UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

PEDRO HENRIQUE REIS RIBEIRO

ESTUDO E PROPOSTA DE ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DO GALPÃO DA SAMARCO MINERAÇÃO

VITÓRIA
2023

PEDRO HENRIQUE REIS RIBEIRO

ESTUDO E PROPOSTA DE ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DO GALPÃO DA SAMARCO MINERAÇÃO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Pedro Henrique Reis Ribeiro**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

VITÓRIA
2023

PEDRO HENRIQUE REIS RIBEIRO

ESTUDO E PROPOSTA DE ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DO GALPÃO DA SAMARCO MINERAÇÃO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Pedro Henrique Reis Ribeiro**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Hélio Marcos André Antunes

Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Hilcker Scopel Damasceno

Eng. Hilcker Scopel Damasceno
Examinador

RESUMO

A iluminação é um fator essencial e indispensável em tarefas humanas, sejam estas naturais ou artificiais. O ambiente de trabalho proporciona percepção visual das tarefas e tem relação direta com os níveis de desempenho dos indivíduos. Portanto, é importante que os aspectos quantitativos e qualitativos de iluminação estejam de acordo com os estudos elaborados por especialistas e apresentados por normativas técnicas. Assim, o atendimento aos parâmetros estabelecidos torna-se indispensável, porém, em muitos ambientes de trabalho, a iluminação é mera questão de possibilitar a visualização e tem como resultado a ineficiência no trabalho e danos fisiopsíquicos aos colaboradores. Este trabalho tem como objetivo readequar o sistema de iluminação do galpão de almoxarifado da Samarco Mineração, localizada em Ponta de Ubu, Ancheita/ES, para que atenda às normas vigentes, contemplando também as modificações estruturais feitas ao longo dos anos não previstas no projeto original datado de 1995. Para o desenvolvimento deste trabalho, apresenta-se uma adequação do projeto de iluminação que, hoje encontra-se inadequado devido às mudanças funcionais e estruturais do ambiente, além de apresentar lâmpadas com baixo índice de reprodução de cores. Na coleta de dados, será feito um levantamento das condições atuais em que se encontra o sistema e um estudo aprofundado dos parâmetros e métodos indicados nas normas vigentes. Após a inspeção do local, pretende-se simular em *software* de cálculo luminotécnico o sistema atual de modo a propor novas soluções que atendam às normas vigentes e seja mais eficiente energeticamente, utilizando a estrutura existente, ou então, no pior cenário, indicar mudanças estruturais necessárias para atendimento e realizar uma análise de viabilidade econômica para a empresa.

Palavras-chave: Iluminação Industrial; Luminotécnica; Saúde do trabalhador.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Galpão da Samarco Mineração 11
Figura 2 – Loja de uniformes dentro do galpão 13
Figura 3 – Componentes do olho humano 17
Figura 4 – Curva de sensibilidade para a luz visível 17
Figura 5 – Área aparente vista pelo observador 20
Figura 6 – Curva de distribuição de intensidade luminosa 21
Figura 7 – Reator de baixo fator de potência 23
Figura 8 – Reator de alto fator de potência 23
Figura 9 – Starter 25
Figura 10 – Lâmpada incandescente convencional 27
Figura 11 – Lâmpada halógena 28
Figura 12 – Lâmpada fluorescente 29
Figura 13 – Lâmpada de vapor de mercúrio 30
Figura 14 – Lâmpada de vapor de sódio 31
Figura 15 – Lâmpada de vapor metálico 31
Figura 16 – Lâmpada de luz mista 32
Figura 17 – Lâmpada de LED 33
Figura 18 – Definição das áreas de trabalho em um escritório 35
Figura 19 – Distribuição das uniformidades 36
Figura 20 – Tamanho da malha em função das dimensões do plano de referência . . 41
Figura 21 – Ângulo de corte 42
Figura 22 – Luxímetro THDLA-500 47
Figura 23 – Luminárias com lâmpadas queimadas 51
Figura 24 – Malha de pontos de cálculo para o almoxarifado 53
Figura 25 – Medidas de iluminância do almoxarifado 54
Figura 26 – Medidas de iluminância da ferramentaria 54
Figura 27 – Medidas de iluminância das lojas 54
Figura 28 – Vista externa do edifício 57
Figura 29 – Vista interna do edifício 57
Figura 30 – Malha de pontos do almoxarifado 58
Figura 31 – Malha de pontos das lojas 58
Figura 32 – Malha de pontos da ferramentaria 59
Figura 33 – Simulação de 38 das 48 lâmpadas SON-H 350W em funcionamento . . 59
Figura 34 – Simulação de 48 lampadas SON-H 350W em funcionamento 61
Figura 35 – Corredor de depósito da loja de uniformes 61
Figura 36 – Ambiente simulado do galpão com lâmpadas LED 63

Figura 37 – Distribuição das luminárias LED 64
Figura 38 – Pontos calculados para a malha do almoxarifado 64
Figura 39 – Pontos calculados para a malha da ferramentaria 65
Figura 40 – Pontos calculados para a malha das lojas 65
Figura 41 – Projeção de custos com energia elétrica 69
Figura 42 – Tempo de retorno do investimento 70
Figura 43 – Planta baixa do galpão 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lâmpadas de acordo com a sua temperatura de cor correlata (TCC) . 37
Tabela 2 – Planejamento dos ambientes, tarefas e atividades com a especificação da iluminância, limitação de ofuscamento e qualidade da cor 38
Tabela 3 – Tamanho das malhas 39
Tabela 4 – Ângulos mínimos para o método do ângulo de corte 42
Tabela 5 – Divisão de grupos de iluminância média e IRC, conforme ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 45
Tabela 6 – Dimensão das áreas de trabalho do galpão 46
Tabela 7 – Dados técnicos da lâmpada SON-H 350W 51
Tabela 8 – Dimensão do galpão e da malha e quantidade de pontos de medição para cada ambiente 53
Tabela 9 – Iluminâncias e uniformidade medidas do galpão 55
Tabela 10 – Resultados da primeira simulação 60
Tabela 11 – Resultados da segunda simulação 60
Tabela 12 – Resultados da terceira simulação 62
Tabela 13 – Dados técnicos da lampada BY518P LED260 187W 62
Tabela 14 – Resultados da quarta simulação 63
Tabela 15 – Dados técnicos das lâmpadas BY518P LED210 154W e LEDtube 840 T8C 18W 64
Tabela 16 – Resultados da quinta simulação 66
Tabela 17 – Comparativo de custos com energia elétrica entre a situação atual e proposta 67
Tabela 18 – Comparativo de custos com energia elétrica entre a situação atual e proposta 68
Tabela 19 – Custo total de implementação do novo sistema 69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CIE	*Commission Internationale de l'Eclairage*
DIALux	Software Simulador de Ambientes para Iluminação
ISO	*International Organization for Standardization*
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LED	*Light Emitting Diode*
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UGR	*Unified Glare Rating*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO . . . 11
1.1 Justificativa . . . 13
1.2 Objetivo Geral . . . 14
1.3 Objetivos Específicos . . . 14
1.4 Organização do Trabalho . . . 14

2 REFERENCIAL TEÓRICO . . . 16
2.1 Iluminação . . . 16
2.2 Visão Humana . . . 16
2.2.1 Campo de visão . . . 17
2.2.2 Acomodação . . . 18
2.2.3 Adaptação . . . 18
2.2.4 Fadiga visual . . . 18
2.3 Conceitos Luminotécnicos . . . 18
2.3.1 Fluxo Luminoso (ϕ) . . . 18
2.3.2 Intensidade Luminosa (I) . . . 19
2.3.3 Iluminância (E) . . . 19
2.3.4 Luminância (L) . . . 19
2.3.5 Eficiência Luminosa (η) . . . 20
2.3.6 Curva de distribuição luminosa . . . 21
2.3.7 Temperatura de cor correlata (TCC) . . . 21
2.3.8 Índice de reprodução de cor (IRC) . . . 22
2.4 Dispositivos de Controle . . . 22
2.4.1 Reatores . . . 22
2.4.1.1 Reatores Eletromagnéticos . . . 23
2.4.1.2 Reator Eletrônico . . . 24
2.4.1.3 Starter . . . 24
2.4.1.4 Ignitores . . . 24
2.5 Tipos de lâmpadas . . . 25
2.5.1 Lâmpada Incandescente . . . 26
2.5.1.1 Lâmpada Incandescente Convencional . . . 26
2.5.1.2 Lâmpada Halógena . . . 27
2.5.2 Lâmpada de Descarga . . . 28
2.5.2.1 Lâmpada Fluorescente . . . 28
2.5.2.2 Lâmpada de Vapor de Mercúrio . . . 29
2.5.2.3 Lâmpada de Vapor de Sódio . . . 30

2.5.2.4 Lâmpada a Vapor Metálico . . . 31
2.5.3 Lâmpada de Luz Mista . . . 31
2.5.4 Lâmpada de LED (Light Emitter Diode) . . . 32
2.6 Iluminação em Interiores de Ambientes de Trabalho . . . 33
2.6.1 Área de Tarefa e Entorno Imediato . . . 34
2.6.2 Iluminância e Uniformidade . . . 34
2.6.3 Ofuscamento . . . 35
2.6.4 Aspectos da Cor . . . 37
2.6.5 Planejamento da Iluminação . . . 38
2.7 Verificação . . . 39
2.7.1 Iluminância . . . 39
2.7.2 Ofuscamento . . . 41
2.8 Considerações finais . . . 42

3 PROPOSTA . . . 44
3.1 Divisão de áreas de tarefa e de trabalho . . . 45
3.1.1 Requisitos de iluminação para os ambientes . . . 45
3.2 Verificação dos níveis de iluminância pelo método das malhas . . . 46
3.2.1 Equipamento utilizado para medição . . . 46
3.2.2 Metodologia para realização das medições . . . 46
3.3 Análise de viabilidade econômica . . . 48
3.3.1 Custo de Aquisições e Manutenções das Lâmpadas . . . 48
3.4 Considerações finais . . . 48

4 RESULTADOS . . . 50
4.1 Inspeção realizada no sistema de iluminação atual . . . 50
4.1.1 Iluminância do sistema atual . . . 51
4.2 Simulação de cenários alternativos e propostas . . . 55
4.2.1 Ambiente de simulação . . . 56
4.2.2 Primeiro cenário . . . 57
4.2.3 Segundo cenário . . . 60
4.2.4 Terceiro cenário . . . 62
4.2.5 Quarto cenário . . . 62
4.2.6 Quinto cenário . . . 63
4.2.7 Considerações finais . . . 66
4.3 Análise de viabilidade econômica . . . 67

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS . . . 71
5.1 Conclusão . . . 71
5.2 Trabalhos Futuros . . . 71

REFERÊNCIAS 73

APÊNDICE A – PLANTA BAIXA ESTRUTUAL DO GALPÃO . . 75

1 INTRODUÇÃO

A iluminação artificial tem seu surgimento na luz produzida pelo fogo da queima de madeiras. Desde então, os avanços básicos em tecnologia proporcionaram diversas fontes como velas e lamparinas que até hoje são utilizadas, caso não exista um acesso à energia elétrica próximo (BOYCE, 2003). Em 1879, Thomas Edson apresenta sua contribuição significativa com a lâmpada incandescente e a partir de sua invenção, os sistemas de iluminação se desenvolveram rapidamente e em 1962 começaram a surgir lâmpadas de vapor de sódio com alta eficiência luminosa e longa durabilidade. No início dos anos 2000, a lâmpada de LED chega revolucionando o mercado de iluminação com vida útil de até 17 anos e baixo consumo de energia elétrica (ZANQUINI, 2021).

A iluminação por energia elétrica provida em ambientes de trabalho permite que as pessoas enxerguem para realizar suas atividades com rapidez, precisão e facilidade (BOYCE, 2003). Para FILHO (2010), os ambientes de trabalho industriais devem ser suficientemente iluminados com o intuito de se obter o melhor rendimento possível nas tarefas a executar, bem como para garantir a segurança dos funcionários. Mostra-se na Figura 1 o galpão do antigo almoxarifado da Samarco que hoje é utilizado para diversas outras finalidades.

Figura 1 – Galpão da Samarco Mineração

Fonte: Produção do próprio autor.

No ambiente de trabalho, seja para qualquer ramo de atividade, a Norma Regulamentadora nº 17 - Ergonomia (2022), levando em consideração a saúde e bem estar dos trabalhadores, estabelece que, todos os locais de trabalho devem ter iluminação, seja natural ou artificial, geral ou suplementar, apropriada à natureza da atividade. De acordo com Association et al. (2008), analisando a segurança e a saúde dos funcionários, é possível afirmar que a

iluminação adequada é essencial para qualquer empresa, pois, permite que os empregados vejam adequadamente o que estão fazendo, sem esforço para os olhos e o corpo. Além disso, torna o trabalho mais fácil e produtivo, chamando atenção para operações e equipamentos perigosos, auxiliando e prevenindo erros custosos e acidentes. Boyce (2003) também complementa afirmando que além de garantir que os trabalhadores enxerguem suas tarefas e as executem com mais facilidade, rapidez e precisão, também impacta o humor, bem como as relações interpessoais no trabalho e consequentemente em satisfação profissional.

A qualidade da iluminação no trabalho é fundamental para o bem estar físico e mental dos colaboradores. Para isto, deve-se seguir as orientações das normas regulamentadoras, possibilitando que as pessoas desempenhem tarefas visuais de maneira eficiente, precisa e segura. De acordo com a norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1, a prática de uma boa iluminação para locais de trabalho é muito mais que apenas fornecer uma boa visualização da tarefa e deve satisfazer os aspectos quantitativos e qualitativos exigidos pelo ambiente.

A Samarco Mineração é uma empresa brasileira, criada em 1973, com sede em Belo Horizonte - MG. Atua nos processos de extração de minério, transporte e pelotização. A área de estudo deste trabalho se dará no galpão do antigo almoxarifado da empresa situado na unidade da Samarco Mineração em Ponta de Ubu, Anchieta - ES.

O atual sistema de iluminação do galpão da Samarco Mineração foi projetado em 1995, e com a finalidade de almoxarifado. Com a expansão da empresa e a criação de novas usinas de pelotamento, exigiu-se uma mudança de logística e de característica no galpão. Mostra-se na Figura 2 as prateleiras instaladas para a loja de uniformes, sendo esta uma das novas atribuições do ambiente.

Figura 2 – Loja de uniformes dentro do galpão

Fonte: Produção do próprio autor.

Portanto, a proposta deste projeto de graduação é adequação do sistema de iluminação do galpão às normas vigentes, visando obter uma instalação com desempenho adequado, respeitando as normas e regulamentações vigentes, prezando pela saúde e segurança ocupacional dos colaboradores.

1.1 Justificativa

O interesse em desenvolver esse estudo surgiu a partir da observação obtida com a vivência como estagiário da Samarco nas proximidades do galpão. O projeto original elaborado em 1995 contemplava a iluminação para a execução de tarefas de armazenamento de peças de reposição. Com o desenvolvimento da empresa e o surgimento de novas demandas, o local sofreu alterações estruturais e funcionais, porém para o local não foi elaborado um projeto luminotécnico de adequação. Além disso, o local encontra-se com a iluminação artificial deficiente devido às várias lâmpadas queimadas conforme a Figura 1 e tecnologia das lâmpadas utilizadas com baixo rendimento luminoso (lâmpadas de vapor de sódio). Concomitante a isso, as telhas translúcidas da cobertura estão ofuscadas (amareladas) devido às variações climáticas e tempo de exposição ao sol, reduzindo ou até mesmo retirando uma parcela da contribuição da luz natural na iluminação da instalação.

A iluminação inadequada exige um maior esforço visual dos trabalhadores que precisam

identificar ferramentas e peças específicas. Há relatos dos funcionários da loja de uniformes, uma das atividades exercidas no local, que em dias nublados, ou seja, com pouca incidência de luz natural, necessita-se da utilização da lanterna do celular para a leitura das etiquetas das peças. Também existe o risco de acidentes de trabalho com o içamento de cargas pesadas. É importante que o projeto de iluminação esteja adequado aos aspectos quantitativos e qualitativos estabelecidos na ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013, visto que esta reflete um consenso técnico sobre o assunto. Portanto, o presente estudo se faz necessário, pois servirá de base para os responsáveis pela infraestrutura da empresa na adequação que deve ser realizada na iluminação do ambiente de modo que possa garantir a saúde e segurança dos colaboradores.

1.2 Objetivo Geral

Readequar o sistema de iluminação do galpão de almoxarifado e ferramentaria da Samarco Mineração localizado em Ubu, Ancheita/ES.

1.3 Objetivos Específicos

- Avaliar os níveis de iluminância do local conforme metodologia descrita na ABNT NBR ISO/CIE 8995-1;
- Comparar através de modelagem em *software* de cálculo luminotécnico o cenário de iluminação atual com base nas especificações de projeto e medições no local;
- Determinar novas propostas com a troca das lâmpadas e/ou luminárias para uma tecnologia mais atual e com maior eficiência energética possível e examinar o atendimento às normas vigentes sem comprometer as instalações elétricas do local;
- Propor solução com base nas simulações e fazer um levantamento dos custos e avaliação de viabilidade econômica.

1.4 Organização do Trabalho

Para facilitar a leitura desse trabalho, este foi dividido em cinco capítulos, da seguinte forma:

- Capítulo 1: uma introdução acerca do problema que motivou a realização desse trabalho e estabelece o objetivo;
- Capítulo 2: apresenta uma breve introdução sobre conceitos luminotécnicos, tipos de lâmpadas, dispositivos de controle, normativa ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 que trata sobre iluminação em ambientes internos de trabalho vigente e métodos de avaliação de eficácia econômica de projetos luminotécnicos;
- Capítulo 3: traz a metodologia aplicada para avaliação de um sistema de iluminação e avaliação de custos de projetos de adequação;
- Capítulo 4: apresenta a inspeção realizada no galpão de almoxarifado da Samarco Mineração S.A. e apresenta simulações realizadas no DIALux de diversos cenários e propostas de melhoria;
- Capítulo 5: traz as conclusões do estudo, definindo qual a melhor proposta de adequação e economicamente viável para a empresa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Iluminação

A iluminação tem sofrido algumas mudanças ao longo dos anos. De acordo com Lam (1986) e Baker et al. (1993), após a introdução no mercado das lâmpadas fluorescentes em meados da década de 1950 houve uma rápida implementação deste tipo de luz artificial nas edificações, tornando-se o sistema preferencial de iluminação independentemente da luz natural disponível. Tal processo, já havia sido experimentado em 1879, quando a descoberta da lâmpada incandescente iniciou o processo utilização de fontes artificiais em detrimento aos sistemas de iluminação natural.

O bom desempenho de um sistema de iluminação depende de cuidados que se iniciam no projeto elétrico, envolvendo informações sobre luminárias, perfil de utilização, ou tipo de atividade a ser exercida (FILHO, 2010).

Os recintos industriais devem ser suficientemente iluminados para se obter o melhor rendimento possível nas tarefas a executar e o nível de detalhamento destas por sua vez exige um nível de iluminamento adequado para se ter uma percepção visual apurada (FILHO, 2010).

É importante que o projeto de iluminação adote os seguintes critérios (FILHO, 2010):

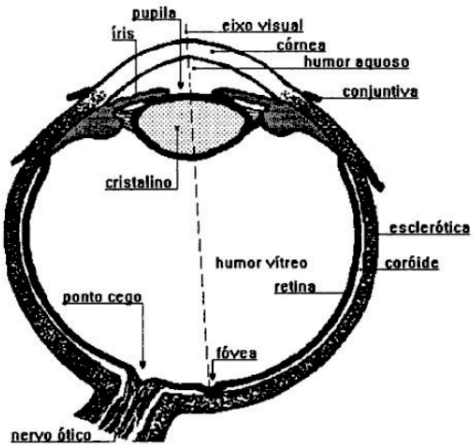
- nível de iluminamento suficiente para cada atividade específica;
- distribuição espacial da luz sobre o ambiente;
- escolha da cor da luz e seu respectivo rendimento;
- escolha apropriada dos aparelhos de iluminação;
- tipo de execução das paredes e pisos;
- iluminação de acesso.

2.2 Visão Humana

A visão é o sentido no qual ocorre a captação de luz pelo olho, com a transformação desta em impulsos elétricos através da retina e a leitura da informação feita pelo cérebro no qual

é gerada a imagem, sendo o sentido que responde por cerca de 75% da percepção humana. A partir do mecanismo da visão o ser humano consegue ter noções de espaço, dimensões, cores, textura e todas informações que compõem o ambiente que o cerca (RAMOS, 2006).

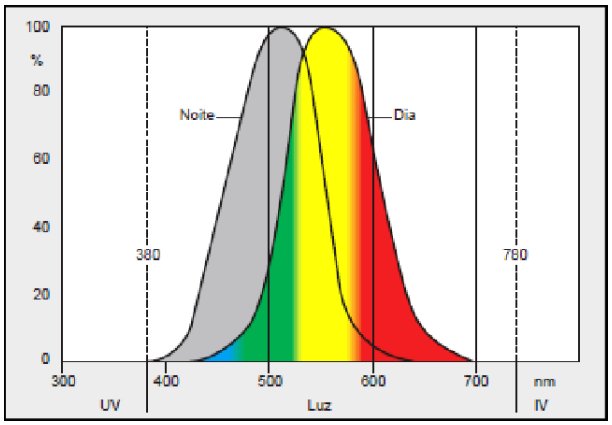
Figura 3 – Componentes do olho humano



Fonte: Corrêa da Costa (2006, p.45)

A luz é uma radiação eletromagnética que produz uma sensação visual. O espectro da luz visível compreende a faixa de 380 nm até 780 nm de comprimento de onda. A sensibilidade visual varia para cada comprimento de onda e, também para a luminosidade. Mostra-se na Figura 4 a curva de sensibilidade do olho para o espectro da luz visível (OSRAM, 2005).

Figura 4 – Curva de sensibilidade para a luz visível



Fonte: Osram (2005).

2.2.1 Campo de visão

O campo de visão é a área que pode ser visualmente percebida com a visão de cada olho e a região espacial binocular. Na horizontal, a visão binocular tem uma abertura de aproximadamente 120º e já na vertical 70º para baixo e 60º para cima na condição de olhos e cabeça parados (COSTA, 2006).

2.2.2 Acomodação

A acomodação visual é o processo contínuo que permite que o olho foque a imagem do objeto visualizado na retina. A contração dos músculos ciliares provocam uma mudança na curvatura do cristalino e, assim, ajusta o foco quando há uma mudança na distância do objeto. Este processo pode ser rápido no caso de mudar o foco de um local para o outro ou devagar ao acompanhar objetos em movimento (BOYCE, 2003).

2.2.3 Adaptação

O sistema visual humano consegue processar informações em cerca de 12 unidades logarítmicas de variações de luminância, mas não ao mesmo tempo (BOYCE, 2003). A adaptação visual é um processo de ajuste constante e está intimamente ligado com a abertura e fechamento da pupila devido à mudança de iluminação na retina. Na presença de muita luz, a pupila se contrai, focando a imagem na região central da retina e na ausência, a imagem é formada na periferia, sem foco (BOYCE, 2003; COSTA, 2006).

2.2.4 Fadiga visual

A fadiga visual é consequência de intenso esforço dos olhos para manter o foco durante longos períodos de tempo. Ambientes de trabalho com baixa iluminação, alta luminância, reflexos no campo de visão e tremores da iluminação artificial agravam a fadiga visual. Seus principais sintomas são ardência e irritação nos olhos, dores de cabeça e nos olhos e visão turva (PESSOAS, 2020).

2.3 Conceitos Luminotécnicos

2.3.1 Fluxo Luminoso (ϕ)

O fluxo luminoso é uma grandeza fotométrica e está estreitamente ligado com a capacidade do ser humano de enxergar. É a potência associada com o estímulo que provoca na visão resultante da energia radiante emitido por uma fonte de luz. Sua unidade é o lúmen (lm) (COSTA, 2006).

O fluxo luminoso não pode ser expresso em Watts, mesmo sendo uma potência luminosa, pois a sua grandeza está associada a um estímulo visual e a sensibilidade do olho humano reage de forma diferente para cada comprimento de onda da radiação (COSTA, 2006).

2.3.2 Intensidade Luminosa (I)

A intensidade luminosa é definida como sendo a razão do fluxo luminoso emitido por uma fonte luminosa e propaga no elemento de ângulo sólido em determinada direção e é dado pela Equação (2.1). Sua unidade é o candela (cd) (COSTA, 2006).

$$I = \frac{d\phi}{d\beta} \quad \text{(cd)}. \tag{2.1}$$

Pode ser definido também como sendo a potência de radiação visível que uma determinada fonte de luz emite em uma direção específica. Para exemplificar, tomemos que se uma determinada fonte de luz dentro de uma esfera de raio de 1 metro emita em todas as direções uma intensidade luminosa de 1 candela, então, cada metro quadrado da superfície desta esfera será iluminado pelo fluxo luminoso de 1 lúmen (FILHO, 2010).

2.3.3 Iluminância (E)

A iluminância é o fluxo luminoso incidente numa superfície por unidade de área, conhecida também como nível de iluminamento. Sua unidade é o lux (lx). A nomenclatura dessa grandeza definido pelo INMETRO é iluminamento, oriundo da tradução francesa de *éclairement* (COSTA, 2006).

A Equação (2.2) apresenta o cálculo de iluminância.

$$E = \frac{\phi}{A} \quad \text{(lux)} \tag{2.2}$$

Onde:
ϕ: fluxo luminoso (lúmens);
A: área da superfície iluminada (m^2).

2.3.4 Luminância (L)

A luminância é um dos conceitos mais abstratos apresentados pela luminotécnica, sendo entendido como uma medida da sensação de claridade provocada por uma fonte luminosa ou a superfície iluminada e avaliada pelo cérebro (FILHO, 2010).

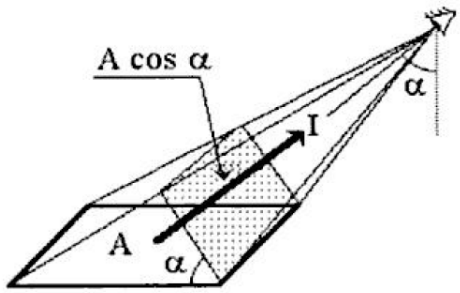
Por definição, a luminância é a relação entre a intensidade luminosa incidente num elemento de superfície que contém determinado ponto e a área aparente. A área aparente é aquela vista pelo observador conforme mostra-se na Figura 5. Sua unidade é cd/m² (COSTA, 2006).

A Equação (2.3) apresenta o cálculo de luminância.

$$L = \frac{I}{A \times \cos(\alpha)} \quad (\mathrm{cd/m^2}) \tag{2.3}$$

Onde:
I: Intensidade Luminosa (cd);
A: Área da superfície atingida pela luz (m^2);
α: Ângulo formado entre o eixo ortogonal à superfície iluminada e a direção do fluxo luminoso.

Figura 5 – Área aparente vista pelo observador



Fonte: Corrêa da Costa (2006, p.232)

2.3.5 Eficiência Luminosa (η)

Eficiência luminosa é a relação entre o fluxo luminoso emitido em lúmens por uma fonte e a potência em watts consumida por esta (FILHO, 2010). A Equação (2.4) mostra o cálculo para a eficiência luminosa.

$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad (\mathrm{lm/W}) \tag{2.4}$$

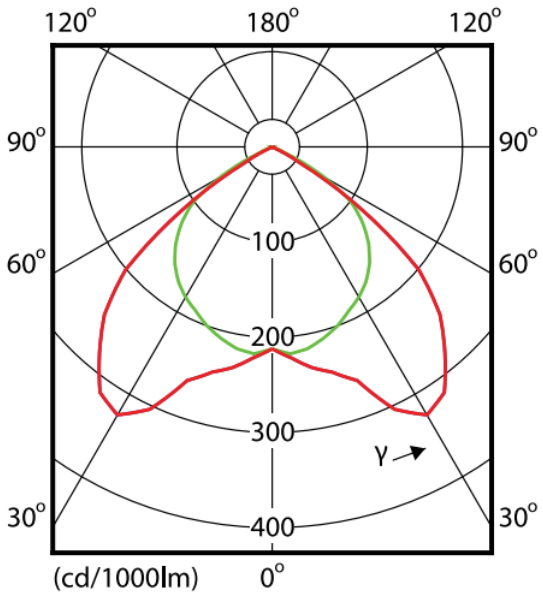
Onde:
ϕ: Fluxo luminoso (lm);
P: Potência consumida (W).

2.3.6 Curva de distribuição luminosa

A curva de distribuição luminosa é um gráfico polar que representa a intensidade luminosa em todos os ângulos em que ela é direcionado em determinado plano. Normalmente, a curva é levantada para dois planos ortogonais, sendo um transversal e um longitudinal à fonte de luz que é representada por um ponto no centro dos gráficos. Para a uniformização, comumente é expresso os valores de intensidade luminosa para um fluxo de 1000 lúmens, ou seja, cd/1000 lm (OSRAM, 2005).

A Figura 6 mostra o exemplo de uma curva de distribuição de intensidade luminosa para uma luminária com duas lâmpadas tubulares fluorescentes.

Figura 6 – Curva de distribuição de intensidade luminosa



Fonte: Philips (2010).

2.3.7 Temperatura de cor correlata (TCC)

A temperatura de cor tem a finalidade de definir a tonalidade das cores das fontes de luz. O conceito está relacionado à temperatura de trabalho de um corpo negro, de forma que a escala de temperatura Kelvin (K) é utilizada para descrever a temperatura de cor. Embora não exista na prática, alguns materiais como o tungstênio do filamento de uma lâmpada incandescente ou até mesmo o sol são considerados como corpos negros (FILHO, 2010).

Um corpo metálico ao ser aquecido, varia sua cor desde vermelha, inicialmente, até atingir um branco. Quanto mais claro o branco, semelhante à luz do sol de meio dia, cerca de

5300K, maior é a temperatura da cor (FILHO, 2010).

Quanto mais alta é a temperatura da cor, mais "fria" é a luz e, quanto mais baixa, mais "quente", tomando uma tonalidade de cor amarelada, como o da lâmpada incandescente de 2800K (FILHO, 2010). Convém destacar que a temperatura da cor não tem relação com a eficiência energética (OSRAM, 2005).

2.3.8 Índice de reprodução de cor (IRC)

Um objeto pode ser visto com diferentes cores quando iluminado sob fontes de luz diferentes, mesmo se estas tiverem tonalidades idênticas (OSRAM, 2005).

O conceito de índice de reprodução de cor (IRC ou Ra) e a sua escala qualitativa está relacionada com a capacidade das fontes de luz reproduzirem a cor verdadeira dos objetos. A referência da escala é a reprodução da cor à luz natural para o qual os olhos estão naturalmente adaptados, representando o máximo que é 100 (OSRAM, 2005).

A cor que efetivamente enxergamos dos objetos é resultado da reflexão de parte do espectro de luz incidente sobre ele. Como a distribuição, seja mais uniforme ou descontínuo, dos comprimentos de onda emitidos por uma lâmpada é intrínseco, a qualidade da reprodução das cores também é característico de cada, dentro de uma escala variando de 0 a 100 (OSRAM, 2005).

2.4 Dispositivos de Controle

São dispositivos utilizados para proporcionar a partida das lâmpadas de descarga e controlar o fluxo de corrente no seu circuito. As lâmpadas de descarga necessitam dos seguintes dispositivos para estabilização da corrente e para a ignição.

2.4.1 Reatores

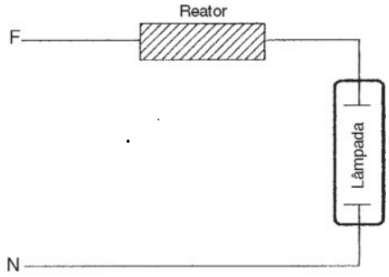
São elementos do circuito da lâmpada para a estabilização da corrente a um nível adequado de projeto da lâmpada. Os reatores se apresentam como uma reatância série do circuito da lâmpada.

Em geral lâmpadas de descarga funcionam conectadas com reatores. O fluxo luminoso emitido pela lâmpada de descarga depende do desempenho do reator, denominado fator de fluxo luminoso, conhecido ainda como ballast factor (FILHO, 2010).

Existem dois tipos de reatores:

A - Reator de Baixo Fator de Potência.

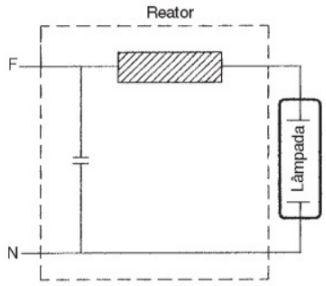
Figura 7 – Reator de baixo fator de potência



Fonte: FILHO (2010).

B - Reator de Alto Fator de Potência

Figura 8 – Reator de alto fator de potência



Fonte: FILHO (2010).

2.4.1.1 Reatores Eletromagnéticos

São de fabricação convencional, dotados de um núcleo de ferro e de um enrolamento de cobre. Existem reatores eletromagnéticos de baixo fator de potância e o reator eletromagnético de alto fator de potência, o que os difere é o reator eletromagnético de alta potência, possui um capacitor ligado em paralelo que permite elevar o fator de potência (FILHO, 2010).

2.4.1.2 Reator Eletrônico

Segundo (FILHO, 2010) este tipo de reator é constituido por três tipos de blocos funcionais:

A) Fonte: reduz a tensão da rede de alimentação e converte da frequência de 50/60 Hz em tensão contínua.

B) Inversor: converte a tensão contínua em tensão ou corrente alternada de alta frequência (variando de acordo com a lâmpada).

C) Circuito de partida e estabilização: associado normalmente ao inversor, em geral são utilizadas indutâncias e capacitâncias combinadas de forma a fornecer adequadamente os parâmetros elétricos que a lâmpada requer.

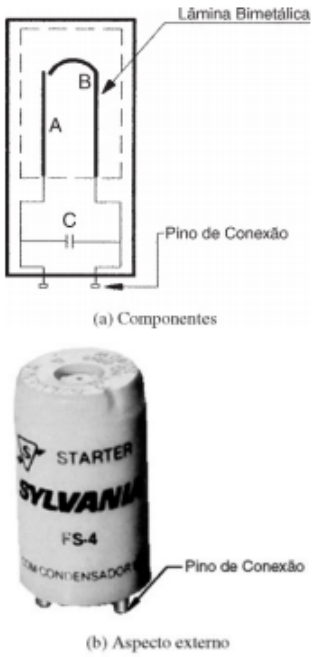
2.4.1.3 Starter

Dispositivo constituído de um pequeno tubo de vidro dentro do qual são colocados eletrodos, imersos em gás inerte que formam o arco inicial que permitirá estabelecer um contato direto entre os referidos eletrodos. Sua operação funciona da seguinte forma: ao acionar o interruptor, produz-se um arco no dispositivo de partida (*starter*) entre as lâminas, cujo o calor resultante provoca o estabelecimento do contato elétrico entre as mesmas, fazendo a corrente elétrica percorrer o circuito no qual estão inseridos os eletrodos da lâmpada, os quais se aquecem e emitem elétrons (FILHO, 2010).

2.4.1.4 Ignitores

São elementos utilizados em lâmpadas de vapor metálico e vapor de sódio e que atuam gerando uma série de pulsações de tensão elevada da ordem de 1 a 5 kV, a fim de iniciar a descarga destas, uma vez que a lâmpada inicie a sua operação, o ignitor deixa automaticamente de emitir pulsos. Existem três tipos diferentes de ignitores: ignitor de derivação, ignitor série e o ignitor paralelo.

Figura 9 – Starter



Fonte: FILHO (2010).

2.5 Tipos de lâmpadas

As lâmpadas comerciais utilizadas para iluminação são caracterizadas pela potência elétrica absorvida (W), fluxo luminoso produzido (lm), temperatura de cor (K) e índice de reprodução de cor. Em geral as lâmpadas são classificadas, de acordo com o seu mecanismo básico de produção de luz. Lâmpadas que possuem filamento convencional ou halógenas produzem luz pela incandescência, semelhante ao sol. Lâmpadas de descarga aproveitam a luminescência, assim como os relâmpagos e as descargas atmosféricas. E os diodos (LEDs) utilizam a fotoluminescência, assim como os vaga-lumes (FREITAS et al., 2009).

Existem ainda as lâmpadas mistas, que combinam incandescência e luminescência, e as fluorescentes, cuja característica é o aproveitamento da luminescência e da fotoluminescência (FREITAS et al., 2009).

Os aspectos eficiência luminosa e vida útil são os que mais contribuem para a eficiência energética de um sistema de iluminação artificial e devem, portanto, merecer grande atenção, seja na elaboração de projetos e reformas, seja na implantação de programas de conservação e uso eficiente de energia (FREITAS et al., 2009).

2.5.1 Lâmpada Incandescente

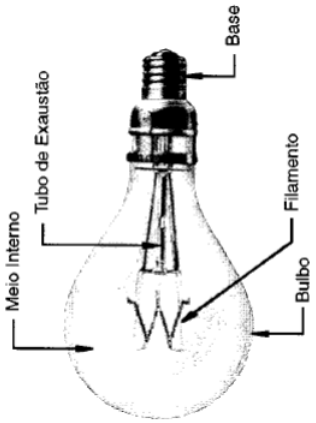
A lâmpada incandescente foi a primeira a ser desenvolvida e ainda nos dias de hoje é uma das mais difundidas. A luz é produzida por um filamento aquecido pela passagem de corrente elétrica alternada ou contínua (efeito Joule). O filamento opera em uma temperatura elevada e a luz gerada é apenas uma parcela da energia irradiada pela transição de elétrons excitados para órbitas de maior energia devido à vibração dos átomos. Este tipo de lâmpada não é mais utilizada em novos projetos industriais devido à baixa eficiência que apresenta, vida média reduzida e custos elevados de manutenção (FREITAS et al., 2009).

As primeiras lâmpadas incandescentes surgiram por volta de 1840 e utilizavam filamento de bambu carbonizado no interior de um bulbo de vidro a vácuo. Seguiram-se as lâmpadas com filamento de carbono, até que, por volta de 1909, Coolidge desenvolveu um método para tornar o tungstênio mais dúctil e adequado para a elaboração de filamentos uniformes por trefilação. A característica de emissão, as propriedades mecânicas e seu ponto de fusão elevado (3655 K), foram determinantes na escolha deste material, como sendo mais adequado na fabricação de filamentos para lâmpadas incandescentes. As lâmpadas incandescentes podem ser classificadas de acordo com a sua estrutura interna em convencionais ou halógenas (FILHO, 2010).

2.5.1.1 Lâmpada Incandescente Convencional

Este tipo de lâmpada tem seu funcionamento através da passagem da corrente elétrica pelo filamento de tungstênio, onde o aquecimento (efeito joule), gera luz. O filamento é sustentado por três ou quatro suportes de molibdênio no interior de um bulbo de vidro alcalino (que suporta temperaturas de até 370 °C) ou de vidro duro (que suporta temperaturas de até 470 °C). A oxidação neste tipo de lâmpada é evitada pela presença de um gás inerte (nitrogênio ou argônio à pressão de 0,8 atm) ou vácuo dentro do bulbo. O bulbo apresenta diversos formatos, sendo a forma de pêra a mais comum, podendo ser transparente ou com revestimento interno de fósforo neutro difusor (FILHO, 2010) figura 10.

Figura 10 – Lâmpada incandescente convencional



Fonte: FILHO (2010).

2.5.1.2 Lâmpada Halógena

A lâmpada halógena parte do mesmo princípio de funcionamento da lâmpada incandescente convencional, porém foram incrementadas com a introdução de gases halógenos (iodo ou bromo), que dentro do bulbo se combinam com as partículas de tungstênio desprendidas do filamento. Esta combinação, somada à corrente térmica dentro da lâmpada, faz com que as partículas se depositem de volta ao filamento, criando assim o ciclo regenerativo do halogênio. Porém, este ciclo só se torna eficaz em temperaturas de filamento elevadas (3200 K) e para uma temperatura da parede do bulbo externo acima de 250 °C (FILHO, 2010).

Este tipo de lâmpada apresenta algumas vantagens adicionais em relação à lâmpada incandescente convencional, como:

- Luz mais branca, brilhante e uniforme ao longo de toda vida útil da lâmpada;

- Maior eficiência energética (15 lm/W a 25 lm/W);

- Maior vida útil, variando entre 2000 a 4000 horas;

- Menor dimensão, na ordem de 10 a 100 vezes.

Figura 11 – Lâmpada halógena

Fonte: FILHO (2010).

2.5.2 Lâmpada de Descarga

Neste tipo de lâmpada, a luz é produzida pela radiação emitida pela descarga elétrica através de uma mistura gasosa composta de gases inertes e vapores metálicos. A mistura gasosa encontra-se confinada em um invólucro translúcido (tubo de descarga) em que as extremidades encontram-se inseridas nos eletrodos (hastes metálicas ou filamentos) e estes formam uma interface entre a descarga e o circuito elétrico de alimentação. A corrente elétrica da descarga é formada majoritariamente por elétrons emitidos pelo eletrodo negativo (catodo) que são acelerados por uma diferença de potencial externa em direção ao eletrodo positivo (anodo) gerando colisões com os átomos do vapor metálico (FILHO, 2010).

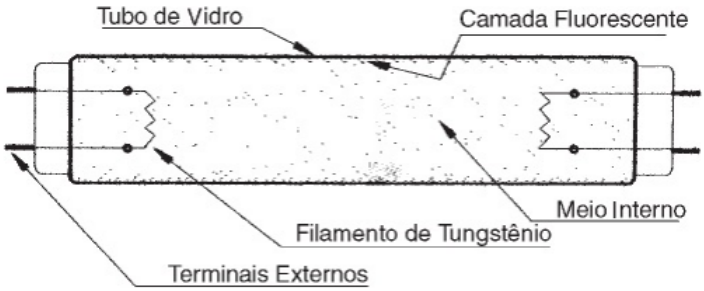
A lâmpada de descarga gera em média, dez vezes mais luz que a lâmpada incandescente para cada watt consumido. Pode ser dividida em: fluorescente, vapor de mercúrio, vapor metálico (ou multivapor metálico) e vapor de sódio. Além disso, essa lâmpada pode ser classificada de acordo com a pressão interna, como baixa pressão e alta pressão. Dentre as lâmpadas de baixa pressão, estão as fluorescentes, neon e sódio de baixa pressão (ROBERTO; SCHULTZ, 2017).

2.5.2.1 Lâmpada Fluorescente

A lâmpada fluorescente é constituída de um longo tubo de vidro, cujo o interior é revestido por uma camada de fósforo de diferentes tipos. Cada extremidade da lâmpada possui

um eletrodo de filamento de tungstênio revestido de óxido que, quando aquecido por uma corrente elétrica, libera uma nuvem de elétrons. Quando se energiza a lâmpada, os eletrodos ficam submetidos a uma tensão elevada, que resulta na formação de um arco entre os mesmos, de forma alternada. Os elétrons que constituem o o arco se chocam com os átomos do gás argônio e de mercúrio, liberando uma certa quantidade de luz ultravioleta, que ativa a camada de fósforo anteriormente referida, transformando-se em luz visível (FILHO, 2010).

Figura 12 – Lâmpada fluorescente

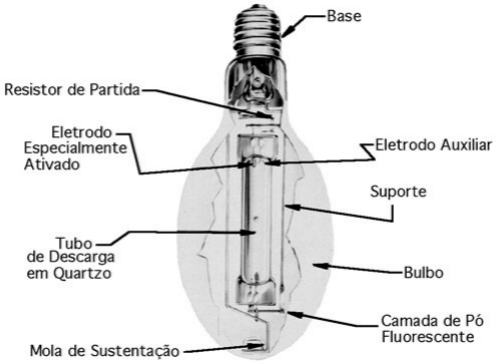


Fonte: FILHO (2010).

2.5.2.2 Lâmpada de Vapor de Mercúrio

São constituídas de um pequeno tubo de quartzo, onde são instalados nas extremidades, em geral, dois eletrodos principais e um eletrodo auxiliar ligados em série com uma resistência de valor elevado. Dentro do tubo são colocadas algumas gotas de mercúrio, juntamente com o gás inerte, como o argônio, cuja finalidade é facilitar a formação da descarga inicial. Por outro lado, o mercúrio é vaporizado durante o período de preaquecimento da lâmpada. O tubo de quartzo é colocado dentro de um invólucro de vidro contendo uma certa quantidade de azoto cuja função é a distribuição uniforme da temperatura. Ao aplicar a tensão nos terminais da lâmpada, cria-se um campo elétrico entre os eletrodos auxiliar e o principal mais próximo, provocando a formação de um arco elétrico entre os mesmos, aquecendo as substâncias emissoras de luz, o que resulta na ionização do gás e na consequente formação do vapor de mercúrio. O choque dos elétrons com os átomos do vapor de mercúrio no interior do tubo transforma sua estrutura atômica. A luz finalmente é produzida pela energia liberada pelos átomos atingidos quando retornam a sua estrutura normal. As lâmpadas a vapor de mercúrio comuns não emitem, no seu espectro, a luz vermelha, limitando o uso dessas lâmpadas a ambientes em que não haja necessidade de boa reprodução de cores. Para corrigir essa deficiência utiliza-se o fósforo em alguns tipos de lâmpadas (FILHO, 2010).

Figura 13 – Lâmpada de vapor de mercúrio



Fonte: FILHO (2010).

2.5.2.3 Lâmpada de Vapor de Sódio

A lâmpada de vapor de sódio pode ser de dois tipos de acordo com a pressão no tubo de descarga:

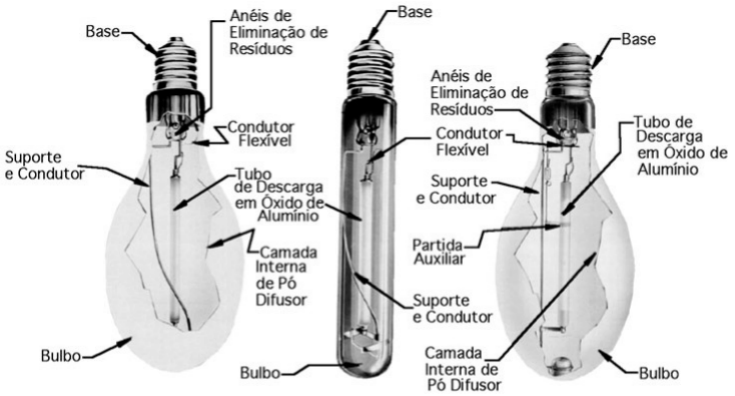
1 - Lâmpada de Vapor de Sódio de Baixa Pressão

Este tipo de lâmpada é formada por um tubo especial de vidro na forma de U no interior do qual se produz a descarga. O tubo é colocado no interior da ampola tubular de vidro que atua na proteção mecânica e no isolamento térmico e cujas as paredes internas são revestidas por uma fina camada de óxido de estanho para refletir as radiações infravermelhas produzidas durante o processo de descarga. São caracterizadas por emitir uma radiação quase monocromática (luz amarela), ter alta eficiência luminosa (em torno de 200 lm/W) e apresentar uma elevada vida útil, cerca de 18.000 horas (FILHO, 2010).

2 - Lâmpada de Vapor de Sódio de Alta Pressão

Esta lâmpada é constituída de um tubo de descarga contendo um excesso de sódio que se vaporiza durante o período de acendimento em condições de saturação. É utilizado um gás inerte em alta pressão, o xenônio, para se obter uma baixa tensão de ignição. Diferente da lâmpada de vapor de sódio a baixa pressão, este tipo de lâmpada apresenta um espectro visível contínuo, proporcionando uma razoável reprodução de cor. Sua eficiência luminosa é de 130 lm/W e sua vida útil é de cerca de 18.000 horas (FILHO, 2010).

Figura 14 – Lâmpada de vapor de sódio

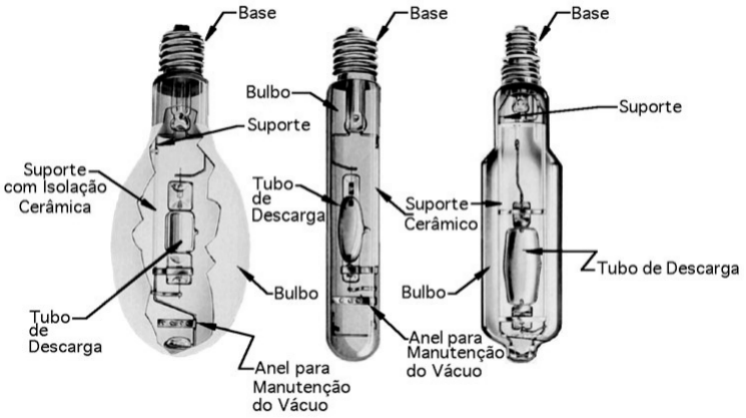


Fonte: FILHO (2010).

2.5.2.4 Lâmpada a Vapor Metálico

Neste tipo de lâmpada são adicionados iodeto de índio, tálio e sódio. A mistura adequada dos compostos citados no tubo de descarga proporciona um fluxo luminoso de excelente reprodução de cores. Apresentam elevada eficiência luminosa, vida útil longa e baixa depreciação. Apresentam forma ovoide ou tubular. A forma ovoide da lâmpada possui uma cobertura que aumenta a superfície de emissão de luz, reduzindo sua luminância. São indicadas em áreas de pátios de estacionamento, quadras esportivas, campos de futebol e galpões a produtos de exposição (FILHO, 2010).

Figura 15 – Lâmpada de vapor metálico



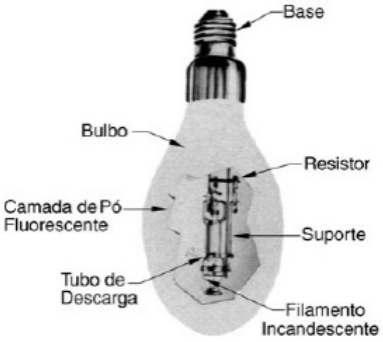
Fonte: FILHO (2010).

2.5.3 Lâmpada de Luz Mista

A lâmpada de luz mista é constituída de um tubo de descarga a vapor de mercúrio conectado em série com um filamento de tungstênio, ambos encapsulados por um bulbo

ovoide, cujas paredes internas são recobertas por uma camada de fosfato de ítrio vanadato. Este tipo de lâmpada tem as características básicas de uma lâmpada incandescente. Seu filamento atua como fonte de luz de cor quente, ao mesmo tempo em que funciona como limitador de fluxo de corrente. Este tipo de lâmpada combina a elevada eficiência das lâmpadas de descarga com as vantagens da excelente reprodução das cores das lâmpadas de filamento de tungstênio (FILHO, 2010).

Figura 16 – Lâmpada de luz mista



Fonte: FILHO (2010).

2.5.4 Lâmpada de LED (Light Emitter Diode)

O diodo emissor de Luz (LED) é um componente eletrônico semicondutor, com a mesma tecnologia utilizada nos chips de computadores, que tem a propriedade de transformar a energia elétrica em luz. Este tipo de lâmpada não utiliza filamentos metálicos, radiação ultravioleta, nem descarga de gases. É um componente bipolar com dois terminais (cátodo e ânodo) que quando polarizado, permitem a passagem de corrente elétrica, gerando luz (laboratorio de iluminação, 2012). O semicondutor presente na lâmpada de LED, quando percorrido por uma corrente elétrica, emite luz (VERLY; OLIVEIRA, 2014).

O LED elimina o calor através do dissipador de calor presente em todas as lâmpadas ou equipamentos com essa tecnologia, o que torna importante o uso de luminárias concebidas para esta finalidade. O alumínio, parte integrante do corpo de uma lâmpada de LED, é um excelente e eficiente dissipador de calor, motivo pelo qual é o mais utilizado na maioria dos produtos. A quantidade e o uso do alumínio variam em decorrência do tipo, tamanho e qualidade das lâmpadas e equipamentos. Quanto melhor for esse dissipador de alumínio, maior será a durabilidade do LED (ROBERTO; SCHULTZ, 2017).

A lâmpada de LED utiliza 82% menos energia elétrica que uma lâmpada incandescente,

gerando uma economia de consumo significativa em projetos de iluminação. Para efeito de comparação uma lâmpada doméstica de LED tem durabilidade de 50.000 horas, contra 1.000 horas de uma incandescente e 6.000 horas de uma fluorescente, o que permite diminuir consideravelmente os gastos com troca de lâmpadas ou com manutenção (VERLY; OLIVEIRA, 2014).

Figura 17 – Lâmpada de LED

Fonte: Freitas et al. (2009).

2.6 Iluminação em Interiores de Ambientes de Trabalho

A normatização da iluminação para interiores no Brasil surge em 1985 com a publicação oficial da ABNT NBR 5413 com o intuito de estabelecer os níveis de iluminamento recomendados para interiores, utilizando iluminação artificial. Desde então, esta norma sofreu algumas alterações, tendo revisões publicadas em 1969, 1982 e 1992, mas sem significativas modificações. A partir de 21 de abril de 2013, começou a vigorar a ABNT NBR ISO/CIE 8995-1, pois foi baseada na ISO/CIE 8995-1:2002 (*Lighting of indoor workspaces*), esta por sua vez já em consonância com a norma europeia EN 12464-1 (*Lighting of workplaces*), revogando a ABNT NBR 5413:1992 e a ABNT NBR 5382:1985.

Entre as normas NBR 5413 e ABNT NBR ISO/CIE 8995-1, ocorre uma mudança significativa na nomenclatura da norma, antes, exclusivamente braseileira e não possuia referência a CIE. Agora a norma segue a ISO e tornou-se norma internacional.

Frente as diferenças verificadas com a substituição da norma, pode-se citar que a ABNT NBR 5413 levava em consideração a idade, a velocidade e precisão da tarefa e a refletância de fundo para o projeto de iluminação (TÉCNICAS, 1992). A ISO 8995-1, excluiu a idade como variável de projeto. Apesar de não levar em conta a idade, a nova norma preocupa-se com os problemas gerados pelo ofuscamento (ABNT, 2013).

A ABNT NBR 5413 levava em conta apenas a iluminação geral do ambiente. A ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 define o que é tarefa e entorno imediato, diferenciando os níveis de iluminância para essas áreas. Ao contrário da norma atual, a ABNT NBR 5413 não abordava o índice de reprodução de cor e a temperatura da cor, preocupava-se apenas com os níveis de iluminância (GIACOBBO, 2014).

A realização deste estudo foi feita com base na normatização vigente, ABNT NBR ISO/CIE 8995-1, considerando os parâmetros estabelecidos pela norma para realização do estudo.

2.6.1 Área de Tarefa e Entorno Imediato

A área de tarefa é o local onde a pessoa percebe e realiza a tarefa visual de forma rápida, segura e confortável. Em locais de trabalho onde o tamanho e/ou localização da área da tarefa é desconhecida, esta então é definida onde a execução pode ocorrer. É interessante observar, além das áreas de tarefas em superfícies horizontais, as superfícies verticais como estantes e quadros, por exemplo (ABNT, 2013).

A área ao redor do local onde será realizado a tarefa é o entorno imediato. É recomendado pela norma ABNT (2013) que esta imediação seja de pelo menos 0,5 m de largura.

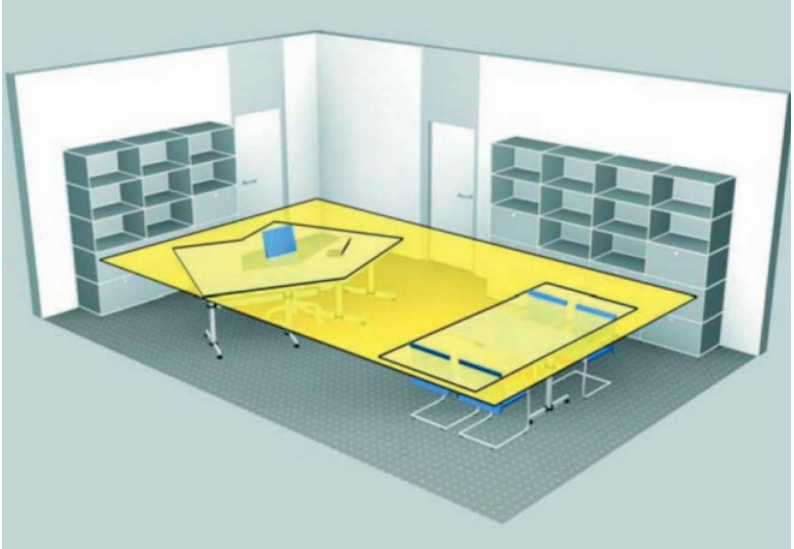
Em locais onde a área de tarefa não for conhecida ou a atividade realizada envolver várias tarefas diferentes, mas que sejam comparáveis, a norma ABNT (2013) recomenda que as diversas áreas sejam combinadas para formar uma área maior que englobe todas, denominada área de trabalho. Mostra-se na Figura 18 a área de trabalho que engloba duas áreas de tarefa individuais. Ou ainda, se o locais de trabalho forem totalmente desconhecidos, a área de trabalho deve ser considerada a sala inteira menos uma faixa marginal.

2.6.2 Iluminância e Uniformidade

A iluminância mantida sobre a área da tarefa deve ter a distribuição mais uniforme possível, sem alterações súbitas, garantindo as necessidades do desempenho e a segurança visual. Em locais onde o trabalho é realizado de forma contínua, esta iluminância mantida não pode ser menor que 200 lux (ABNT, 2013).

O fator de uniformidade da iluminância é a razão entre a iluminância mínima e a iluminância

Figura 18 – Definição das áreas de trabalho em um escritório



Fonte: ABNT 8995-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013)

média em um plano especificado, como mostra a Equação (2.5) (ABNT, 2013):

$$U = \frac{E_{\text{mín}}}{E_{\text{méd}}} \tag{2.5}$$

Onde:
$E_{\text{mín}}$: Iluminância mínima;
$E_{\text{méd}}$: Iluminância média.

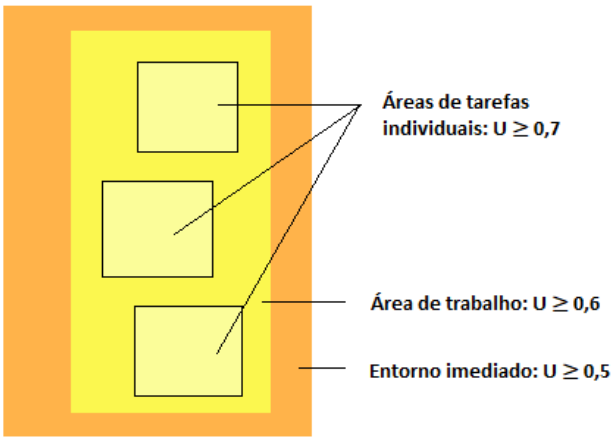
De acordo com a norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1, os valores do fator de uniformidade da iluminância não podem ser inferiores a 0,7 para as áreas da tarefa e 0,5 para os entornos imediatos. Na Figura 19, a área de trabalho é um conjunto de áreas de tarefa específicas, e, neste caso, se o fator de uniformidade da área de trabalho for maior que 0,6, garante-se que seja atendido o fator de uniformidade maior ou igual a 0,7 nas tarefas individuais.

2.6.3 Ofuscamento

O ofuscamento é percebido na presença de uma luminância muito elevada no campo de visão, forçando a piscar e olhar para outro canto ou então cobrir os olhos da fonte (BOYCE, 2003). O olho humano consegue detectar luminâncias da ordem de um milionésimo de candelas por metro quadrado (cd/m^2) até um limite um milhão de cd/m^2, onde a retina é danificada (TEIXEIRA, 2015).

Esta sensação visual desagradável pode ser provocada por áreas brilhantes ou por uma

Figura 19 – Distribuição das uniformidades



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

diferença expressiva da luminância dentro do campo de visão e pode ser classificado como inabilitador, desconfortável ou refletido (OSTERHAUS, 2005; ABNT, 2013).

O ofuscamento inabilitador é a luz difusa no olho que interrompe a visão devido à dispersão de luz intraocular (OSTERHAUS, 2005). Normalmente ocorre em ambientes externos, mas também pode ser experimentado por iluminação pontual ou fontes brilhantes intensas, como refletores e uma janela em um ambiente pouco iluminado (ABNT, 2013). O ofuscamento desconfortável, mais comum em ambientes internos, geralmente surge diretamente de luminárias brilhantes ou janelas (ABNT, 2013). Não necessariamente influencia a capacidade visual imediatamente, mas com tempo pode surtir efeitos como dores de cabeça, fadigas e perda de concentração (BELLIA; SPADA, 2014). O ofuscamento refletido ou reflexões veladoras são causadas por reflexões em superfícies especulares e podem alterar a visualização da tarefa e normalmente são prejudiciais (ABNT, 2013).

O ofuscamento desconfortável dentro de uma instalação pode ser mensurado pelo método tabular do índice de ofuscamento unificado (UGR) definido pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE). Caso a instalação seja composta por diferentes conjuntos de luminárias e/ou lâmpadas, o UGR deve ser determinado para cada uma dessas combinações e o maior valor encontrado deve ser considerado o valor típico da instalação como um todo (ABNT, 2013).

O ofuscamento pode ser causado por qualquer fonte de luz, mas os esforços para reduzir este efeito deve ser concentrado nas áreas de tarefa para garantir a segurança e conforto dos usuários (TEIXEIRA, 2015).

De acordo com a norma (ABNT, 2013), o ofuscamento refletido, que também deve ser

observados no local, pode ser eliminado ou reduzido adotando as seguintes medidas:

- distribuição de luminárias e locais de trabalho (evitando colocar luminárias na zona prejudicada);
- acabamento superficial (utilizar superfícies com materiais pouco reflexivos);
- luminância das luminárias (limite);
- aumento da área luminosa da luminária (ampliar a área luminosa);
- teto e as superfícies da parede (clarear, evitar pontos brilhantes).

2.6.4 Aspectos da Cor

As qualidades da cor da iluminação artificial próximas da cor branca são caracterizadas pela aparência e reprodução da cor (ABNT, 2013).

A aparência da cor está relacionado com a cor que a lâmpada emite e pode ser descrita pela temperatura de cor correlata (TCC). A norma ABNT (2013) não define temperatura de cores específicas, mas que esta escolha é uma questão psicológica, estética e do que é considerado natural e classifica as lâmpadas em três grupos de acordo com a sua TCC conforme mostra na Tabela 1.

Tabela 1 – Lâmpadas de acordo com a sua temperatura de cor correlata (TCC)

Aparência da cor	Temperatura de cor correlata
Quente	abaixo de 3300 K
Intermediária	3300 K a 5300 K
Fria	acima de 5300 K

Fonte: ABNT 8995-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

A reprodução das cores está relacionada com a fidelidade com que a luz emitida consegue reproduzir corretamente as cores do ambiente, dos objetos e da pele humana. É recomendado que não seja utilizado lâmpadas com Ra inferiores a 80 em locais do ambiente de trabalho onde as pessoas permanecem por longos períodos de tempo e mesmo que haja exceções para os casos de iluminação de montagem alta (*high-bay*) ou iluminação externa, tem-se que garantir que as cores de segurança sejam reconhecidas conforme indica a ISO 3864.

2.6.5 Planejamento da Iluminação

A norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 especifica que para obter um sistema de iluminação adequado, este deve atender a três critérios, sendo eles:

- a iluminância média mantida na superfície de referência especificada, sendo que estes valores não podem estar abaixo do especificado;
- o índice limite de ofuscamento unificado (UGR_L), considerado o valor máximo permitido;
- o índice de reprodução de cor mínimo (Ra), considerado o mínimo permitido para a qualidade da reprodução das cores.

Para que a iluminação do ambiente seja planejada através desta normativa, são estabelecidos os valores dos respectivos critérios citados acima para diversas áreas, ambientes ou tarefas. Se um ambiente em particular, área ou tarefa não for encontrado na tabela da norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 é indicado que seja adotado os valores para uma situação similar. Apresenta-se na Tabela 2 os requisitos para o planejamento da iluminação do ambiente estudado neste trabalho. As tarefas descritas na tabela se aproximam das executadas no galpão, e, por este motivo serão consideradas como parâmetros de verificação do sistema de iluminação atual e servirão de referência para as soluções propostas.

Tabela 2 – Planejamento dos ambientes, tarefas e atividades com a especificação da iluminância, limitação de ofuscamento e qualidade da cor

Tipo de ambiente, tarefa ou atividade	$E_{\text{méd}}$(lux)	UGR_L	Ra	Observações
Áreas gerais da edificação				
Depósito, estoques, câmara fria	100	25	60	200 lux, se forem continuamente
Expedição	300	25	60	ocupados.
Varejo				
Área de vendas pequena	300	22	80	

Fonte: ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).
Nota: Adaptado pelo autor.

2.7 Verificação

Na época de construção do galpão, cujo projeto original data de 1985, os critérios e parâmetros para o sistema de iluminação eram definidos pela ABNT NBR 5413:1982 - Iluminância de interiores que em suma estabelecia as iluminâncias médias mínimas em serviço para iluminação artificial em interiores, onde se realizavam atividades, dentre elas, de indústria. A verificação do sistema de iluminação era definido pela ABNT NBR 5382 - Verificação de iluminância de interiores, inicialmente publicada em 1977 e com a última revisão em 1985.

A norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1, vigente, cancela e substitui a última versão das duas supracitadas. Nesta, os procedimentos de verificação são definidos também pela própria normativa e serão utilizados para a avaliação do ambiente nos dias de hoje.

2.7.1 Iluminância

A iluminância média mantida descrita na seção anterior não pode ser inferior à calculada utilizando o método da malha de cálculo definido pela norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1.

Como todos os locais de trabalho têm suas especificidades, como, por exemplo, a geometria do sistema de iluminação, a distribuição da intensidade luminosa das luminárias utilizadas, entre outros, a norma recomenda que seja utilizado o tamanho da malha descrito na Tabela 3 com base na classificação do ambiente (superfície de referência) definido pelo projetista.

Tabela 3 – Tamanho das malhas

Ambiente	Maior dimensão da zona/sala d	Tamanho da malha p
Área da tarefa	Aproximadamente 1 m	0,2 m
Salas/zonas pequenas	Aproximadamente 5 m	0,6 m
Salas médias	Aproximadamente 10 m	1 m
Salas grandes	Aproximadamente 50 m	3 m
NOTA: Recomenda-se que o tamanho da malha não seja excedido.		

Fonte: ABNT 8995-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

A Equação (2.6) apresenta o cálculo do tamanho da malha p.

$$p = 0,2 \times 5^{\log(d)}. \tag{2.6}$$

Onde:
p: Tamanho da malha (m);
d: Maior dimensão da superfície de referência (m).

As superfícies de referência são divididas em pequenos retângulos, aproximadamente quadrados, e o ponto de cálculo é o seu centro geométrico. A iluminância média mantida é a média aritmética dos valores medidos nos pontos.

O número de pontos (n) de cálculo considerando o tamanho da malha p é o número inteiro mais próximo do resultado da Equação (2.7):

$$n = \frac{d}{p}. \tag{2.7}$$

Onde:
d: Maior dimensão da superfície de referência (m);
p: Tamanho da malha (m);

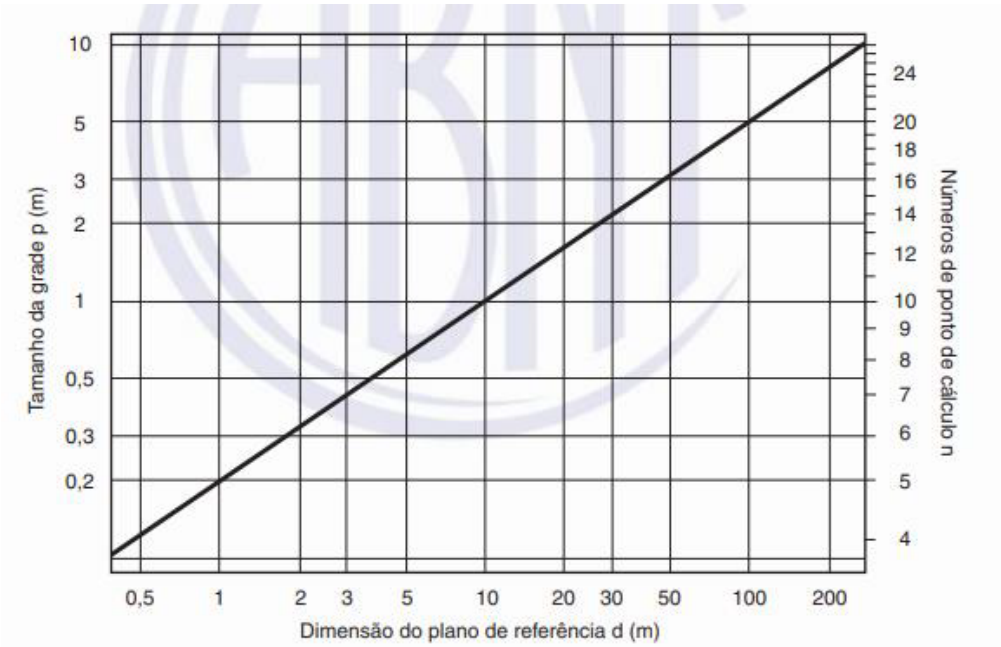
Quando a superfície de referência tem uma relação do comprimento versus a largura entre 0,5 e 2, o tamanho da malha p e, portanto, o número de pontos podem ser determinados com base na maior dimensão d da área de referência.

Em superfícies limitadas por polígonos irregulares, o tamanho da malha pode ser determinado de forma similar, utilizando um retângulo circunscrito, mas os pontos de cálculo considerados deverão ser apenas os dentro dos limites do polígono.

Para superfícies do tipo faixa, ou seja, aqueles que o comprimento de um dos lados é muito superior ao do outro, é recomendado que o de maior lado seja utilizado como base para o cálculo do tamanho da malha, mas esta não deve ser superior a metade do comprimento do lado mais estreito da faixa caso este seja maior que 0,5m.

Mostra-se na Figura 20 o tamanho da malha p (denominada como grade na figura) e o número de pontos de cálculo n em função da dimensão do plano de referência d.

Figura 20 – Tamanho da malha em função das dimensões do plano de referência



Fonte: ABNT 8995-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

2.7.2 Ofuscamento

A ferramenta para o cálculo de ofuscamento exigido por normas brasileiras e internacional é o índice de ofuscamento unificado (UGR), sendo que este já é incorporado em programas computacionais de cálculo luminotécnico, como o DIALux EVO (TEIXEIRA, 2015).

Além deste, a norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 também define outros dois métodos para o controle do ofuscamento em uma iluminação interna, sendo eles:

- Método do ângulo de corte;
- Método tabular do UGR.

O método do ângulo de corte se aplica para as luminárias que não são devidamente protegidas visualmente, ou seja, aquelas que são abertas por baixo ou tem um difusor transparente e quando estas estão instaladas com as partes luminosas visíveis acima da linha de visão. A Tabela 4 contém os ângulos limites definidos pela norma ABNT (2013) e mostra-se na Figura 21 a definição do ângulo de corte θ.

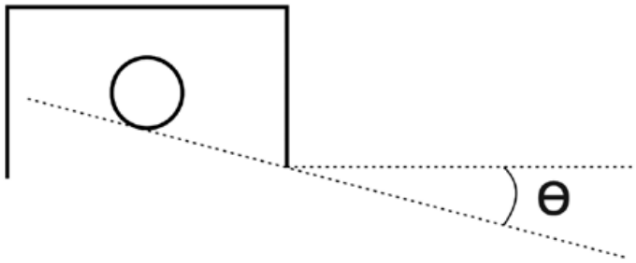
O método tabular UGR compara o sistema de iluminação com os índices UGR tabelados para 19 salas-padrão. É levado em consideração que a pessoa esteja no centro da sala e observa as luminárias ao longo e através de sua linha de visão e que estas estejam montadas

Tabela 4 – Ângulos mínimos para o método do ângulo de corte

Luminância da lâmpada (kcd/m²)	Ângulo de corte mínimo
1 a 20	10º
20 a 50	15º
50 a 500	20º
$\geq$ 500	30º

Fonte: ABNT 8995-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Figura 21 – Ângulo de corte



Fonte: Teixeira (2015).

em grade regular. A altura H na tabela indica a distância entre os olhos do observador e o plano das luminárias. A grade é montada considerando a distância dos pontos médios das luminárias adjacentes dividido por H igual a 0,25. As tabelas UGR são fornecidas pelos fabricantes e incorporadas em programas de cálculo de iluminação.

2.8 Considerações finais

A Samarco Mineração tem grande preocupação com a sustentabilidade, pois, além de garantir em suas atividades a exploração do recurso com vistas para um futuro melhor para as próximas gerações, aplica seus valores e pilares estratégicos, visando uma mineração diferente. Além disso, a escassez energética torna-se realidade no mundo moderno cada vez mais dependente de energia para a manutenção dos padrões de vida atuais.

O desenvolvimento de tecnologias de lâmpadas com maior eficiência energética já nos permite poder optar pela utilização de lâmpadas econômicas em lugar das ultrapassadas.

As lâmpadas incandescentes foram as primeiras a seram desenvolvidas e foram tão importantes para o desenvolvimento que existem até os dias de hoje. Porém seu uso vem sofrendo um decréscimo devido a sua baixa eficiencia energétiva, baixa eficiência luminosa

e sua reduzida vida útil. Este tipo de lâmpada não é mais fabricado tendo sua venda proibida no Brasil desde o ano de 2015.

As lâmpadas fluorescentes não seriam uma boa opção para este projeto, devido a sua vida útil ser relativamente menor que as de vapor de sódio e LED e normalmente sua potência não ultrapassar os 75 W.

As lâmpadas de vapor de mercúrio não emitem, no seu espectro, a luz vermelha, tornando estas lâmpadas limitadas a ambientes em que não seja necessário uma boa reprodução de cores, não atendendo as especificações para este projeto.

As lâmpadas de vapor de sódio, são consideradas para este projeto, devido a sua boa eficência luminosa (130 lm/W), vida útil considerável, tendo em média 18.000 horas.

As lâmpadas de LED também são as mais eficientes entre as lâmpadas estudadas, apresentam bom índice de reprodução de cor e sua vida útil é de cerca de 50.000 horas, porém, requer um estudo de aplicabilidade de sua implementação devido ao seu elevado custo de aquisição.

A norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 que trata sobre iluminação em ambientes de trabalhos internos, entrou em vigor em 2013, substituindo a norma anterior ABNT NBR 5413, e exclui, deixando de considerar aspectos como de idade das pessoas para fator de definição parâmetros . A ABNT NBR 5413 não abordava índices de reprodução de cor e a temperatura da cor, já abordadas neste. Além disso, novos conceitos sobre os ambientes de trabalho são definidos, como, por exemplo, áreas de tarefas e entorno imediato.

3 PROPOSTA DE VERIFICAÇÃO E ADEQUAÇÃO DE UM AMBIENTE INDUSTRIAL INTERNO

A proposta deste trabalho consiste na avaliação das dependências do antigo galpão de almoxarifado da Samarco Mineração S.A., na área onde é utilizado o sistema de iluminação, a fim de identificar os diferentes tipos de trabalhos executados, mapeando as localidades e distribuição das áreas de tarefas, com o intuito de analisar a conformidade com as especificações da ABNT NBR ISO/CIE 8995:2013. Caso os ambientes não estejam de acordo com os parâmetros indicados pela normativa, será elaborado uma proposta para adequação do sistema de iluminação, juntamente com a realização da avaliação de viabilidade econômica de implementação.

A Samarco Mineração S.A é uma mineradora brasileira que nasceu em 1971 com a fusão da Marcona Corporation e a S/A Mineração Trindade (Samitri) em 1973 foi fundada a Samarco Mineração S.A, pioneira no Brasil na lavra de minério de ferro de baixo teor e com operação logística própria da mina ao porto.

O minério de ferro é transportado através de minerodutos que ligam Mariana - MG (cidade onde localiza-se a mina) à Anchieta - ES (cidade onde ocorre o processo de pelotização). Toda operação industrial no tratamento do minério de ferro (transformação do minério em pelota) ocorre na unidade da empresa em Anchieta - ES. Após o estouro da barragem de rejeitos ocorrido em 2015 na cidade de Mariana, a Samarco paralisou todas as operações, após 5 anos desde o rompimento da barragem a empresa retornou ao funcionamento, operando em atuais 26% de sua capacidade de produção total.

O galpão que será avaliado neste trabalho foi projetado em setembro de 1995 e era utilizado para almoxarifado da gerência de suprimentos. Este ambiente contava também com dois andares constituídos de escritórios fechados com iluminação própria. Atualmente, com o retorno das operações da Samarco, a área do antigo almoxarifado foi reorganizada para sediar, além de depósito de materias sobressalentes, duas lojas (uma de uniformes e outra de EPI's) e uma ferramentaria. Contudo, o projeto de iluminação não foi revisado para antender às especificidades de cada novo ambiente e o que seu respectivo tipo de trabalho requer.

3.1 Divisão de áreas de tarefa e de trabalho

A norma ABNT (2013) em seu Apêndice 3 ilustra exemplos de como as áreas podem ser definidas em projetos de iluminação.

Em ambientes industriais onde diversos serviços são executados, estes precisam ser definidos individualmente, criando cada respectiva área da tarefa. Se os serviços visuais se assemelham, uma área maior pode ser definida como local de trabalho e aconselha-se que uma iluminação genérica seja instalada em todo o ambiente de modo que atenda as exigências para todos os locais de trabalho.

Recomenda-se que em salões que possuem diversas áreas de tarefas, uma iluminação para todas elas em conjunto seja considerada, a menos uma faixa de 0,5m em seu perímetro e esta não precisa ser avaliada separadamente, pois, os requisitos para o entorno imediato serão atendidos uma vez que a área de trabalho estiver atendida (ABNT, 2013).

Quando a imediação da área da tarefa é uma faixa marginal, convém que esta não seja avaliada separadamente, porque, como regra geral, os requisitos que precisam ser atendidos para o entorno são atendidos automaticamente. Recomenda-se tomar cuidado para que não exista qualquer área da tarefa na faixa marginal (ABNT, 2013).

3.1.1 Requisitos de iluminação para os ambientes

Diante do exposto acima, os novos ambientes que fazem uso da iluminação do galpão foram divididos em dois grupos, de acordo com os níveis de iluminância mantida e índice de reprodução de cor (IRC) nos termos da norma, sendo estes o Grupo I - Depósitos e estoques e o Grupo II - Área de pequenas vendas e expedição, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Divisão de grupos de iluminância média e IRC, conforme ABNT NBR ISO/CIE 8995-1

Grupo	Tipo de ambiente, tarefa ou atividade	$E_{\text{méd}}$ (lux)	IRC
I	Depósitos e estoques	200	60
II	Área de pequenas vendas e expedição	300	80

Fonte: Próprio autor.

3.2 Verificação dos níveis de iluminância pelo método das malhas

O método das malhas abordado anteriormente é definido para cada área de tarefa ou, então, avaliado para as áreas de trabalho descritos acima. Mostra-se na tabela 6 as dimensões adotadas para cada área de trabalho seguindo a norma ABNT (2013).

Tabela 6 – Dimensão das áreas de trabalho do galpão

Ambiente	C(m)	L(m)
Depósito	55,70	39,72
Ferramentaria	20,72	13,32
Lojas	11,70	12,50

Fonte: Próprio autor.

A norma sugere que quando a superfície de referência tem uma relação de comprimento versus largura, entre 0,5 e 2, o tamanho da malha (p), e portanto, o número de pontos podem ser determinados com base na maior dimensão (d) da área de referência.

3.2.1 Equipamento utilizado para medição

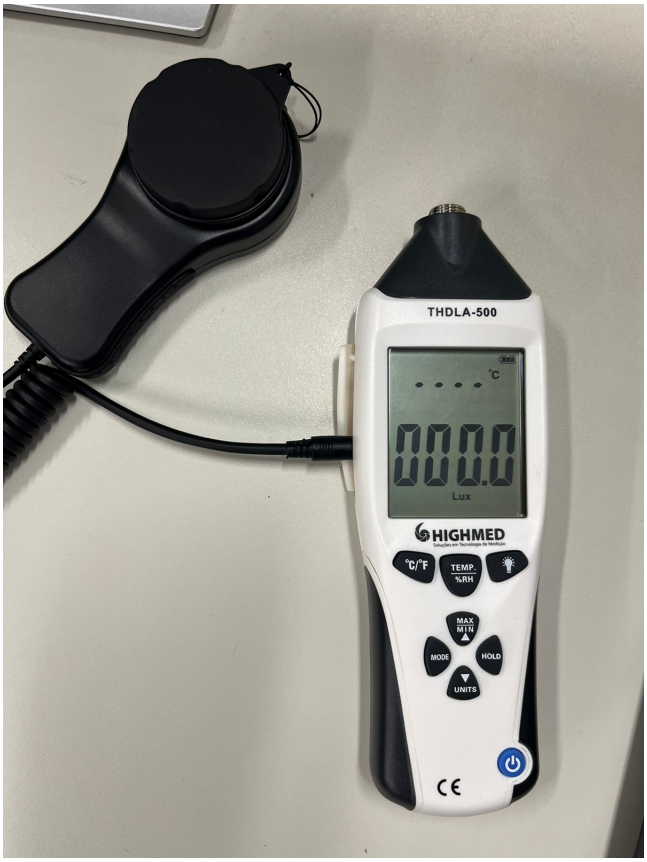
Para realização da inspeção foi utilizado o luxímetro modelo THDLA-500, cedido pela equipe de Saúda e Segurança do Trabalho da Samarco, como mostra-se na Figura 22.

Segundo a fabricante, *Highmed*, este modelo tem escala de 0 a 200.000 lux, com precisão de ± 4%. O equipamento possui certificado de calibração de número 36667/2022 realizado pela própria fabricante em 10 de junho de 2022 e validade de um ano. Antes de realizar a inspeção, o luxímetro foi testado, não apresentando problema. Este equipamento utiliza uma fotocélula. Quando a luz incide sobre a fotocélula, ocorre a formação de corrente no semicondutor, que depois de amplificada é medida no amperímetro, que é proporcional à radiação luminosa incidente no local de medição (COSTA, 2006).

3.2.2 Metodologia para realização das medições

Para iniciar a coleta dos dados, ligou-se o aparelho, selecionou-se a função de luxímetro e a escala correta para medição (200 lux). Em seguida procedeu-se o seguinte método, até que todos os pontos fossem medidos:

Figura 22 – Luxímetro THDLA-500



Fonte: Próprio autor

- O sensor do instrumento foi coberto até que o visor do aparelho apresentasse o valor de zero lux;
- A função MAX do medidor foi selecionada para mostrar o valor máximo medido;
- Ao retirar a tampa do sensor, o aparelho foi deixado afastado de modo que o corpo não interferisse na iluminação, e por consequência, nos valores auferidos;
- Em seguida, foi aguardado até que a medida estabilizasse no medidor (em média 10 segundos);
- Por fim, foi medido o valor máximo de iluminância daquele ponto e anotado na prancheta.

Para se realizar as medições levou-se em consideração alguns cuidados (HARA et al., 2015):

- Utilização de roupas escuras para evitar reflexões que venham a interferir no medidor;
- Medição após o pôr do sol, sem a interferência da luz natural, após as 19:00 horas;

- Precaução para evitar sombreamentos do sensor do luxímetro quando fosse durante as leituras;
- Acionamento das luminárias ao menos com antecedência de 10 minutos, garantindo desta forma um fluxo luminoso pleno.

3.3 Análise de viabilidade econômica

A viabilidade econômica de um projeto depende de alguns fatores a serem considerados como determinantes para a escolha ou não de um projeto. Em projetos de iluminação em ambientes internos, deve-se observar se este atende à norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1, como já descrito acima (ABNT, 2013). Para análise de viabilidade econômica deste estudo, será feito o cálculo da vida útil média das lâmpadas de LED e Vapor de Sódio de Alta Pressão em anos, com base nos dados fornecidos pelas fabricantes, para utilização destes como um dos parâmetros a serem considerados (VERLY; OLIVEIRA, 2014).

$$\text{Vida útil em anos} = \left(\frac{\text{Vida útil das lâmpadas } (h)}{\text{Tempo de utilização das lâmpadas } (h/\text{ano})} \right) \tag{3.1}$$

3.3.1 Custo de Aquisições e Manutenções das Lâmpadas

Foi feito um comparativo em relação aos valores referentes à aquisição das lâmpadas. Para esta análise serão feitos os levantamentos relativos aos custos de manutenções, bem como troca ou substituições das lâmpadas. Também foram realizadas as estimativas de consumo energético do projeto como um todo, sendo para este cálculo, utilizado a vida útil máxima das lâmpadas como base de cálculos (VERLY; OLIVEIRA, 2014).

3.4 Considerações finais

A proposta deste projeto consiste em avaliar os ambientes agrupando-os por trabalhos realizados conforme reconda a norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 para instalações industriais de grande porte.

O galpão serve para local de trabalho de diversos colaboradores de diferentes empresas e cada subdivisão do espaço requer seu nível de iluminância média mantida na plano de

trabalho, além de seu IRC e controle dos níveis de ofuscamento. A iluminância será medida pelo método das malhas utilizando um luxímetro com fotocélula. O IRC será considerado na escolha da lâmpada e as medidas para limitar o ofuscamento serão consideradas conforme a norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1.

4 RESULTADOS

4.1 Inspeção realizada no sistema de iluminação atual

O galpão de almoxarifado da Samarco possui um comprimento de 70 m e uma largura de 40 m. A planta baixa estrutural é mostrada na Figura 43 do Anexo A. A área do galpão utilizada para os serviços de almoxarifado, ferramentaria e de lojas possui comprimento de 56 m e 40 m de largura, descontando os escritórios. O telhado de duas águas com telhas de zinco e translúcidas inicia com pé direito de 10 m nas extremidades e aproximadamente 12 m no centro.

A inspeção do local só poderia ser realizada com o acompanhamento de um profissonal da empresa, devido à minha condição de estagiário. O coordenador da engenharia de confiabilidade, Glaudston Henrique, fez o acompanhamento durante toda a inspeção. O turno escolhido para as medições foi o noturno, pois este ambiente possui muitas aberturas para a luz natural, incluindo telhas translúcidas, e, como este é local de trabalho para as pessoas à noite, a iluminação artificial deverá satisfazer as condições exigidas pela referida norma.

As luminárias conforme projeto estão dispostas em uma matriz a 9 m do chão acabado com 10 colunas e 6 linhas, totalizando 60 luminárias. O sistema de iluminação atual conta com apenas 48 luminárias modelo ET-37 da Naville e lâmpadas de vapor de sódio SON-H 350W da Philips. Em inspeção realizada em junho de 2022, verificou-se que 10 lâmpadas estavam queimadas, o que contribui ainda mais para a má condição de iluminação do local. Mostra-se na Figura 23 um canto da área de almoxarifado com as lâmpadas de vapor de sódio e algumas luminárias com lâmpadas queimadas.

Figura 23 – Luminárias com lâmpadas queimadas

Fonte: Próprio autor

Mostra-se na Tabela 7 as especificações de potência, fluxo luminoso, eficiência luminosa, temperatura de cor, índice de reprodução de cores e vida útil com base no catálogo da fabricante.

Tabela 7 – Dados técnicos da lâmpada SON-H 350W

Potência (W)	Flx lum. (lm)	Efi. Lum (lm/W)	TCC (K)	IRC	V. útil (h)
350	34.000	98	2000	25	26.000

Fonte: Philips (2023d)

4.1.1 Iluminância do sistema atual

Como os três ambientes possuem entradas separadas e barreiras físicas delimitando as áreas, além de serem ocupadas por diferentes colaboradores, serão avaliados separadamente, embora compartilham o mesmo sistema de iluminação.

Para o almoxarifado, as áreas onde as tarefas podem ser realizadas não estão bem definidas, podendo ser em qualquer local, e, portanto, adotou-se o ambiente flexível como uma área

de trabalho única que possui áreas de tarefas individuais, conforme indica o Anexo A da norma (ABNT, 2013).

A ferramentaria possui algumas áreas de tarefas definidas por prateleiras e divisórias para depósito de ferramentas e peças pequenas, como parafusos e itens de bloqueio de energia e, algumas tarefas não bem delimitadas para elevação e movimentação de objetos maiores. Pela similaridade das tarefas executadas, optou-se por definir como uma área de trabalho única.

As lojas possuem um ambiente de depósito de materiais com corredores de prateleiras ou empilhados no chão e outro de balcão para atendimento. Por se tratar de um tabalho executado pela mesma pessoa, as duas áreas, tanto de depósito, quanto de atendimento foi considerada uma única área de trabalho e será avaliada para aquela que possui requisito maior conforme define a norma ABNT (2013).

Para as três áreas adotou-se uma altura de referência para iluminância a 0,75 m do piso acabado e ignorou-se a faixa marginal, visto que o arranjo das áreas de trabalho podem se estender até as paredes e então a área a ser iluminada compreende todo o ambiente, recomendado pelo item A.3.5 da norma ABNT (2013).

Os requisitos para planejamento da iluminação desses ambientes estão definidos na Tabela 5 na seção 3.1.1. O almoxarifado é do grupo I com $E_{\text{méd}} = 200$ lux e IRC de 60%. As lojas e ferramentaria enquadram-se no grupo II como área de pequenas vendas e expedição com $E_{\text{méd}} = 300$ lux e IRC de 80%.

A partir dos dados da Tabela 7 pode-se notar que as lâmpadas utilizadas atualmente não atendem ao requisito de IRC mínimo da referida normativa.

Seguindo o Anexo B da norma que trata do dimensionamento da malha de cálculo para avaliação da iluminação de ambientes e descrito no item 2.7.1, fez-se o dimensionamento das malhas de medição. Utilizando os dados de maior comprimento e maior largura de cada ambiente retangular e da Equação 2.6 para determinação do tamanho da malha p, e, na sequência, aplicando na Equação 2.7, obteve-se o número de pontos na maior e menor dimensão, representados na tabela por nD e nd, respectivamente. Por fim, determinou-se a quantidade de pontos conforme a Tabela 8, multiplicando a quantidade na direção de maior e menor dimensões e subtraindo os pontos da malha que estão fora da área delimitada pela superfície de referência, conforme descreve a norma ABNT (2013).

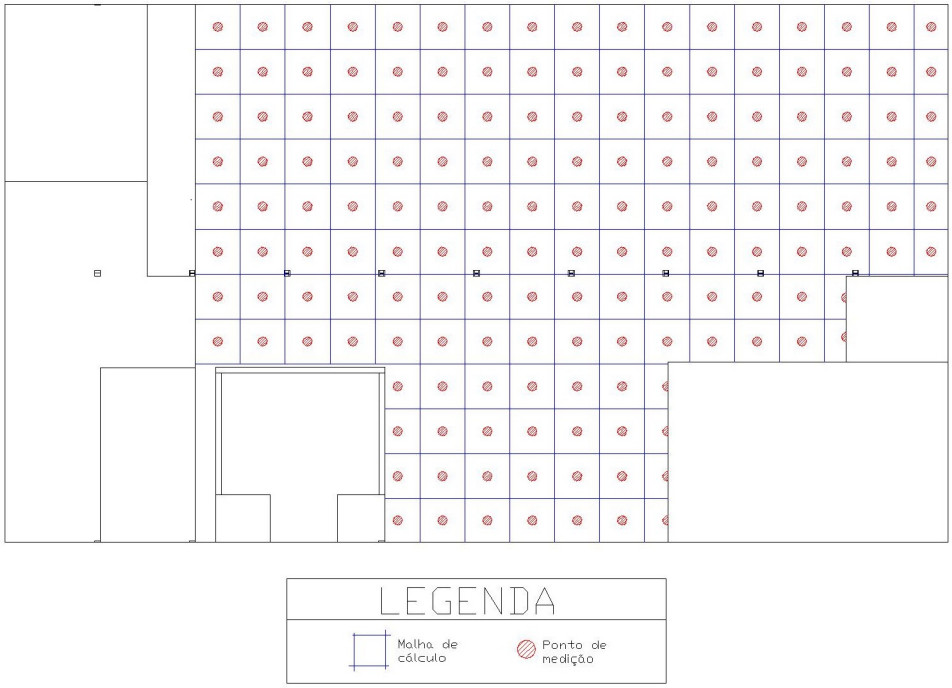
Tabela 8 – Dimensão do galpão e da malha e quantidade de pontos de medição para cada ambiente

Ambiente	C(m)	L(m)	Dimensão da malha p(m)	nD	nd	Total de pontos
Almoxarifado	55,70	39,72	3,32	17	12	160
Ferramentaria	20,72	13,32	1,66	12	8	90
Lojas	11,70	12,50	1,17	10	11	86

Fonte: Próprio autor.

Através dos cálculos, os pontos de medição definidos para cada um dos ambientes foram ilustrados em suas plantas baixas para criar a malha de medição. Apresenta-se na Figura 24 o exemplo da malha desenhada e utilizada para as medições no almoxarifado.

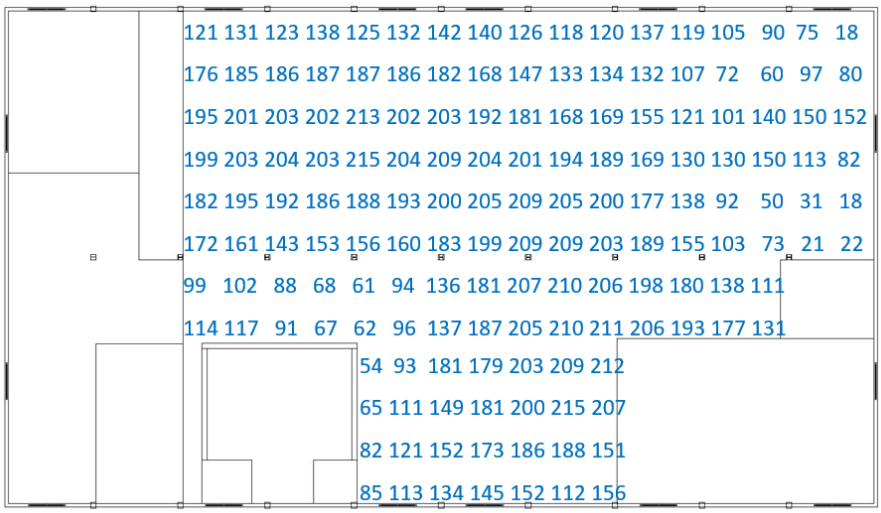
Figura 24 – Malha de pontos de cálculo para o almoxarifado



Fonte: Próprio autor

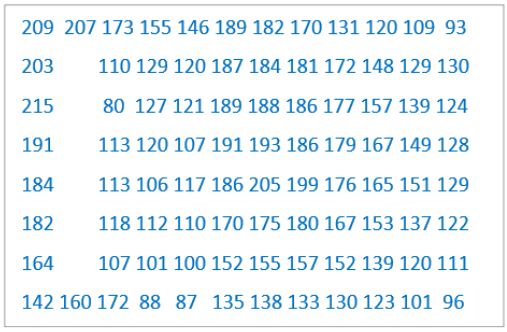
As medidas de iluminância, coletadas através da metodologia descrita no capítulo anterior foram adicionadas às plantas baixas e podem ser observadas nas Figuras 25, 26 e 27 para as áreas de almoxarifado, ferramentaria e lojas, respectivamente.

Figura 25 – Medidas de iluminância do almoxarifado



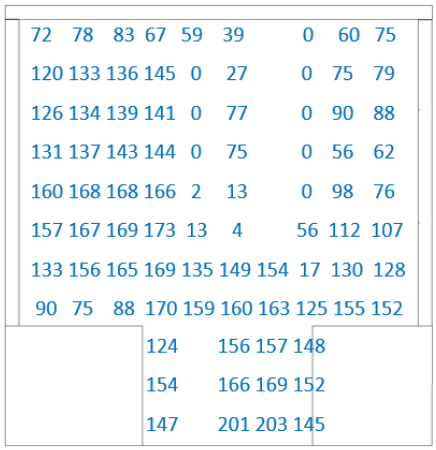
Fonte: Próprio autor

Figura 26 – Medidas de iluminância da ferramentaria



Fonte: Próprio autor

Figura 27 – Medidas de iluminância das lojas



Fonte: Próprio autor

Através das medições realizadas no galpão e calculando a média aritimética dos valores e utilizando a Equação 2.5 para calcular a uniformidade, obtém-se a Tabela 9 que apresenta os valores de $E_{\text{mín}}$, $E_{\text{máx}}$, $E_{\text{méd}}$ e o fator de uniformidade U.

Tabela 9 – Iluminâncias e uniformidade medidas do galpão

Ambiente	$E_{\text{mín}}$(lux)	$E_{\text{máx}}$(lux)	$E_{\text{méd}}$(lux)	U
Almoxarifado	18	215	150	0,12
Ferramentaria	80	215	148	0,54
Lojas	0	203	107	0

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que as iluminâncias médias não são atingidas em nenhum dos ambientes e os valores máximos estão em torno de 200 lux para todos. O fator de uniformidade mais próximo do valor de 0,6 exigido pela norma (ABNT, 2013) é na ferramentaria. As lojas possuem U = 0 pois o $E_{\text{mín}} = 0$ lux em diversos pontos dentro dos corredores do ambiente.

4.2 Simulação de cenários alternativos e propostas

A má iluminação do galpão da Samarco se dá, entre outros fatores, primeiramente pela intensidade da luz. São diversos relatos de funcionários do ambiente que a iluminação não atende a todos os espaços, devido também ao fato de algumas lâmpadas queimadas. Como visto na Tabela 1, para a lâmpada de vapor de sódio com TCC em torno de 2.000 K, a aparência da cor é quente, ou seja, amarelada, o que causa desconforto no ambiente de trabalho quando exposto a esta luz por muito tempo. E ainda, o seu IRC é muito baixo, máximo de 25 para a lâmpada SON-H 350W da Phillips, o que contribui para uma má iluminação e dificuldade para diferenciar detalhes, principalmente na loja de uniformes e ferramentaria.

As lâmpadas utilizadas na simulação foram as de vapor de sódio, modelo SON-H 350W, e as de LED BY518P LED260 187W, BY518P LED210 154W, LEDtube 840 T8C 18W, todas da Philips. As simulações foram feitas da seguinte forma:

- Primeira simulação: Foram inseridas as 48 luminárias instaladas no local, do total de 60 de projeto, e apenas 38 lâmpadas, simulando a atual situação do galpão com 10 lâmpadas queimadas. O intuito é realizar as medições das iluminâncias e calcular o Emed, Emin e o U para comparar com os valores medidos no local.
- Segunda simulação: Foram inseridas todas as 48 lâmpadas SON-H 350W nas luminárias presentes no local para observar se houve melhoria nas iluminâncias apenas com a troca das queimadas.

- Terceira simulação: Foram inseridas as 60 luminárias de projeto com lampadas SON-H 350W para observar se a adequação ao projeto seria o suficiente para garantir às exigências da norma ABNT (2013) mesmo com a modificações nas dependências do galpão.
- Quarta simulação: Foram trocadas todas as luminárias por tecnologia LED para verificar se a substituição atende à todas as exigências da ABNT (2013), inclusive ao IRC mínimo, antes não atendido pelas lâmpadas de vapor de sódio.
- Quinta simulação: Mantido as lâmpadas de tecnologia LED e feito adequações na instalção de modo que atendesse aos critérios exigidos de modo a buscar uma solução com maior eficiência energética.

4.2.1 Ambiente de simulação

As simulações foram realizadas no ambiente de simulação do *software* gratuito DIALux EVO versão 11.0. O DIALux permite a simulação de ambientes internos e externos e conta com catálogos de produtos de diversos fabricantes mundiais. Os arquivos em formato *.ies* disponibilizados configuram as características construtivas e funcionais, como, por exemplo, dimensões e curvas de distribuição luminosa utilizadas no cálculo computacional da iluminação do ambiente criado.

Mostra-se na Figura 28 a edificação em 3D criada com as dimensões do galpão para simular os diversos cenários de sistema de iluminação a seguir. Conforme a Figura 29, os espaços internos e principais mobílias foram inseridas em suas respectivas posições encontradas hoje para simular os seus impactos na distribuição da iluminação.

Figura 28 – Vista externa do edifício

Fonte: Captura de tela do DIALux.

Figura 29 – Vista interna do edifício

Fonte: Captura de tela do DIALux.

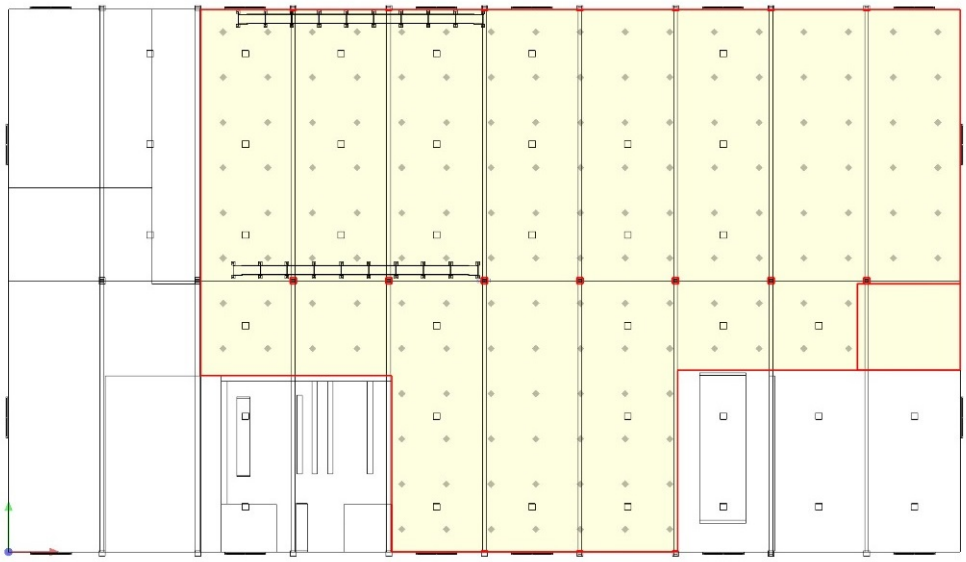
4.2.2 Primeiro cenário

Para a primeira simulação, foi escolhido a lâmpada de vapor de sódio de alta pressão revestido de vidro transparente, SON-H 350W da Philips e a luminária ET-37 da Naville, cujos arquivos *.ies* foram disponibilizados para *download* pelos respectivos fabricantes. Segundo a Philips, esta lâmpada tem recomendação para aplicação em ambientes grandes,

como ruas, galpões e estádios, indicando que é adequada para esta situação. Os dados técnicos da lâmpada utilizada na simulação estão na Tabela 7.

Mostra-se na Figura 30 os ajustes realizados no *software* DIALux para inserir a malha de medição do almoxarifado e a altura do plano de trabalho conforme a norma ABNT (2013) indica e considerada na inspeção. A malha p(m) do polígono irregular tem comprimento de 3,32 m e composta de 160 pontos no centro de cada quadrado da malha.

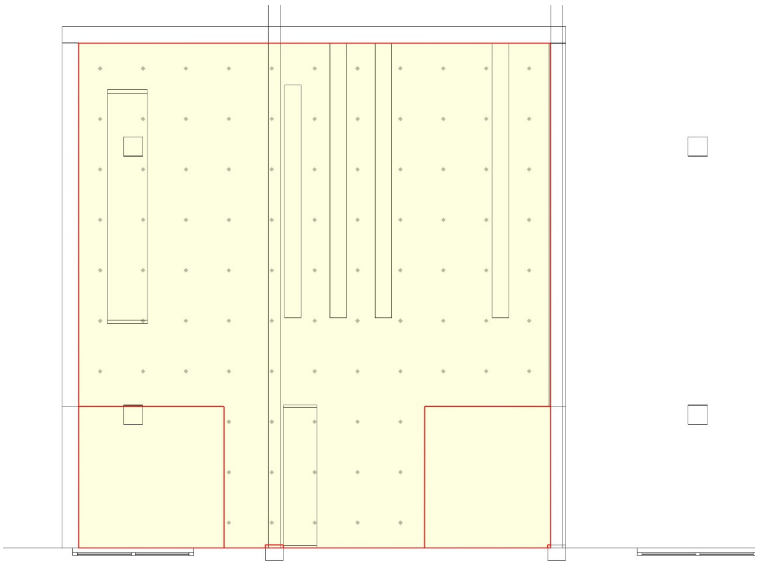
Figura 30 – Malha de pontos do almoxarifado



Fonte: Captura de tela do DIALux.

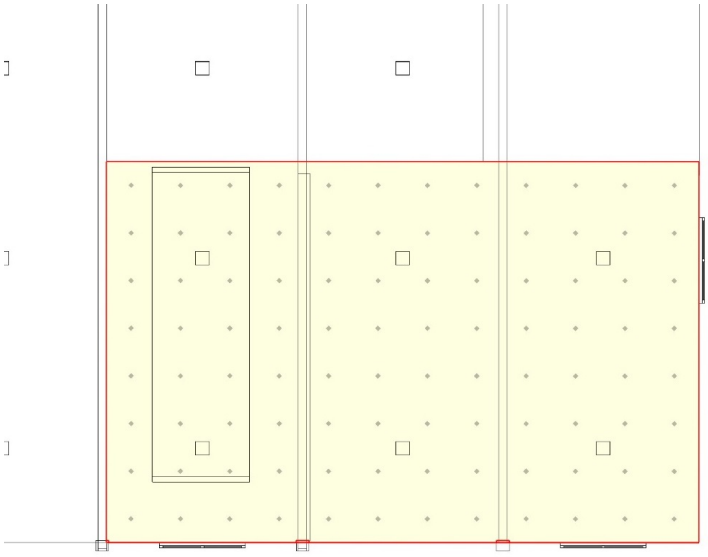
Mostram-se nas Figuras 31 e 32 as malhas ajustadas no *software* para as áreas de trabalho retangulares das lojas e ferramentaria, respectivamente.

Figura 31 – Malha de pontos das lojas



Fonte: Captura de tela do DIALux.

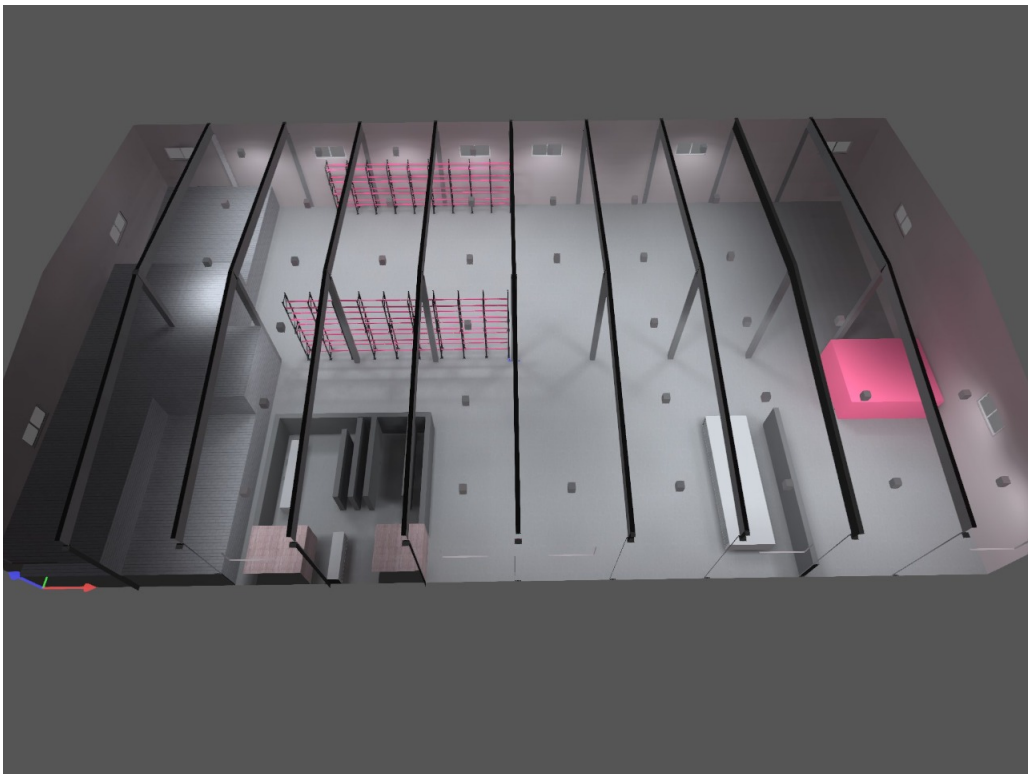
Figura 32 – Malha de pontos da ferramentaria



Fonte: Captura de tela do DIALux.

Mostra-se na Figura 33 o ambiente produzido no DIALux resultado da simulação. Observa-se pela simulação o baixo IRC da lâmpada utilizada, comparando com o ambiente na Figura 29 nas cores rosadas dos *racks* de empilhamento.

Figura 33 – Simulação de 38 das 48 lâmpadas SON-H 350W em funcionamento



Fonte: Captura de tela do DIALux.

O esperado desta simualção era que os pontos fossem próximos aos valores medidos na inspeção. Observa-se pela Tabela 10 que há uma grande diferença entre os resultados

obtidos. Tomando como base os respectivos valores mínimos estabelecidos pela a ABNT ISO/CIE 8995-1, observa-se que a iluminação do galpão, na simulação, não está adequado.

Tabela 10 – Resultados da primeira simulação

Ambiente	$E_{\text{mín}}$(lux)	$E_{\text{máx}}$(lux)	$E_{\text{méd}}$(lux)	U
Almoxarifado	21,8	412	284	0,077
Lojas	5,8	220	101	0,057
Ferramentaria	174	409	298	0,58

Fonte: Próprio autor.

Possíveis motivos para a grande diferença entra as iluminancias médias medidas em inspeção e os resultados da simulação:

- As lâmpadas atuais não possuem a mesma potência que as lâmpadas originais do projeto;
- Decaimento do fluxo luminoso, que chega a 50% em 26.000 horas de uso nas lâmpadas SON-H 350W;
- A falta de manutenção adequada, devido a alta dispersão de partículas de minério suspensas que se depositam na superfície das lâmpadas e luminárias.

4.2.3 Segundo cenário

Para o segundo cenário, foram inseridas mais 10 lâmpadas SON-H 350W nas luminárias já existentes no local para simular a condição de substituição das queimadas para ver se houve melhoria nas iluminâncias calculadas. Mostra-se na Tabela 11 os resultados desta simulação. Os valores médios de iluminância foram atingidos para o almoxarifado e a ferramentaria conforme exigido pela norma, 200 e 300 lux, respectivamente, embora a uniformidade está abaixo de 0,6 mínimo.

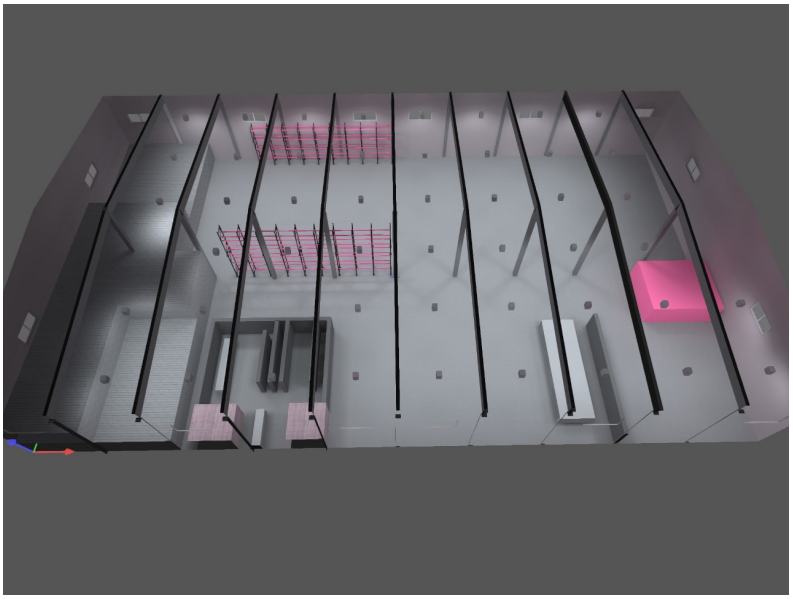
Tabela 11 – Resultados da segunda simulação

Ambiente	$E_{\text{mín}}$(lux)	$E_{\text{máx}}$(lux)	$E_{\text{méd}}$(lux)	U
Almoxarifado	68,3	442	356	0,19
Lojas	12	327	190	0,063
Ferramentaria	178	430	306	0,58

Fonte: Próprio autor.

Mostra-se na Figura 34 o ambiente simulado no DIALux. Percebe-se que ainda há regiões com baixa iluminância devido a falta de luminárias, como, por exemplo, no canto superior direito do almoxarifado e dentro dos corredores de prateleiras nas lojas.

Figura 34 – Simulação de 48 lampadas SON-H 350W em funcionamento



Fonte: Captura de tela do DIALux.

Mostra-se na Figura 35 à esquerda uma foto tirada de dia do sombreamento presente no corredor da loja de uniformes e à direita a mesma vista da simulação à noite. Nota-se que as regiões de sombra na altura do plano de trabalho permanecem, devido à distribuição dos corredores (estreitos). Também percebe-se o IRC ruim das lâmpadas de vapor de sódio. A estrutura de empilhamento atrás tem coloração laranja na foto tirada e rosada no resultado da simulação, embora tenham a mesma cor. Isso se dá, pois, durante a captura da foto de dia, a iluminação é proveniente, em sua maioria, de luz natural, com IRC máximo, e já na simulação, das lâmpadas de vapor de sódio com IRC de 25.

Figura 35 – Corredor de depósito da loja de uniformes

Fonte: Próprio autor.

4.2.4 Terceiro cenário

No terceiro cenário, todas as luminárias previstas em projeto foram adicionadas formando uma matriz 10X6, totalizando 60 luminárias, com lâmpadas SON-H 350W, para simular a condição projetada e verificar se atende aos requisitos de iluminância da norma ABNT (2013).

Através dos dados da Tabela 12, observa-se que os valores de $E_{\text{méd}}$ do almoxarifado e ferramentaria tiveram um pequeno acréscimo, mas a uniformidade teve um aumento significativo de 0,36. O $E_{\text{méd}}$ da área das lojas aumentou em 52 lux com o mesmo $E_{\text{méd}}$, mantendo a uniformidade baixa. Portanto, nota-se que essas luminárias influenciam na distribuição do iluminamento do galpão. Porém, a $E_{\text{mín}}$ não se alterou, indicando que há pontos que continuam sem cobertura do sistema de iluminação.

Tabela 12 – Resultados da terceira simulação

Ambiente	$E_{\text{mín}}$(lux)	$E_{\text{máx}}$(lux)	$E_{\text{méd}}$(lux)	U
Almoxarifado	213	448	390	0,55
Lojas	16	389	242	0,066
Ferramentaria	183	439	322	0,57

Fonte: Próprio autor.

4.2.5 Quarto cenário

Os dados técnicos da lâmpada BY518P LED260 187W são mostrados na Tabela 13. Já na Tabela 14, nota-se que ao utilizar as lâmpadas BY518P LED260 187W, o $E_{\text{méd}}$ aumenta para todos os ambientes, comparado com a simulação anterior. Embora o fluxo luminoso seja menor para estas, a sua distribuição é maior, visto pelo aumento da uniformidade. Além disso, o IRC mínimo exigidos para estes ambientes de trabalho são atingidos, visto na Figura 36 pela reprodução das cores dos *racks* de empilhamento.

Tabela 13 – Dados técnicos da lampada BY518P LED260 187W

Potência (W)	Flx lum. (lm)	Efi. Lum (lm/W)	TCC (K)	IRC	V. útil (h)
187	26.000	139	4.000	80	50.000

Fonte: Philips (2023b).

Tabela 14 – Resultados da quarta simulação

Ambiente	$E_{\text{mín}}$(lux)	$E_{\text{máx}}$(lux)	$E_{\text{méd}}$(lux)	U
Almoxarifado	261	517	444	0,59
Lojas	19	442	283	0,067
Ferramentaria	217	491	372	0,58

Fonte: Próprio autor.

Figura 36 – Ambiente simulado do galpão com lâmpadas LED

Fonte: Captura de tela do DIALux.

4.2.6 Quinto cenário

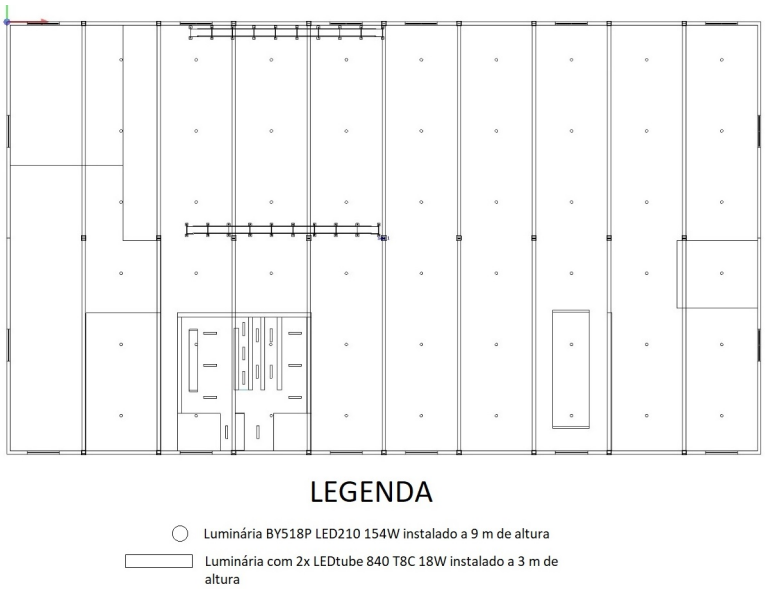
Os dados das lâmpadas BY518P LED210 154W e tubular LEDtube 840 T8C 18W, da Philips estão na Tabela 15. Foram utilizadas lâmpadas de menor potência comparado ao cenário anterior na estrutura de iluminação do galpão existente e retirado a primeira coluna de lâmpadas (sobre os escritórios), pois sua influência nas superfícies de referência mostraram-se desprezíveis nas simulações. Para as lojas, foi necessário atribuir um sistema de iluminação complementar exclusivo para atender aos requisitos na norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 devido a sua distribuição física. Mostra-se na Figura 37 a distribuição das luminárias de forma que atenda aos valores exigios pela (ABNT, 2013).

Tabela 15 – Dados técnicos das lâmpadas BY518P LED210 154W e LEDtube 840 T8C 18W

Lâmpada	Potência (W)	Fluxo lum. (lm)	Eficiência Lum. (lm/W)	TCC (K)	IRC	Vida útil (h)
BY518P LED210	154	21.000	136	4.000	80	50.000
LEDtube 840 T8C	18	1850	102	4.000	80	50.000

Fonte: Philips (2023c) e Philips (2023a).

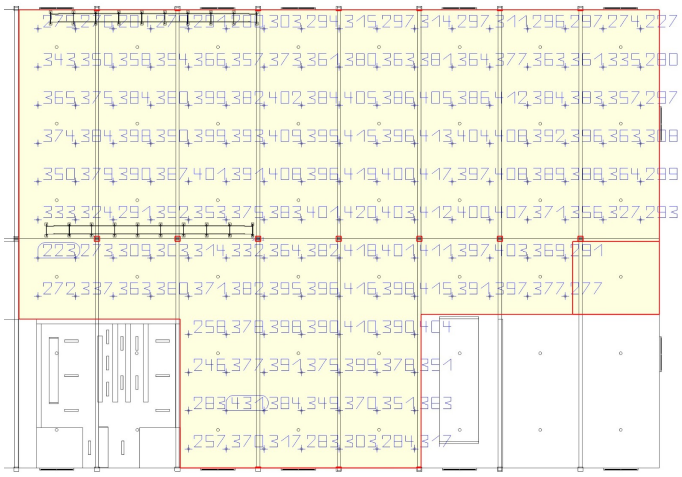
Figura 37 – Distribuição das luminárias LED



Fonte: Próprio autor.

Mostram-se nas Figuras 38 a 40, respectivamente, os valores calulados para cada ponto da malha definida para as áres de almoxarifado, ferramentaria e lojas.

Figura 38 – Pontos calculados para a malha do almoxarifado

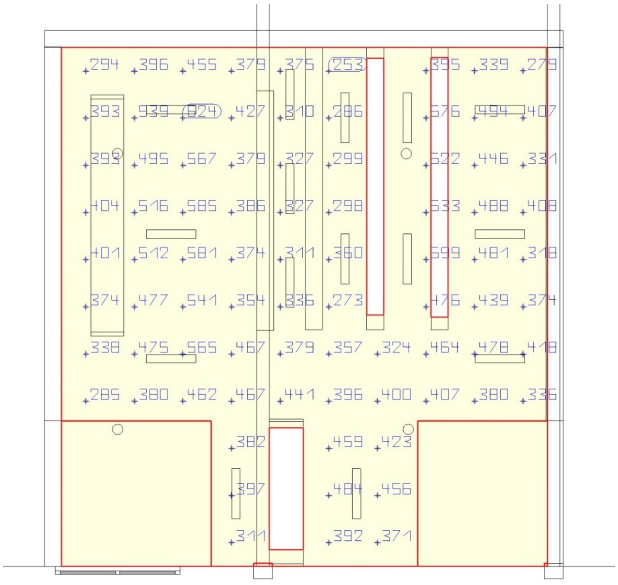


Fonte: Próprio autor.

Figura 39 – Pontos calculados para a malha da ferramentaria

Fonte: Próprio autor.

Figura 40 – Pontos calculados para a malha das lojas



Fonte: Próprio autor.

Como se pode observar pelos dados compilados da Tabela 16, o fator de uniformidade atingiu o mínimo de 0,6 para as três áreas de trabalho e fez com que os $E_{\text{méd}}$ ficassem superiores aos exigidos.

Tabela 16 – Resultados da quinta simulação

Ambiente	$E_{\text{mín}}$(lux)	$E_{\text{máx}}$(lux)	$E_{\text{méd}}$(lux)	U
Almoxarifado	223	431	359	0,62
Ferramentaria	202	407	330	0,61
Lojas	253	624	414	0,61

Fonte: Próprio autor.

4.2.7 Considerações finais

O primeiro cenário simulado nos mostrou que há uma grande diferença entre os valores medidos e os calculados no *sotfware* DIALux. Diversos fatores podem influenciar nessa variação, dentre eles o decaimento do fluxo luminoso das lâmpadas de vapor de sódio pelo tempo de utilização. Considerando a iluminação acesa por 24 horas, a vida útil destas lâmpadas é atingido em aproximadamente 2,97 anos.

A segunda simulação mostra que mesmo com apenas a substituição das lâmpadas queimadas por novas de mesmo modelo e potência, os valores médios de iluminâncias ultrapassam o mínimo para o almoxarifado e ferramentaria, mas com distribuição muito ruins.

A terceira simulação mostra que ao aplicar a situação de projeto, os valores de $E_{\text{méd}}$ e uniformidade U sobem consideravelmente para a área de almoxarifado. Isso sugere que caso o recinto fosse utilizado apenas com esta finalidade, os valores de $E_{\text{méd}}$ e U estariam em conformidade, exceto o IRC, pois o mínimo é 0,6, valor não encontrado para lâmpadas desta tecnologia.

A quarta e quinta simulação evidenciam a reprodução adequada das cores utilizando lâmpadas de tecnologia LED. O $E_{\text{méd}}$ sobe 13,8% com uma queda de 53,43% na potência instalada do sistema de iluminação comparando o quarto cenário ao anterior na região do almoxarifado. Embora houvesse estes ganhos com apenas a troca das lâmpadas e inserção de novas luminárias, as dependências das lojas não atinge $E_{\text{méd}} = 300$ lux e U = 0,6 como estabelece a ABNT (2013). Sem modificar a estrutura de iluminação existente, a solução encontrada é atribuir um sistema exclusivo que complementa esse ambiente. Com a instalação de lâmpadas LED tubulares LEDtube 840 T8C 18W, foi possível distribuir com fator de uniformidade U = 0,6 e $E_{\text{méd}} = 414$, 38% a mais que o mínimo exigido. Ainda, foi possível reduzir a quantidade de lâmpadas do galpão em 6, excluíndo a primeira coluna da matriz e trocando as lâmpadas por outras de potência menor, 154W, reduzindo em pouco o $E_{\text{méd}}$ e aumentando levemente o fator de uniformidade U.

4.3 Análise de viabilidade econômica

Considerando os modelos apresentados, é feita uma análise de viabilidade econômica da implementação do projeto proposto em substituição ao sistema de iluminação atual. A metodologia aplicada e apresentada antneriormente consiste em avaliar o custo anualizado com consumo de energia elétrica de cada sistema, o custo inicial de substituição das luminárias por aquelas de tecnologia LED e a diferença nos custos de manutenção entre eles.

A Samarco é atendida numa tensão de 138kV e pertence ao ambiente de contratação livre (ACL), sendo assim, negocia a compra de energia diretamente com a fonte geradora. Por questões de *compliance* não obteve-se acesso ao valores praticados pela empresa nas negociações de contratações de compra e distribuição de energia. Para estimar uma média do valor com o custo de aquisição de energia elétrica para o projeto, será utilizado o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD), calculado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) diariamente, definida pela Resolução Normativa ANEEL nº 858/19, e que determina os preços do mercado de curto prazo e é base para o mercado livre de energia (CCEE, 2023). No ano de 2022, o PLD mínimo calculado é de R$55,70/MWh e o máximo estruturado de R$646,58/MWh (CCEE, 2023). Utilizando como base a média desses valores, o custo com energia elétrica é de R$351,14/MWh ou, ainda, R$0,35/kWh, sem incluir o custo de manuteção dos serviços de transporte de energia por meio da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) (ENERGISA, 2022), que aumentaria ainda mais a diferença nos custos de consumo entre as instalações.

A partir dos dados apresentados e do horário de funcionamento, pode-se estimar os custos anuais com energia elétrica para cada cenário, como mostrado na Tabela 17.

Tabela 17 – Comparativo de custos com energia elétrica entre a situação atual e proposta

Cenário	Consumo Anual (kWh)	Custo Anual (R$)
Atual	116.508	40.777,80
Proposto	77.578,56	27.152,50

Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar que há uma redução de mais de 13 mil reais com custo de energia elétrica, sem considerar as perdas nos reatores das lâmpadas de vapor de sódio. A partir disso, é necessário avaliar os custos de aquisição e instalação das novas luminárias. Segundo consulta com revendedores na *internet*, o preço praticado das luminárias, lâmpadas e reatores estão na Tabela 18.

Tabela 18 – Comparativo de custos com energia elétrica entre a situação atual e proposta

Item	Custo de aquisição (R$/und.)	Qtd.	Custo de aquisição total (R$)
Atual			
SON-H 350W	30,25	38	1.149,50
Reator VSE400A26 E 400W	266,99	38	10.145,62
Proposto			
BY518P LED210 154W	829,99	54	44.819,46
Luminária LSE10014A	191,99	15	2.879,85
LEDtube 840 T8C 18W	25,11	30	753,30

Fonte: Próprio autor.

A Samarco possui contrato de manutenção elétrica predial de baixa tensão com a empresa Forte. De acordo com informações obtidas, para fins contratuais, a empresa prestadora de serviço recebe por homem-hora trabalhadas (HHT) e que diariamente são consideradas 7 horas úteis para o expediente administrativo. Levando em consideração o cenário do trabalho, a empresa estima que serão necessários dois eletricistas e cinco dias trabalhos para a troca das luminárias do galpão e dois dias para a inserção das novas luminárias nas lojas, totalizando nove dias para a implementação do novo sistema de iluminação. O custo da dária do eletricista gira em torno de R$ 150,00 e R$ 200,00, considerando o salário e periculosidade da função. Além disso, devido a altura do sistema de iluminação do galpão, será necessário o aluguel de uma plataforma elevatória, com custo estimado entre R$ 50,00 e R$ 150,00 a dária. Desta forma, serão necessários cinco dias de aluguel deste equipamento.

Com todas estas considerações, o custo da troca das luminárias do galpão está em média R$ 2.250,00 contando com mão de obra e aluguel de equipamento, ou seja, aproximadamente R$ 41,67 por luminária, e a instalação das novas luminárias nas lojas de R$ 700,00, R$ 46,67 por luminária.

Com esses dados e a Tabela 18 é montado a Tabela 19 que traz um resumo do custo de aquisição e implementação do novo sistema.

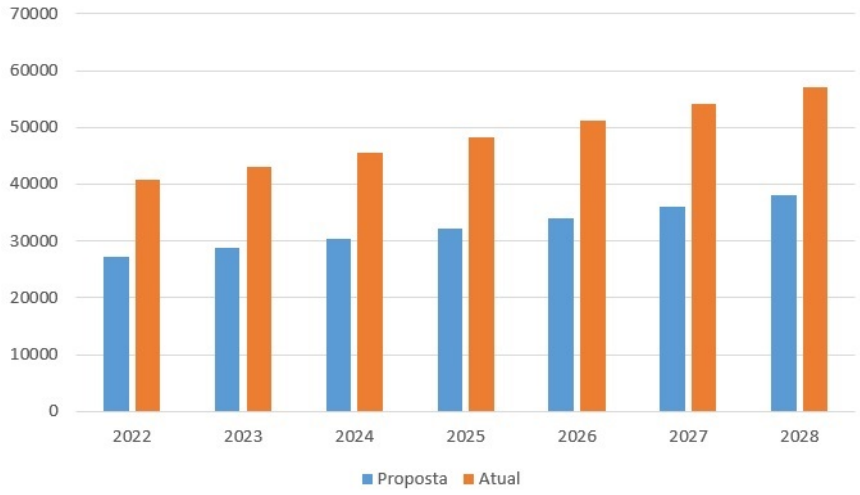
Tabela 19 – Custo total de implementação do novo sistema

	Custo (R$)
Aquisição	48.452,61
Instalação	2.950
Total	**51.402,61**

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 41, é mostrada uma projeção dos custos com consumo de energia para os dois sistemas, levando em consideração um reajuste de acordo com a inflação acumulada no ano de 2022. De acordo com o IBGE, o IPCA de 2022 foi de 5,79%. Embora a Samarco comercialize diretamente com as geradoras de energia, de acordo com o dados da CCEE, o PLD mínimo teve em média 9,12% de aumento entre os anos de 2018 e 2022. A utilização do IPCA é uma projeção otimista, visto que os reajustes anuais na compra de energia elétrica comumente é maior, o que traria um impacto ainda maior nos custos de longo prazo.

Figura 41 – Projeção de custos com energia elétrica



Fonte: Próprio autor.

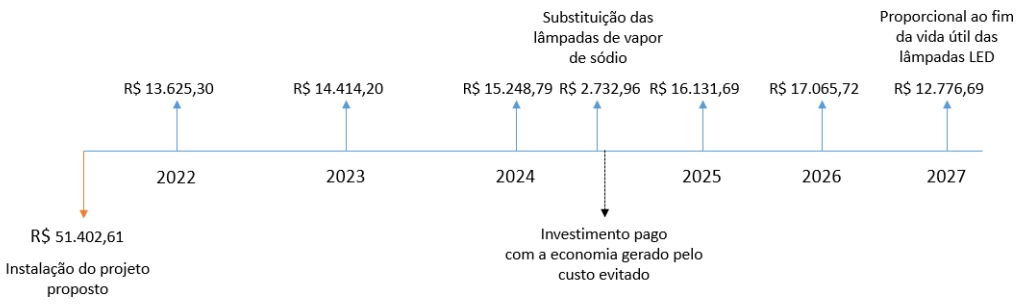
Com base na projeção apresentada na Figura 41, pode-se perceber que com o passar dos anos, a diferença de custos passa a ser mais do que R$ 19 mil.

Sabendo que as lâmpadas de vapor de sódio têm vida útil estimada em 26.000 horas e as de LED de 50.000 horas e utilizando a equação 3.1, a vida útil em anos de cada lâmpadas seria de 2,97 e 5,71, respectivamente. Pode-se afirmar que até a primeira substituição das luminárias LED, haverá necessidade da substituição do conjunto das lâmpadas de vapor de sódio. Levando-se em consideração os valores da Tabela 18, o custo de aquisição por lâmpada é de R$ 30,35, sem considerar a necessidade de substituição dos reatores. O valor

de instalação é de aproximadamente R$ 41,67 devido a similaridade do serviço apresentado anteriormente. Com isso, para as 38 luminárias, serão gastos R$ 2.732,96.

A Figura 42 ilustra uma projeção da economia anual com o novo sistema e uma estimativa do tempo de retorno do investimento no sistema proposto.

Figura 42 – Tempo de retorno do investimento



Fonte: Próprio autor.

Conforme mostrado na Figura 42, em pouco mais de três anos, o investimento inicial na implementação do sistema com tecnologia LED tem retorno pelo custo evitado com consumo de energia elétrica e troca das lâmpadas de vapor de sódio. Analisando a vida útil das lâmpadas de LED adotadas, a economia total com a compra de energia elétrica chega em cerca de R$ 89.262,39, pagando o investimento incial e gerando caixa para a empresa que pode ser aplicado em outras áreas.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão

O objetivo principal deste trabalho foi propor uma análise do atual cenário do sistema de iluminação do galpão de almoxarifado da Samarco Mineração S.A. e avaliar o seu atendimento aos requisitos exigidos pela norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 utilizando as técnicas de medição e planejamento da iluminação descritas por ela. Tal abordagem é motivada pela retomada operacional da Samarco em 2020 e as novas atribuições de trabalho ao local sem avaliação e adequação das condições de iluminção antigas.

Foram discutidos assuntos relacionados aos conceitos básicos de luminotécnica e a norma vigente na elaboração de projetos e verificação de sistemas de iluminação para ambientes de trabalho interno. Também foras discutidas as diferentes tecnologias de fabricação de lâmpadas e luminárias e, dentre elas, a LED e todas as vantagens que ela traz.

Para se obter uma iluminação adequada em todas as áreas de trabalho dentro do galpão, o uso das lâmpadas de LED é o mais indicado por atender aos requisitos de iluminância média mantida e o índice de reprodução de cor. A partir dos resultados apresentados ao longo do trabalho, conclui-se que, além do atendimento, o uso da tecnologia LED possui maior eficiência energética, trazendo redução no consumo de energia elétrica, maior vida útil, reduzindo a necessidade da troca das lâmpadas com mesma frequência, maior IRC, trazendo maior conforto e segurança para os colaboradores e temperatura de cor, gerando um ambiente mais agradável para o desenvolvimento dos trabalhos.

Por fim, este estudo de caso permitiu avaliar pela metodologia proposta, as possíveis melhorias no sistema de iluminação sem afetar a instalação elétrica existente e comprovar a redução no consumo de energia elétrica e o retorno financeiro do investimento incial em curto e médio prazo através de custos evitados, confirmando que, apesar do alto custo inicial de implementação, é viável do ponto de vista financeiro.

5.2 Trabalhos Futuros

Como dito nos objetivos, este trabalho propôs a adequação do sistema de iluminação sem comprometer as instalações elétricas existentes do galpão. Recomenda-se para trabalhos

futuros a simulação com o rearranjo na distribuição das luminárias e verificar se é possível atingir fatores de uniformidade maiores que o melhor cenário deste trabalho, pouco acima do mínimo exigido.

Também, propõe-se um estudo comparativo detalhado das condições de iluminação do galpão pela norma atual vigente ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 utilizando os seus métodos de verificação e das normas ABNT NBR 5413:1992 e ABNT NBR 5382:1985, vigentes à época de construção do edifício.

Por fim, sugere-se também uma análise de viabilidade econômica comparando os cenários por meio de um modelo de resultados possíveis, utilizando, por exemplo, a simulação de Monte Carlo. Ao invés de um conjunto de valores de entrada fixos, como, a vida útil das lâmpadas e custo com energia elétrica, inserir um intervalo de valores estimados e, usando uma distribuição de probabilidade, calcular em quantos cenários um projeto torna-se viável comparado ao outro.

REFERÊNCIAS

ABNT, N. Cie 8995-1: 2013 iluminação de ambientes de trabalho-parte 1: Interior. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2013. Citado 16 vezes nas páginas 33, 34, 35, 36, 37, 41, 45, 46, 48, 52, 55, 56, 58, 62, 63 e 66.

ASSOCIATION, I. A. P. et al. Lighting at work. A Health and Safety Guideline for Your Workplace, 2008. Citado na página 11.

BELLIA, L.; SPADA, G. Photometric characterisation of small sources with high dynamic range illuminance mapping. Lighting Research & Technology, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 46, n. 3, p. 329–340, 2014. Citado na página 36.

BOYCE, P. R. Human factors in lighting. [S.l.]: Crc Press, 2003. Citado 4 vezes nas páginas 11, 12, 18 e 35.

CCEE. Conceitos de Preços. 2023. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/precos/conceitos-precos>. Acesso em: 23 Jan. 2022. Citado na página 67.

COSTA, G. J. C. da. Iluminação econômica: cálculo e avaliação. [S.l.]: Edipucrs, 2006. v. 5. Citado 4 vezes nas páginas 17, 18, 19 e 20.

ENERGISA. Setor elétrico brasileiro. 2022. Disponível em: <https://ri.energisa.com.br/a-energisa/setor-eletrico-brasileiro-2/>. Acesso em: 23 Jan. 2023. Citado na página 67.

FILHO, J. M. Instalações elétricas industriais: exemplo de aplicação. [S.l.]: Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2010. Citado 16 vezes nas páginas 11, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31 e 32.

FREITAS, P. C. F. de; AMARAL, L. de A.; LIMA, G. B. de; GUIMARÃES, M. Luminotécnica e lâmpadas elétricas. [S.l.]: Faculdade de, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 33.

GIACOBBO, J. Estudos de caso comparativos entre normas de iluminação: Nbr 5413 e nbr iso 8995-1. 2014. Citado na página 34.

HARA, C. K. et al. Análise qualitativa da iluminação artificial e natural: estudo de caso das bibliotecas da UTFPR. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015. Citado na página 47.

OSRAM. Iluminação: Conceitos e projetos. 2005. Disponível em: <http://www.osram.com.br/osram_br/Ferramentas_&_Catlogos/_pdf/Arquivos/Iluminao_Geral/Manual_do_Curso_Iluminacao,_Conceitos_e_Projetos/Manual_Luminotecnico_-_parte_01.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2022. Citado 3 vezes nas páginas 17, 21 e 22.

OSTERHAUS, W. K. Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments. Solar Energy, v. 79, n. 2, p. 140–158, 2005. ISSN 0038-092X. CISBAT '03: Innovation in Building Envelopes and Environmental Systems. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X04003536>. Citado na página 36.

PESSOAS, P.-R. d. G. de. Conforto visual e iluminação no trabalho. 2020. Citado na página 18.

PHILIPS. CorePro LEDtube EM/Mains. 2023. Disponível em: <https://www.lighting.philips.com.br/prof/lampadas-e-tubos-led/led-tubulares/corepro-ledtube-em-mains/929001999872_EU/product>. Acesso em: 06 jul. 2022. Citado na página 64.

PHILIPS. GreenUp Round Highbay. 2023. Disponível em: <https://www.lighting.philips.com/main/prof/indoor-luminaires/high-bay-and-low-bay/high-bay/greenup-round-highbay/911401645208_EU/product>. Acesso em: 06 jul. 2022. Citado na página 62.

PHILIPS. GreenUp Round Highbay. 2023. Disponível em: <https://www.lighting.philips.com/main/prof/indoor-luminaires/high-bay-and-low-bay/high-bay/greenup-round-highbay/911401645108_EU/product>. Acesso em: 06 jul. 2022. Citado na página 64.

PHILIPS. SON high pressure sodium. 2023. Disponível em: <https://www.lighting.philips.com/main/prof/conventional-lamps-and-tubes/high-intensity-discharge-lamps/son-high-pressure-sodium/son-h/928153509830_EU/product>. Acesso em: 06 jul. 2022. Citado na página 51.

RAMOS, A. Fisiologia da visão. Um Estudo Sobre o “Ver” e o “Enxergar”. Análise do Simbólico no Discurso Visual, PUC (Universidade Católica do Rio de Janeiro), Brazil, 2006. Citado na página 17.

ROBERTO, T. J.; SCHULTZ, E. L. Estudo comparativo de sistemas de iluminação pública: Lâmpadas led, lâmpadas de indução e lâmpadas a vapor de sódio. Revista Técnico-Científica, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 32.

TÉCNICAS, N. Iluminância de interiores. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. Citado na página 33.

TEIXEIRA, G. A. Índice de ofuscamento unificado. Lume Arquitetura, n. 75, p. 62–67, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 35, 36, 41 e 42.

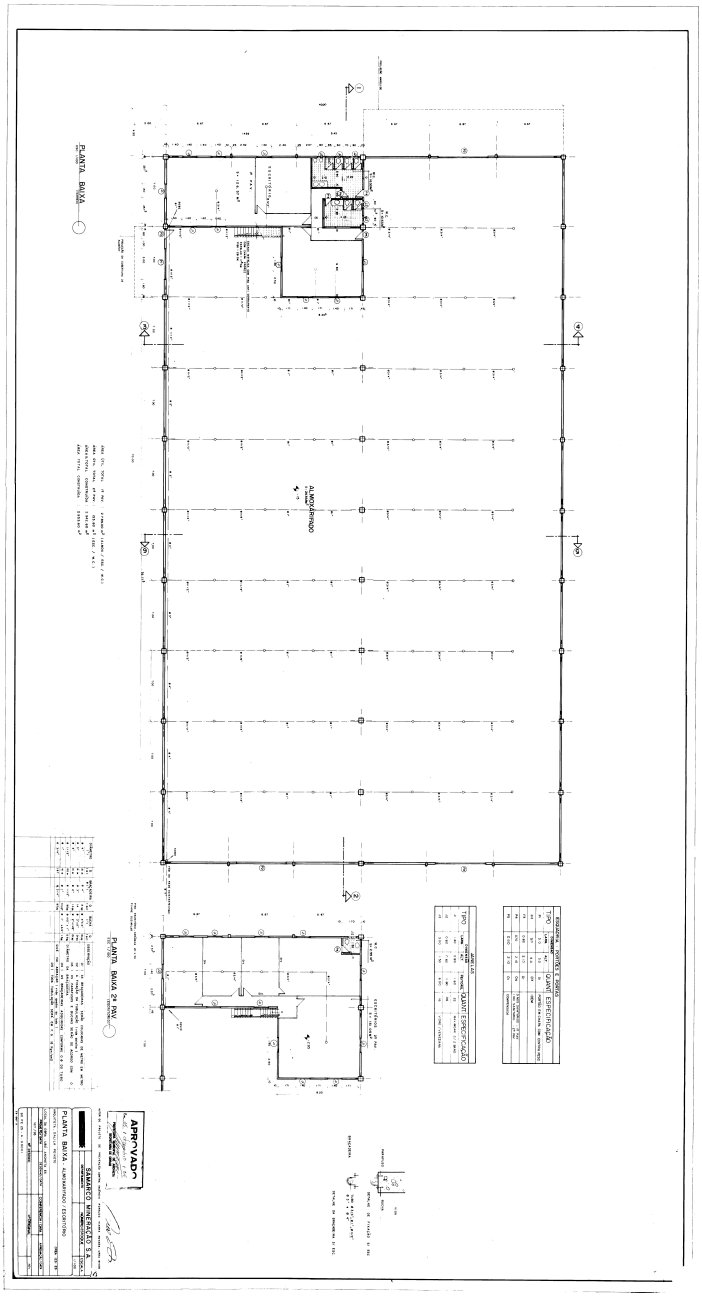
VERLY, K. F. D. O.; OLIVEIRA, M. V. M. D. Análise de viabilidade econômica da implantação da tecnologia led na iluminação pública de ipanema mg. 2014. Citado 3 vezes nas páginas 32, 33 e 48.

ZANQUINI, T. A evolução da iluminação. 2021. Disponível em: <https://naville.com.br/pt/blog/a-evolucao-da-iluminacao/>. Citado na página 11.

APÊNDICE A – PLANTA BAIXA ESTRUTUAL DO GALPÃO

Mostra-se na Figura 43 a planta baixa estrutual do galpão da Samarco Mineração S.A. projetado em setembro de 1995. Esse possui 70 m de comprimento por 40 m de largura. O pé direito do galpão é de 10 m nas paredes laterais e 12 m no centro e contém dois andares de escritórios internos de 2,8 m cada.

Figura 43 – Planta baixa do galpão



Fonte: Samarco Mineração S.A.