	511,44	564,76	755,86	520,26	500,00	516,37	515,83	738,33	525,01
10:00		500,00	530,00	528,60	1007,90	518,40	500,00	522,01	539,77	538,83	548,27
11:00		864,60	520,80	500,00	2701,30	522,90	611,70	513,20	500,00	1109,30	506,30
12:00		698,50	508,80	500,00	1141,20	515,40	500,00	532,04	526,44	617,29	533,89
13:00		520,80	519,90	500,00	1692,90	510,90	539,94	544,06	524,78	500,00	538,85
14:00		500,00	520,80	531,30	4319,30	531,20	670,43	504,51	500,00	710,17	514,80
15:00		504,00	520,70	500,00	1117,00	500,30	500,00	641,82	517,40	543,68	531,16
16:00		500,00	510,81	519,52	512,37	534,44	500,00	510,31	503,65	963,57	503,56
17:00		515,90	522,86	500,00	525,73	507,82	515,70	535,54	537,49	500,00	527,35
18:00		524,51	517,63	500,00	509,66	511,39	522,11	515,56	500,00	510,24	509,79
19:00		500,00	505,12	506,74	502,44	510,71	500,00	510,15	510,43	510,21	506,83
20:00		500,00	505,04	515,80	529,84	528,59	522,81	513,75	517,10	500,00	520,10
21:00		560,08	531,60	526,18	500,00	510,83	535,79	536,07	515,75	500,00	501,07
22:00		505,01	525,34	500,00	506,71	523,05	529,35	509,88	507,63	500,00	509,48
23:00		540,29	540,34	525,86	500,00	521,30	544,33	533,53	500,00	521,75	523,10

Tabela 22 – Valor em lx para cada estação, luz natural com artificial, período 21 junho e 21 dezembro, não manter melhor.

Fonte: Autor

Nas Figuras 21 e 22 demonstra a análise de convergência do algoritmo para encontrar o melhor valor para cada mesa de trabalho em dois horários diferentes 09:00 horas e 19:00 horas.

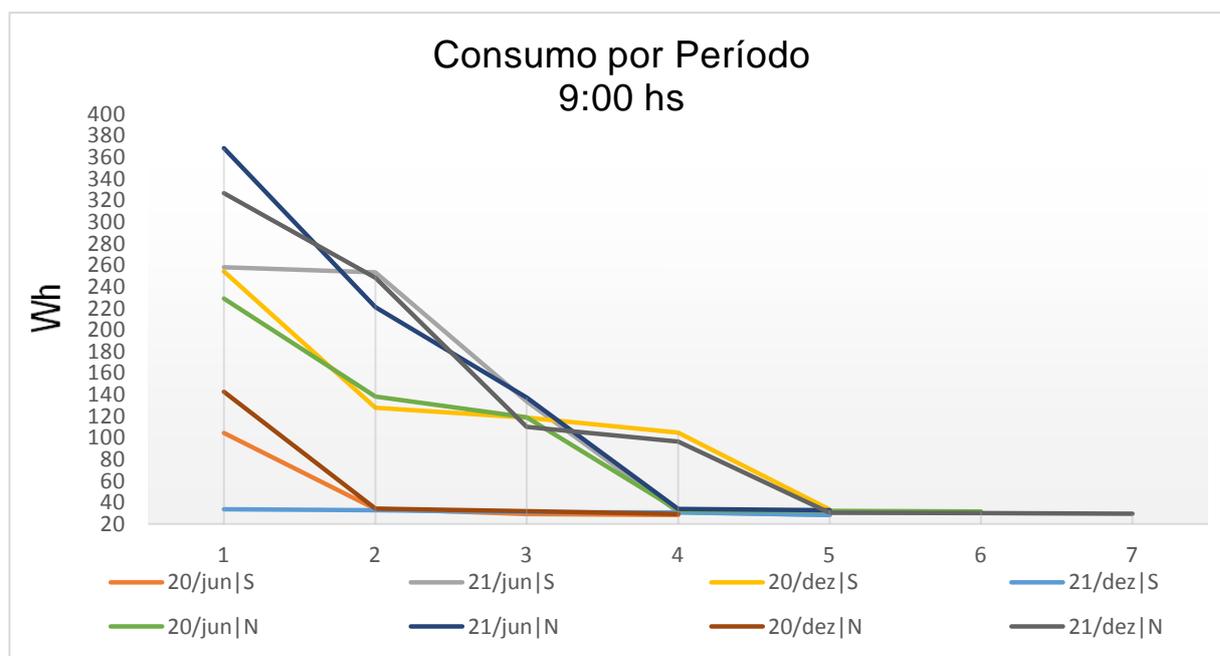


Figura 21 – Convergência melhor valor às 09:00 horas.

Fonte: Autor.

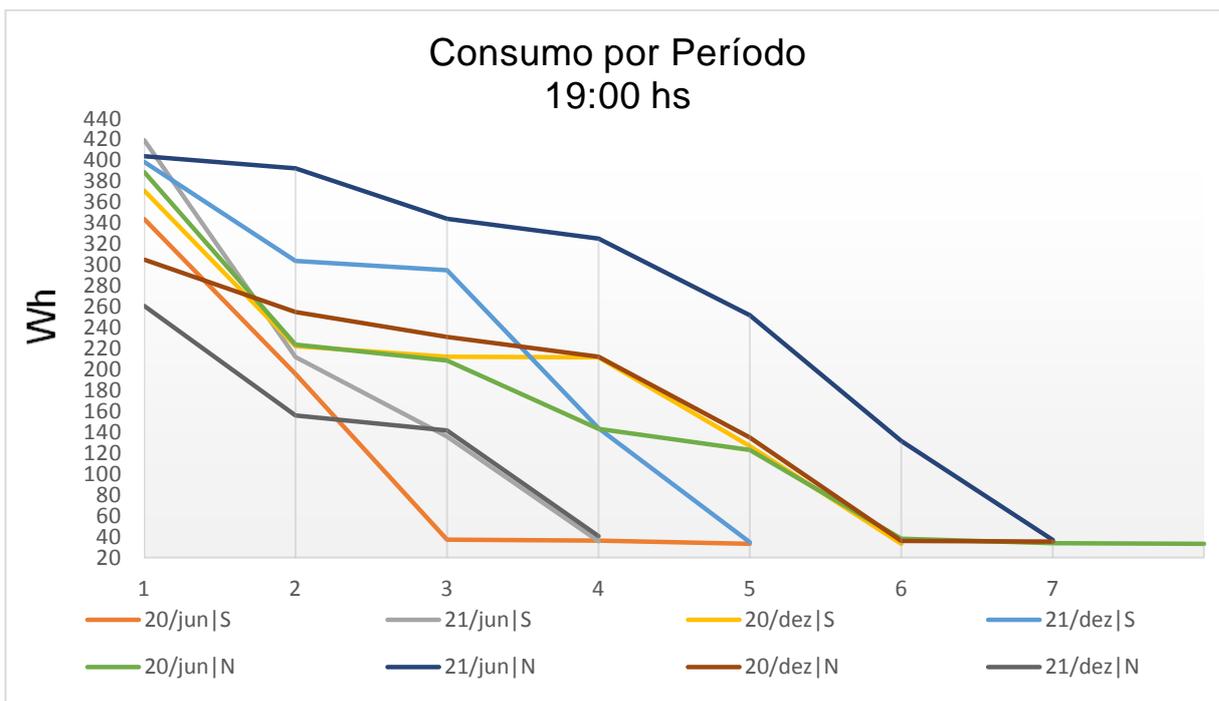


Figura 22 – Convergência melhor valor às 19:00 horas.

Fonte: Autor.

Na Tabela 23, 24, 25 e 26 temos a avaliação do consumo energético do sistema de otimização de iluminação COR para sala no período de um dia de uso, das 7 horas da manhã até às 23 horas da noite.

Manter Melhor		Sim	Não	Sim	Não
nPop/nGrp		100/10		24/3	
Dia Referência		20/jun			
Hora					
Wh	7:00	31,67	31,48	31,64	31,45
	8:00	30,76	30,92	31,10	30,72
	9:00	25,57	19,17	27,14	25,91
	10:00	17,76	21,63	17,98	17,62
	11:00	21,26	19,16	22,74	19,11
	12:00	19,29	17,60	18,92	17,84
	13:00	19,19	20,15	21,03	22,90
	14:00	20,64	21,35	22,02	22,73
	15:00	23,92	22,93	23,81	24,34
	16:00	25,89	25,85	26,48	26,43
	17:00	31,01	30,77	31,52	30,75
	18:00	31,73	31,48	31,65	31,65
	19:00	31,73	31,56	31,65	31,92
	20:00	31,73	31,58	31,65	31,50
21:00	31,73	31,49	31,65	31,81	
22:00	31,73	31,51	31,65	31,17	
23:00	31,73	31,47	31,65	31,26	
<b>Consumo (KWh)</b>		<b>0,457</b>	<b>0,450</b>	<b>0,464</b>	<b>0,459</b>

Tabela 23 – Avaliação do consumo de energia elétrica com otimização no dia 20 junho.

Fonte: Autor.

Manter Melhor		Sim	Não	Sim	Não
nPop/nGrp		100/10		24/3	
Dia Referência		21/jun			
Hora					
Wh	7:00	31,60	31,62	31,70	31,50
	8:00	31,04	30,54	31,02	30,91
	9:00	26,10	25,86	28,21	27,44
	10:00	23,16	23,22	23,66	24,01
	11:00	17,93	22,38	16,76	20,08
	12:00	23,09	23,09	22,47	24,80
	13:00	21,73	17,89	22,27	27,34
	14:00	23,26	23,50	23,38	22,96
	15:00	23,92	23,97	23,33	23,84
	16:00	27,39	28,01	28,27	28,21
	17:00	30,91	30,76	31,07	31,04
	18:00	31,43	31,61	31,63	31,56
	19:00	31,43	31,55	31,63	31,52
	20:00	31,43	31,63	31,63	31,61
21:00	31,43	31,60	31,63	31,75	
22:00	31,43	31,64	31,63	31,80	
23:00	31,43	31,65	31,63	31,71	
<b>Consumo (KWh)</b>		<b>0,469</b>	<b>0,470</b>	<b>0,472</b>	<b>0,482</b>

Tabela 24 – Avaliação do consumo de energia elétrica com otimização no dia 21 junho

Fonte: Autor.

Manter Melhor	Sim	Não	Sim	Não	
nPop/nGrp	100/10		24/3		
Dia Referência	20/dez				
<b>Hora</b>					
Wh	7:00	27,00	26,60	27,01	26,99
	8:00	25,11	25,11	26,09	25,20
	9:00	24,85	24,54	24,81	24,64
	10:00	22,55	23,45	23,01	23,38
	11:00	25,51	26,09	26,47	26,16
	12:00	24,94	25,07	25,36	24,91
	13:00	24,91	25,03	25,53	24,89
	14:00	25,52	26,05	28,59	26,22
	15:00	24,36	24,50	25,10	27,44
	16:00	25,75	25,73	25,86	26,20
	17:00	26,28	26,13	26,25	27,06
	18:00	29,62	29,74	29,54	30,57
	19:00	31,51	31,52	31,69	31,37
	20:00	31,51	31,45	31,69	31,63
	21:00	31,51	31,53	31,69	32,03
22:00	31,51	31,52	31,69	31,70	
23:00	31,51	31,56	31,69	31,55	
<b>Consumo (KWh)</b>		<b>0,464</b>	<b>0,466</b>	<b>0,472</b>	<b>0,472</b>

Tabela 25 – Avaliação do consumo de energia elétrica com otimização no dia 20 dezembro

Fonte: Autor.

Manter Melhor	Sim	Não	Sim	Não	
nPop/nGrp	100/10		24/3		
Dia Referência	21/dez				
<b>Hora</b>					
Wh	7:00	27,10	26,93	27,62	27,56
	8:00	25,89	25,60	27,75	26,51
	9:00	24,36	24,29	24,34	25,55
	10:00	23,51	23,79	24,86	22,96
	11:00	22,04	22,31	24,51	22,96
	12:00	22,89	26,94	24,87	24,16
	13:00	25,34	25,06	25,64	25,92
	14:00	24,67	24,72	25,22	27,56
	15:00	25,97	26,56	27,37	27,34
	16:00	24,50	24,37	25,17	26,61
	17:00	27,29	27,11	27,72	28,47
	18:00	29,88	30,11	30,18	29,55
	19:00	31,68	31,73	31,60	31,72
	20:00	31,68	31,41	31,60	31,69
	21:00	31,68	31,42	31,60	31,61
22:00	31,68	31,55	31,60	31,54	
23:00	31,68	31,59	31,60	31,21	
<b>Consumo (KWh)</b>		<b>0,462</b>	<b>0,465</b>	<b>0,473</b>	<b>0,473</b>

Tabela 26 – Avaliação do consumo de energia elétrica com otimização no dia 21 dezembro

Fonte: Autor.

Usando como base o consumo do dia 20 e 21 junho (0,457, 0,469) Kwh para os seis meses do ano e 20 e 21 de dezembro (0,464, 0,462) Kwh para os outros seis meses,utilizando o ambiente pelos sete dias da semana, temos um consumo anual desta sala. Chegamos ao consumo de 169,00 Kwh.

O algoritmo de otimização COR se mostrou eficiente na otimização do consumo energético de iluminação para este caso, levando em consideração a participação da luz natural na iluminação das estações de trabalho. A utilização do algoritmo de otimização, no sistema de iluminação se torna mais eficiente e se enquadra na classificação de etiquetagem nível A, pelo uso da divisão dos circuitos, aproveitamento da luz natural e desligamento automático do sistema de iluminação.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma solução baseada em um algoritmo meta-heurístico bioinspirado para redução do consumo de energia de um sistema de iluminação em escala reduzida e de um sistema simulado baseado em um ambiente real. Uma versão modificada do algoritmo *Competition Over Resources* (COR) foi proposta e melhorias no desempenho do algoritmo foram feitas.

Para realizar as simulações foram utilizados o software *DIALux* para criar o ambiente e capturar os pontos de incidência da lux artificial, o *Sketchup* para criar o ambiente em 3D do local e fazer a integração com o software *DaySim*. O *Daysim* simula a iluminação natural com ajuda do arquivo climático da cidade de Curitiba.

No protótipo em escala reduzida apresentou uma solução de um sistema em tempo real, modificação do algoritmo *Competition Over Resources* foi proposta e melhorias no desempenho do algoritmo foram feitas usando um procedimento de dois estágios: *i)* com sete funções de *benchmark* clássicas; *ii)* dados retirados de uma planta piloto. A estratégia “manter o melhor” permitiu uma avaliação mais realista do impacto da contribuição das modificações do algoritmo proposto para a melhoria da eficiência energética.

Na aplicação em escala real o sistema se tornou mais complexo pelo tamanho do ambiente de estudo, quantidade de fontes de luz, e influência da fonte de luz natural. Usando a estratégia de “manter o melhor” a aplicação se tornou mais rápida comparada ao não uso, ao qual verifica se tem incidência de luz natural em um dos pontos de trabalho. Outra vantagem no seu uso é o equipamento que não necessita de mais processamento, a aplicação mantém o último valor nos pontos de trabalho.

Ao avaliar o consumo energético com o algoritmo de otimização comparado com o sistema utilizado, observa-se uma economia relevante no período de vinte dois dias úteis, tanto econômico quanto ambiental. Se a implantação do sistema for feita a sala se enquadraria na Eficiência Energética para sistema de iluminação (RTQ-C) nível A, estando de acordo com as normas de ambiente de trabalho.

O consumo energético reduziu quando comparado ao sistema de iluminação convencional. A implantação do sistema de otimização se mostrou vantajoso quando instalado em toda edificação, tendo uma economia considerável de energia elétrica.

Estudos adicionais para as potenciais evoluções do algoritmo COR em pesquisas futuras:

1. Testar outros métodos de otimização;
2. Aumentar a complexidade do problema;
3. Integrar sua proposta a um ambiente real e avaliar em casos práticos os efeitos no consumo de energia;
4. Modelos de ajustes para cada necessidade do usuário;
5. Integrar a técnica em uma ferramenta computacional que simule sistemas de iluminação;
6. Avaliar a generalidade do método proposto em diferentes ambientes de edificações levando-se em conta diferentes sistemas de iluminação;
7. Implementar uma solução em hardware para o problema com foco em reduzir o tempo da otimização.

## REFERÊNCIAS

ADRIANA P. C., LUCILA L., ROSANA M. C., ADMIR B., MAURO R. **Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral**, 2003.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR ISO/CIE 8995-1:Iluminação de ambiente de trabalho, interior**, 2013.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 5461 NBR3:Iluminação**, 1991.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT)**. Comitê Brasileiro de Construção Civil. Comissão de Estudo de Desempenho Térmico de Edificações.

Desempenho Térmico de Edificações – Parte 1:Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro,1998a.

**Desempenho Térmico de Edificações –Parte 2: Métodos de Cálculo da Transmitância Térmica, da Capacidade Térmica, do Atraso Térmico e do Fator de Calor Solar de Elementos e Componentes de Edificações**. Rio de Janeiro,1998b.

A. PANDHARIPANDE, D. CAICEDO, **Smart indoor lighting systems with luminaire-based sensing: A review of lighting control approaches**, *Energy Build*, 2015.

BLEICHER THOMAS. **Radiance for Lighting Designers**, 2010.Disponível em: [https://www.radiance\\_online.org/community/workshops/2006leicester/Presentations/Thomas%20Bleicher.pdf](https://www.radiance_online.org/community/workshops/2006leicester/Presentations/Thomas%20Bleicher.pdf). Acessado em 16 de fevereiro de 2017.

BONALI, NATALE. **A história da iluminação artificial**. São Paulo. Editora: Abilux, 2001.chipKIT Max32 Board Reference Manual, 2011. Disponível em: <[http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/chipkit%20max32\\_rm.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/chipkit%20max32_rm.pdf)>. Acessado em 16 de maio de 2017.

BOYD, VANDENBERGHE, L. **Convex Optimization**. New York, USA: Cambridge University Press, 2004.

CHEW, KALAVALLY, N.W. OO, PARKKINEN, **Design of an Energy Saving Controller for an Intelligent Lighting System**, *Energy Build*, 2016.

CARAM, R.M. **Caracterização ótica de materiais transparentes e sua relação com o conforto ambiental em edificações**. 1998. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

C. Yin, B. Stark, Y. Chen, S.M. Zhong, E. Lau, **Fractional-order adaptive minimum energy cognitive lighting control strategy for the hybrid lighting system**, *Energy Build*, 2015.

CMHC D. BOUGEOIS, C. REINHART, I. MACDONALD, **Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation**, 2006.

DAYSIM. **Advanced daylight simulation software, 2016**. Disponível em: <<http://daysim.ning.com>>. Acessado em: 19 de agosto de 2016

DIALux. **Lighting design software DIALux, 2016** Disponível em: <<https://www.dial.de/en/dialux>>. Acessado em: 15 de maio de 2016.

E.-N.D. MADIAS, P.A. KONTAXIS, F. V. TOPALIS, **Application of multi-objective genetic algorithms to interior lighting optimization**, *Energy Build*, 2016.

EPE. **Balço energético nacional, 2018**. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2018.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2018.pdf)>. Acessado em: 20 de novembro 2018.

DEP. **Fundamentos da Espectroradiometria**. Disponível em: [http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0421327\\_06\\_cap\\_03.pdf](http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0421327_06_cap_03.pdf). Acessado em: 16 de abril de 2018.

FROST SULLIVAN. **Global power consumption to explode by 2030**. Disponível em: <<http://www.electricityforum.com/news/apr09/Globalelectricitydemandtoexplodeintwo decades.html>>. Acessado em: 17 de fevereiro de 2016.

WILCOXON, **Individual comparisons by ranking methods** author (s): Frank Wilcoxon publicado por: international biometric society, *Biometrics Bull.*1(1945) 80–83, <http://dx.doi.org/10.2307/3001946>.

GRYNBERG, ANAT, **Validation of Radiance**, LBID 1575, LBL Technical Information Department, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California, July 1989.

HOPKINSON, R. G., PETHERBRIDGE, P., LONGMORE, J. **Iluminação natural**. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa, 1975.

HUNG, K., SU, S. e LEE, Z. **Improving Ant Colony Optimization Algorithms for Solving Traveling Salesman Problems**. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol.11, No.4 pp. 433-442, 2007.

INMETRO, **Lâmpada Led – Inmetro**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/cartilhas/lampada-led/lampadaled.pdf>> Acessado em: 03 de dezembro de 2016.

INMETRO, **INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA**. Requisitos técnicos da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos. Rio de Janeiro, 2010.

IEE USP, **Perguntas e Respostas sobre Lâmpadas**. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/?q=pt-br/museu-virtual/perguntas-e-respostas>> Acessado em: 20 de abril de 2018.

J. YANG, M. SANTAMOURIS, S.E. LEE, **Review of occupancy sensing systems and occupancy modeling methodologies for the application in institutional buildings**, *Energy Build*, 2015.

RIGET.J, VESTERSTROM J.S., **A diversity-guided particle swarm optimizer-the ARPSO dept. comput. sci., univ. AARHUS**, Denmark, Tech. Rep. 2 (2002) 2002.

LabVIEW System Design Software, Natl. Instruments. <<http://www.ni.com/labview/#>> Acessado em: 13 de maio de 2016.

LabEEE Laboratório de Eficiência Energética em Edificação <<http://www.labeee.ufsc.br>> Acessado em:16 de fevereiro de 2017.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ª ed., Rio de Janeiro, 2014.

MARCELO R. DA BARROSA. **Princípios Fundamentais da Transferência de calor**. Disponível em:

<[http://sites.poli.usp.br/p/jesse.rebello/termo/Trabalho\\_Transcal.pdf](http://sites.poli.usp.br/p/jesse.rebello/termo/Trabalho_Transcal.pdf)> Acessado em: 19 de junho de 2018.

MÉNDEZ ECHENAGUCIA, A. CAPOZZOLI, Y. CASCONI, M. SASSONE, **The early design stage of a building envelope: Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis**, *Appl. Energy*, 2015.

M. ŞAHİN, Y. OGUZ, F. BUYUKTUMTURK, **ANN-based estimation of time-dependent energy loss in lighting systems**, *Energy Build*, 2016.

M.H. CRAWFORD, **LEDs for solid-state lighting: Performance challenges and recent advances**, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 15, 2009.

M. HAMDY, A.-T. NGUYEN, J.L.M. HENSEN, **A performance comparison of multi-objective optimization algorithms for solving nearly-zero-energy-building design problems**, *Energy Build.*121, 2016. 57–71. doi:10.1016/j.enbuild.2016.03.035

Ministério de Minas e Energia, **Balanco energético nacional - BEN 2015**. 291.

MICHAEL, **Radiative Heat Transfer**, 2ª ed., 2003.

MOHSENI, R. GHOLAMI, N. ZAREI, A.R. ZADEH, **Competition over Resources: A New Optimization Algorithm Based on Animals Behavioral Ecology**, 2014 Int. Conf. Intell. Netw. Collab. Syst., 2014: pp. 311–315. doi:10.1109/INCoS.2014.55

ANA L. PARAGINSKI. **No ritmo do relógio biológico**. Disponível em: <<https://www.ucs.br/site/revista-ucs/revista-ucs-15a-edicao/no-ritmo-do-relogio-biologico>>, 2014. Acessado em 16 de novembro de 2017.

Óptica Disponível em: <<http://www.cultura.ufpa.br/petfisica/conexaofisica/optica/008.html>> Acessado em: 08 de Março de 2017.

P.K. SOORI, M. VISHWAS, **Lighting control strategy for energy efficient office lighting system design**, *Energy Build*, 2013.

PEREIRA, Fernando O. R. **Uma metodologia para indicações de ocupação do ambiente urbano, controle da obstrução do sol e da abóboda celeste**. Departamento de Arquitetura e Urbanismo, UFSC, Florianópolis, 1994.

Portaria nº 372 / 2010 RQT nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas, 2010.

PROCEL, ENCE. **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C)**, 2010.

PROCEL. **Manual de iluminação**, 2011.

REINHART, C.F. **Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design**. Harvard University Graduate School of Design, Cambridge, 2010.

ROBERTSON, K., *Daylighting Guide for Buildings*. [S.I]: NSAA, Solterre Design,

ROBBINS, Claude L. **Daylighting, design and analysis**, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1986.

SHAN, **Optimization for heating, cooling and lighting load in building façade design**, *Energy Procedia*, 2014.1716–1725. doi:10.1016/j.egypro.2014.10.142

SILVA, CLÓVIS JOSÉ *et al.* **Manual para Aplicação do RTQ-C**. 4.1 ed, 2013.

SIMON, **Evolutionary optimization algorithms: Biologically-Inspired and Population-Based Approaches to Computer Intelligence**. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2013.

SketchUp. **The easiest way to draw in 3D you love what you do. Now love how you do it, 2017**. Disponível em: <<https://www.sketchup.com>> Acesso em: 19 de maio de 2017.

VIEIRA ROBERTA. **Lux natural no projeto arquitetônico** 2008-Disponível em: <[http://www.lumearquitetura.com.br/pdf/ed31/ed\\_31\\_Iluminacao\\_Natural.pdf](http://www.lumearquitetura.com.br/pdf/ed31/ed_31_Iluminacao_Natural.pdf)> Acessado em: 01 de abril de 2017.

YANG, **Introduction to mathematical optimization: from linear programming to metaheuristics**, Cambridge International Science Publishing, 2008. [http://f3.tiera.ru/2/M\\_Mathematics/MOc\\_Optimization\\_and\\_control/Yang X.-S. Introduction to mathematical optimization \(Cambridge ISP, 2008\)\(ISBN1904602827\)\(O\)\(161s\)\\_MOc\\_.pdf](http://f3.tiera.ru/2/M_Mathematics/MOc_Optimization_and_control/Yang_X.-S.Introduction_to_mathematical_optimization_(Cambridge_ISP,2008)(ISBN1904602827)(O)(161s)_MOc_.pdf) \n <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1569195>.

YANG, KOZIEL, **Computational Optimization and Applications in Engineering and Industry**. Berlin, Germany: Springer, 2011. (Studies in Computational Intelligence, v. 359).

ZENG, QIU, SHEN, DAI, LIU, LE, **Fuzzy control of led tunnel lighting and energy conservation**, **Tsinghua Sci. Technol**, 2011.

## APÊNDICE 1

Este trabalho serviu como base para elaboração de um artigo científico publicado no periódico *Energy and Buildings*.

Mendes, L. A., Freire, R. Z., dos Santos Coelho, L., & Moraes, A. S. (2017). Minimizing computational cost and energy demand of building lighting systems: A real time experiment using a modified competition over resources algorithm. *Energy and Buildings*, 139, 108-123.