

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

**JOÃO MARCOS CAMPOS CARDOSO
RODRIGO MENDROT RONCONI**

**REDUÇÃO DE CUSTO COM ENERGIA ELÉTRICA
DENTRO DA INDÚSTRIA:**

**Luminotécnica para otimização de uso de energia elétrica para
iluminação industrial em uma multinacional no ramo de
autopeças.**

**TAUBATÉ-SP
2019**

**JOÃO MARCOS CAMPOS CARDOSO
RODRIGO MENDROT RONCONI**

**PROJETO DE REDUÇÃO DE CUSTO COM ENERGIA
ELÉTRICA DENTRO DA INDÚSTRIA:
Luminotécnica para otimização de uso de energia elétrica para
iluminação industrial em uma multinacional no ramo de
autopeças.**

Trabalho de Graduação apresentado para
obtenção do Certificado de Graduação do
curso de Engenharia elétrica do
Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade de Taubaté.

Orientador (a): Prof. Rubens Castilho

TAUBATÉ-SP

2019

SIBi - Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

C268p Cardoso, João Marcos Campos
Projeto de redução de custo de energia elétrica dentro da indústria:
luminotécnica para otimização de uso de energia elétrica para
iluminação industrial em uma multinacional do ramo de autopeças / João
Marcos Campos Cardoso, Rodrigo Mendrot Ronconi. – 2019.
66f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento
de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.

Orientação: Prof. Rubens Castilho Junior, Departamento de
Engenharia Elétrica.

1. Iluminação. 2. Lâmpada. 3. Redução de energia. I. Ronconi,
Rodrigo Mendrot. II. Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica. III.
Título.

CDD 621.3

JOÃO MARCOS CAMPOS CARDOSO
RODRIGO MENDROT RONCONI

**PROJETO DE REDUÇÃO DE CUSTO COM ENERGIA
ELÉTRICA DENTRO DA INDÚSTRIA:
Luminotécnica para otimização de uso de energia elétrica para
iluminação em uma multinacional no ramo de autopeças.**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO APROVADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA"

BANCA EXAMINADORA: APROVADO

Prof. Rubens Castilho
Orientador/UNITAU-DEE

Prof. João Roberto de Moraes
Professor/UNITAU-DEE

Eng. Marcus Vinícius de Moraes
Membro Externo

Taubaté-SP

2019

De modo especial as nossas famílias e namoradas, que sempre incentivaram
nossos estudos e nos acompanharam nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Acreditamos que tudo se inicia com um sonho. Sonhamos e dia após dia somando pequenos esforços, estamos por alcançar um dos desejos dos muitos que se levantaram no decorrer deste tempo.

Tivemos muitas dificuldades nesta jornada, tantas que, por inúmeras vezes, quase nos fizeram desistir, entretanto, compartilhamos de algo em comum que nunca deixou que isso acabasse: a ambição de buscar conhecimento, e com isso nunca desistir de procurar evoluir, o conhecimento e a ambição são universalmente compatíveis com qualquer sonho.

Fomos ambiciosos de formas diferentes, um com mais vontade do que o outro em certos momentos, porém sempre de forma positiva um apoiando o outro em todas as dificuldades desde o início deste curso, por isso primeiramente agradecemos um ao outro, e por podermos ter tido a oportunidade deste companheirismo mútuo desde o primeiro ano do curso.

Não podemos deixar de agradecer também aos que estiveram nos ajudando, fortalecendo, motivando e acreditando no nosso potencial.

A esta universidade e a toda sua direção eu deixo uma palavra de agradecimento por todo ambiente inspirador e pela oportunidade de concluir este curso, junto a todas as pessoas que a tornam assim tão especial o campus a quem o conhece.

Ao professor Rubens Castilho em especial, nosso orientador que tão bem nos acolheu na universidade com sua simplicidade, estímulo e por acreditar na realização deste trabalho e em nosso potencial para realizá-lo. Reconhecemos a paciência e o esforço. E também ao nosso professor convidado Leonardo, que em suas aulas sempre nos inspirou. Bem como todos professores que contribuíram na orientação incansável, o empenho e a confiança que ajudou a tornar possível este sonho tão especial.

E por fim, os nossos sinceros agradecimentos também ao nosso coorientador Marcus Vinícius de Moraes que nos auxiliou na conclusão desse projeto.

“Primeiramente dedico este trabalho a Deus por me dar saúde e vida para concluir essa missão e juntamente aos meus Pais, que me criaram e tornaram esse sonho possível, e me deram a coragem para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidades. E também, agradeço aos amigos que estavam do meu lado nesta jornada, minha irmã Mariane que sempre me apoiou e ajudou nas dificuldades, a minha namorada Tamires pelo entendimento em diversas situações que a faculdade proporcionou. Enfim agradeço a todos que contribuíram acreditando no meu louvor e não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida, estas me fizeram ser quem eu sou como pessoa e profissional.” – Rodrigo Ronconi

“Dedico esse trabalho ao meu Pai Renê, e a minha mãe Rita, pelo amor, empenho e dedicação que sempre tiveram comigo, e por fazerem dessa jornada, a melhor possível dentro de suas possibilidades. Também dedico a minha namorada Bruna por estar sempre me apoiando para a conclusão desse objetivo.” – João Marcos Cardoso

“Que todos os nossos esforços estejam sempre focados no desafio à impossibilidade. Todas as grandes conquistas humanas vieram daquilo que parecia impossível”
(Charles Chaplin).

RESUMO

O setor elétrico vem buscando inovações para o seu desenvolvimento tecnológico, visando aprimorar financeiramente suas metodologias em grandes indústrias. Esse tema é abrangente nas empresas de pequeno, médio e grande porte, devido ao investimento com payback (retorno do investimento) baixo e a melhoria em qualidade visual, contribuindo para o crescimento e competitividade no mercado. Foi realizado um estudo a fim de reduzir o consumo de energia elétrica de uma empresa automobilista, evidenciando que o maior GAP energético estava no sistema de iluminação por lâmpadas fluorescentes e de vapor metálico, impactando negativamente nas finanças e no resultado final do produto. Dessa forma foi analisado que o maior potencial de ganho se encontrava na troca da iluminação obsoleta pelo uso da tecnologia das lâmpadas LED's.

PALAVRAS-CHAVES: Iluminação. Lâmpada. Redução de energia.

ABSTRACT

The electric sector has been seeking innovations for its technological development, aiming at financially improving its methodologies in large industries. This theme is comprehensive in small, medium and large companies, due to the investment with low payback and improved visual quality, contributing to growth and competitiveness in the market. An in-depth study was carried out to reduce the electric power consumption of a motor company, showing that the largest energy gap was in the lighting system by fluorescent lamps and metal vapor, negatively impacting the finances and the final result of the product. Thus, it was analyzed that the greatest potential gain was in the exchange of obsolete lighting for the use of LED's lamp technology.

KEYWORDS: Energy reduction. Lighting. Lamp.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Lâmpada Incandescente..... | 17 |
| Figura 2 - Espectro eletromagnético | 18 |
| Figura 3 - Esquema de ligação das lâmpadas de vapor metálico | 19 |
| Figura 4 - Componentes das lâmpadas de vapor metálico | 21 |
| Figura 5 - Lâmpadas fluorescentes - funcionamento | 21 |
| Figura 6- Lâmpadas fluorescentes | 22 |
| Figura 7 - Espectro visível | 23 |
| Figura 8 - Linha do tempo, LED. | 24 |
| Figura 9 - Tabela comparativa..... | 27 |
| Figura 10 - Componente LED..... | 28 |
| Figura 11 - Componente LED..... | 28 |
| Figura 12 - Curva fotométrica – Curva polar | 31 |
| Figura 13 - Iluminância x Luminância | 33 |
| Figura 14 - Visão geral dos setores. PRÓPRIA AUTORIA (2019). | 37 |
| Figura 15 -Visão dos setores “ESTAMPARIA” | 39 |
| Figura 16 - Visão dos setores “SOLDA” | 41 |
| Figura 17 - Visão dos setores “Montagem & Pintura” | 42 |
| Figura 18 - Visão dos setores “Hot Stamping” | 43 |
| Figura 19 - Visão dos setores “Roll Forming” | 44 |
| Figura 20 - Visão dos setores “Nave Oeste” | 45 |
| Figura 21 - Norma ABNT “Estamparia e Ferramentaria” | 47 |
| Figura 22 - Norma ABNT "Solda" | 47 |
| Figura 23 - Norma ABNT "Montagem" | 48 |
| Figura 24 - Norma ABNT “Hotstamping” | 48 |
| Figura 25 - Norma ABNT “Roll forming” | 49 |
| Figura 26 - Norma ABNT "Nave Oeste" | 49 |
| Figura 27 - Medições do luxímetro | 51 |
| Figura 28 - Medições do luxímetro | 52 |
| Figura 29 - Medições do luxímetro | 52 |
| Figura 30 - Medições do luxímetro | 53 |
| Figura 31 - Medições do luxímetro | 53 |
| Figura 32 - Medições do luxímetro | 54 |
| Figura 33 - Medições do luxímetro | 54 |
| Figura 34 - Medições do luxímetro | 55 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - FLUXO LUMINOSO – RENATO LIMA, 2018 | 30 |
| Tabela 2 - Fatores de manutenção recomendados..... | 35 |
| Tabela 3 - Fatores de manutenção recomendados..... | 35 |
| Tabela 4 - Dados coletados nos setores | 50 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 - Consumo x gasto geral planta. | 39 |
| Gráfico 2- Consumo x Gasto "Estamparia" | 40 |
| Gráfico 3 - Consumo x gasto "Solda". | 42 |
| Gráfico 4 - Consumo x gasto "Montagem e Pintura". | 43 |
| Gráfico 5 - Consumo x gasto "Hot Stamping" | 44 |
| Gráfico 6 - Consumo x gasto "Roll Forming". | 45 |
| Gráfico 7 - Consumo x gasto "Nave oeste". | 46 |
| Gráfico 8 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto | 56 |
| Gráfico 9 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto | 57 |
| Gráfico 10 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto "Montagem e pintura" | 57 |
| Gráfico 11 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto "Hot Stamping" | 58 |
| Gráfico 12 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto "Roll Forming" | 58 |
| Gráfico 13 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto "Nave oeste" | 59 |
| Gráfico 14 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto "Área externa" | 59 |
| Gráfico 15 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto | 60 |
| Gráfico 16 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto | 60 |

SUMÁRIO

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 | Início da lâmpada | 16 |
| 2.2 | Percepção do olho humano | 17 |
| 2.3 | Tipos de lâmpadas..... | 18 |
| 2.3.1 | Lâmpada vapor metálico | 18 |
| 2.3.1.1 | Aplicações..... | 19 |
| 2.3.1.2 | Funcionamento..... | 20 |
| 2.3.2 | Lâmpada fluorescentes | 21 |
| 2.3.2.1 | Características típicas: | 22 |
| 2.3.3 | LED – Diodo Emissor de luz (Light Emitting Diode)..... | 23 |
| 2.3.3.1 | História | 23 |
| 2.3.3.2 | Definição | 26 |
| 2.3.3.3 | Simbologia..... | 28 |
| 2.3.3.4 | Identificação e Ligação correta do LED..... | 28 |
| 2.3.3.5 | Funcionamento..... | 29 |
| 2.3.4 | Luminotécnica..... | 29 |
| 2.3.5 | Conceito e grandezas fundamentais | 30 |
| 2.3.5.1 | Fluxo Luminoso | 30 |
| 2.3.5.2 | Intensidade Luminosa | 31 |
| 2.3.5.3 | Curva de distribuição de intensidade luminosa | 31 |
| 2.3.5.4 | Luminância | 32 |
| 2.3.5.5 | Iluminância | 32 |
| 2.3.6 | Cálculo luminotécnico..... | 33 |
| 2.3.7 | Coeficiente de utilização | 34 |
| 2.3.7.1 | Fator de manutenção | 35 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 36 |
| 4 | DESENVOLVIMENTO | 37 |
| 4.1 | Mapeamento - Completo..... | 37 |
| 4.2 | Cenário de Iluminação Atual – Mapeamento Completo | 38 |
| 4.3 | Mapeamento - Estamparia | 39 |
| 4.4 | Mapeamento - Solda | 41 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.5 | Mapeamento – Montagem & Pintura..... | 42 |
| 4.6 | Mapeamento – Hot Stamping..... | 43 |
| 4.7 | Mapeamento – Roll Forming | 44 |
| 4.8 | Mapeamento – Nave Oeste | 45 |
| 4.9 | Especificações da Norma ABNT NBR ISSO/IEC 8995-1:2013 | 46 |
| 4.9.1 | Setor: Estamparia e Ferramentaria..... | 47 |
| 4.9.2 | Setor: Solda | 47 |
| 4.9.3 | Setor: Montagem | 48 |
| 4.9.4 | Setor: Hot Stamping | 48 |
| 4.9.5 | Setor: Roll Forming | 49 |
| 4.9.6 | Setor: Nave Oeste | 49 |
| 4.10 | Aferição de dados | 50 |
| 4.10.1 | Medições de iluminância –Estamparia – Norma 300 lux | 51 |
| 4.10.2 | Medições de iluminância – Ferramentaria – Norma 750 lux..... | 51 |
| 4.10.3 | Medições de iluminância – Ferramentaria – Norma 750 lux..... | 52 |
| 4.10.4 | Medições de iluminância –Solda – Norma 300 lux | 52 |
| 4.10.5 | Medições de iluminância – Montagem & Pintura – Norma 300 lux..... | 53 |
| 4.10.6 | Medições de iluminância –Hot Stamping – Norma 300 lux..... | 53 |
| 4.10.7 | Medições de iluminância – Roll Forming – Norma 300 lux..... | 54 |
| 4.10.8 | Medições de iluminância – Nave Oeste – Norma 300 lux | 55 |
| 5 | RESULTADOS E CONCLUSÕES | 56 |
| 6 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 62 |

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia e a necessidade de lucrar mais gastando menos, surgem meios que dão a opção de reduzir os custos. Assim acontece no ramo dos sistemas de iluminação em geral. Um assunto que vem se tornando cada vez mais comum nos dias atuais, por se tratar de uma melhoria de ganho rápido e eficiente. Dentro desse contexto se encaixa o estudo de luminotécnica, que se baseia na implementação de luz artificial em ambientes internos e externos.

Com as novas possibilidades no mercado de lâmpadas com baixo consumo de energia, as lâmpadas LEDs (Diodo emissor de Luz) entram como um grande alicerce no que se faz referência a eficiência energética e conseqüentemente a redução de custos. Antes usadas apenas para fins de sinalização, a tecnologia ganhou espaço e vem se tornando unanimidade por todos os lugares.

No ramo industrial, as luminárias impactam diretamente nos números finais, com proporções absurdas devido à alta demanda no consumo de energia, levando em consideração somente as lâmpadas fluorescentes e de vapor metálico instaladas à anos nos setores, foi realizado um estudo detalhado desses números para comprovar na prática os retornos positivos que o investimento teoricamente elevado (devido ao alto custo) nos garantem em pouco tempo, com ganhos de diversos aspectos, tais como:

- **Visual:** Credibilidade no ramo, atualmente com a concorrência em massa no ramo fabril, é imprescindível um bom aspecto visual, atribuindo valores para as visitas de clientes e fornecedores, assim, abrindo novas oportunidades de contratos e aumento nas divulgações da marca.
- **Segurança:** Vinculado diretamente com a qualidade dos produtos, que são desenvolvidos de maneira minuciosa devido ao processo complexo de vários setores englobados como: estamparia, soldagem, inspeção, montagem e pintura.

- **Financeiro:** Ponto decisivo e com maior vitrine para a implementação do projeto luminotécnico, devido sua viabilidade com payback baixo, reduzindo desperdício.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo estudado aqui se refere a melhoria no sistema de iluminação de um ambiente fabril, que visa não apenas a diminuição do consumo energético, mas também a melhora no quesito qualidade, tendo como base normas e especificações para linhas de inspeção final.

2.1 Início da lâmpada

Ao compararmos a luz artificial dos dias de hoje com as utilizadas que começaram, percebe-se a grandiosidade do passo dado na indústria de iluminação do Século XX. A criação de Thomas Edison até o que temos no mercado atual, ocorreu um avanço imenso. (RENATO, 2018).

A lâmpada da qual se tem notícia que foi a primeira a fazer uso da eletricidade, não foi a de Thomas Edison conforme é divulgado, no fim do século XIX, um sistema de iluminação já era usado nas áreas públicas, que era constituída por eletrodos a base de carvão e ao colocados próximos um do outro era permitido a passagem de descarga elétrica. Era conhecida como lâmpada de arco, pois emitia uma luz branca intensa e que também se fazia utilidade nos faróis de navegação. Mas o principal problema desse tipo de lâmpada estava por conta da quantidade alta de luz emitida, impossibilitando o uso dela em lugar residencial ou comercial. (JEANINI MARCHIORI, 2010).

Com isso a lâmpada criada por Thomas Edison foi a primeira a ser utilizada em ambientes fechados, e chamada de lâmpada comercial. Era composta por um fio carbonizado e um cadinho completamente fechado, produzia uma emissão de luz fraca e amarelada, tendo um desempenho de 1,42 lumens/watts. O desafio estava em manter o filamento aceso durante a passagem de corrente elétrica. (RICARDO GEDRA, 2015).

Figura 1 - Lâmpada Incandescente



Fonte: André Ribeiro, 2016

A invenção passou por diversas barreiras para ser utilizada, por conta do recurso a ser utilizado e pela energia elétrica necessitar de grandes investimentos e ser considerado artigo de luxo na época, mas a intensão era de quebrar a barreira quanto ao uso de gás e vapor e incluir a lâmpada incandescente mais difundida na época. Mas muda-se a época e continuam os paradigmas relacionados a vantagens tecnológicas x custos de investimentos.

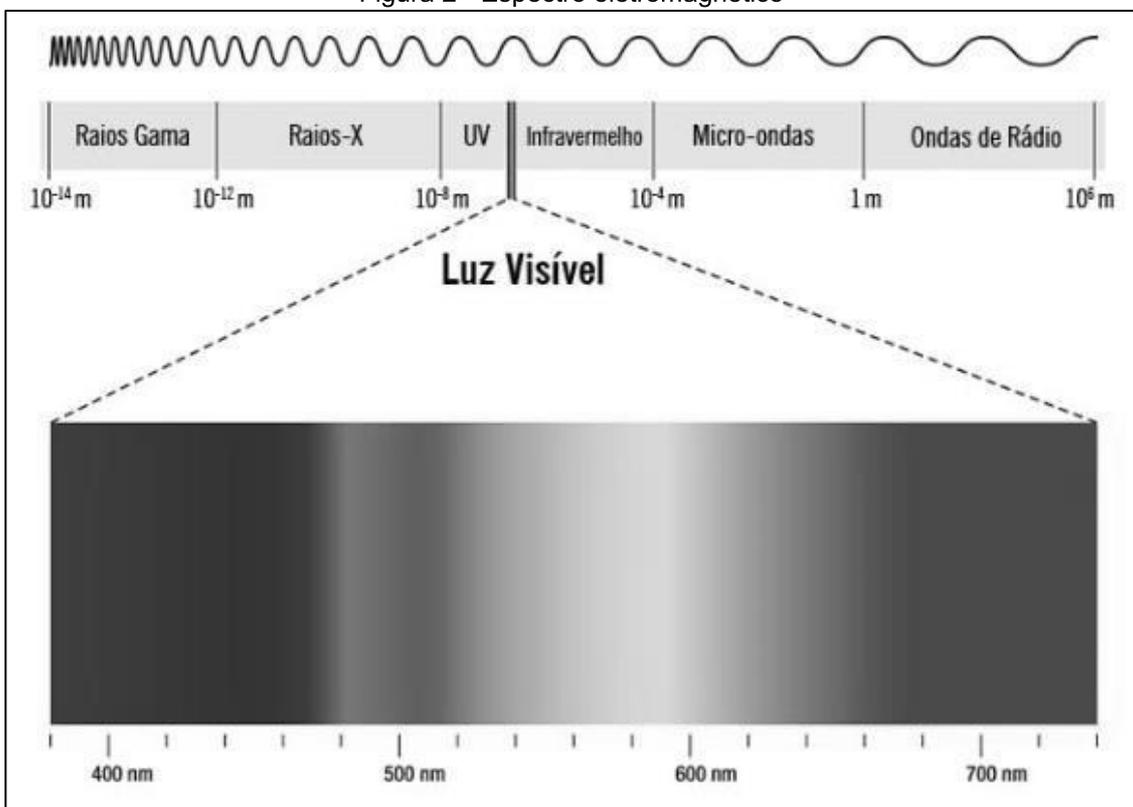
Com o aumento dos custos de produção de energia elétrica nos países mais desenvolvidos, principalmente os Estados Unidos, onde a maior parte da energia vem de usinas nucleares, se faz necessário o uso de sistemas de iluminação mais eficientes. Com o investimento para a construção de usinas e de transmissão de energia muito alto, os governos implementam programas intensivos afim de promover o uso de equipamentos com eficiência energética. (JEANINI MARCHIORI, 2010).

2.2 Percepção do olho humano

A cor é ligada com os diferentes tipos de comprimento das ondas do espectro eletromagnético e analisada pela sensação de claridade. As faixas de radiação dessas ondas eletromagnéticas são detectadas pela visão humana e está entre os 380nm e 780nm. (JEANINI MARCHIORI, 2010).

As ondas eletromagnéticas visíveis são delimitadas pelas ondas infravermelhas que tem uma onda de comprimento maior e do outro lado as ondas ultravioletas de menor comprimento, conforme mostra a figura.

Figura 2 - Espectro eletromagnético



Fonte: Toda matéria (2014)

2.3 Tipos de lâmpadas

2.3.1 Lâmpada vapor metálico

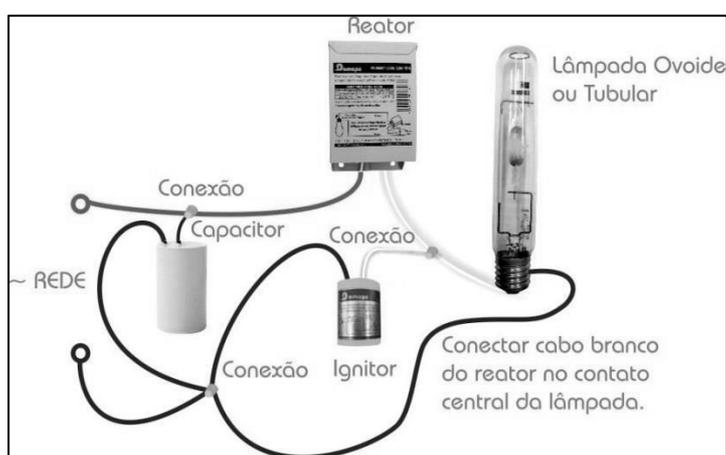
Em 1980 com o progresso das lâmpadas de vapor de mercúrio, surgiram as lâmpadas de vapor metálico. A distinção entre os dois tipos de iluminação baseava-se no acréscimo das misturas de iodetos metálicos ao tubo de descarga da lâmpada, unidos eles permitiam uma melhora relevante na emissão de cores por meio do fluxo luminoso.

Essas lâmpadas permitem uma excelente emissão de cores, com qualidade muito acima das lâmpadas de mercúrio. Apresentam capacidade de

temperatura de cor em torno de 4000k, alta eficiência energética se comparada a sua similar de mercúrio.

São produzidas na forma de tubo e ovoide, dado que no caso de serem ovoidais apresentam um revestimento que eleva a irradiação de luz, no entanto diminui a capacidade luminosa da lâmpada. Atualmente encontramos as lâmpadas de vapor metálico entre as potências de 440 W a 2.200 W, com os 10% aplicados ao uso do reator. (HENRIQUE MATTEDE, 2017)

Figura 3 - Esquema de ligação das lâmpadas de vapor metálico



Fonte: Henrique Mattede (2017)

2.3.1.1 Aplicações

Por terem uma ótima fluidez luminosa, essas lâmpadas são recomendadas no uso em áreas abertas, tais como praças e estacionamentos. Em relação a processos e ambientes industriais são recomendados para o uso em galpões onde se faz preciso o uso da iluminação para controle de inspeção visual de produção a fim de certificar a qualidade de inspeção por conta de um melhor detalhamento dos objetos por meio do alto índice de luminosidade com ótima reprodução e definição de cores. (HÉLIO CREDER, 1991.)

Com tempo médio útil de vida em torno de 24.000 horas e com capacidade luminosa de 97 lumens / watts, a projeção de cor dessas lâmpadas pode alternar entre 85 a 95 (IRC), tornando melhores que sua antecessora que

tinha capacidade de 18.000 horas de vida útil, com 60 lumens/watts e 40 (IRC). (ANDRÉ RIBEIRO, 2016.)

2.3.1.2 Funcionamento

As lâmpadas são formadas de um tubo menor de quartzo, em que normalmente são anexados em seus extremos dois eletrodos principais e um eletrodo de auxílio, que são unidos em série com uma resistência de medida elevada.

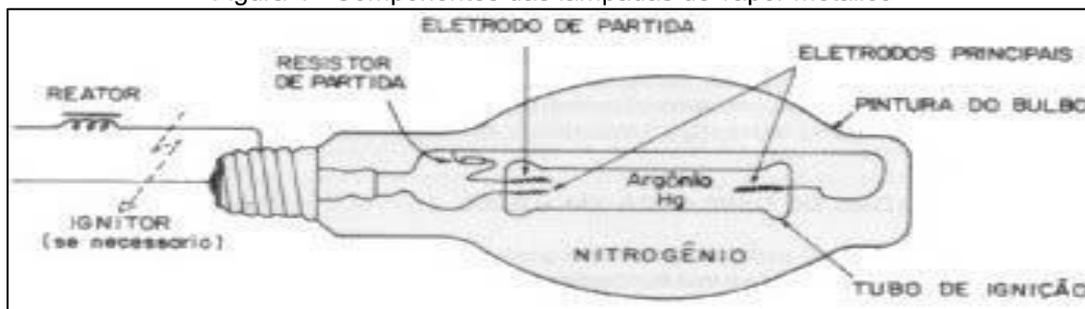
Dentro do tubo é inserida a misturas dos metais, junto com pouca quantidade de mercúrio, juntamente é colocado um gás inerte normalmente argônio, para ajudar na criação do choque inicial. (HENRIQUE MATTEDE, 2017).

Ao se aplicar uma tensão nos terminais dessa lâmpada, com isso se cria um campo elétrico através do eletrodo principal e o eletrodo auxiliar, ocasionando uma criação de arco elétrico em meio aos dois, com isso o calor produzido pelo arco esquentas as substâncias que emitem luminosidade, dando como resultado o processo de ionização desse gás e como consequência a produção do vapor metálico.

É nesse instante que se dá a descarga dos elétrons junto aos átomos de vapor metálico no interior do tubo, modificando a disposição atômica da substância, a energia luminosa é emitida com a liberação da energia desses átomos atingidos assim que eles regressam a estrutura natural. (BENJAMIN BARROS, 2015).

Esse tipo de luminária necessita do reator para manter a corrente no nível projetado da lâmpada, na parte elétrica os reatores funcionam como reatância em série do circuito, tornando-se um componente fundamental para o uso correto desse método de iluminação.

Figura 4 - Componentes das lâmpadas de vapor metálico



Fonte:

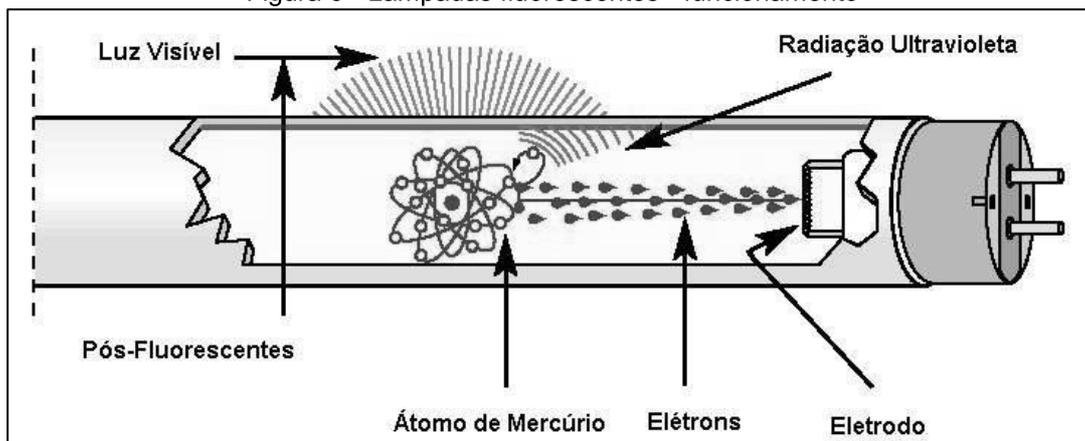
2.3.2 Lâmpada fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes tubulares sempre foram muito utilizadas, ao contrário das lâmpadas compactas que não tinham muito mercado de comercialização. Implementadas no Brasil após o apagão no ano de 2000.

A lâmpada fluorescente é um tubo de vidro revestido internamente com matérias fluorescentes à base de fósforo, com um par de eletrodos metálicos na forma de filamentos de tungstênio (cátodos), em cada extremo.

O tubo da lâmpada é preenchido com um gás raro inerte de argônio ou vapor mercúrio à baixa pressão. Durante a passagem de corrente elétrica pela tubulação é produzida luz. (MOREIRA, Vinicius de Araujo)

Figura 5 - Lâmpadas fluorescentes - funcionamento



Fonte: Catálogo Philips SILHOUETTE T5 (2019)

2.3.2.1 Características típicas:

As lâmpadas fluorescentes, possuem em sua estrutura a letra “T” (tubular) juntamente com um dígito numeral que indica o valor do seu diâmetro máximo em oitavos de polegadas (pol) conforme exemplo da figura 6.

Figura 6- Lâmpadas fluorescentes



Fonte: Google imagens (2019)

As particularidades colorimétricas responsáveis pelas amostragens de tons e temperatura de cor, juntamente com a eficácia desse tipo de lâmpada são definidas pela composição e espessura do elemento fósforo.

Os “fósforos” são excitados pela energia recebida da radiação ultravioleta gerada pela ionização dos gases, gerando assim luz. Desenvolvidos durante a década de 70, por estudos realizados em seres humanos quebrou-se um paradigma até então desconhecido, descobriu-se que não há necessidade de a fonte de luz cobrir todo o comprimento do espectro visível, pois a sensibilidade do olho humano não possui a mesma sensibilidade para os diversos níveis de cor devido a diferentes frequências das ondas eletromagnéticas.

Estas faixas são divididas em três partes sendo os extremos (vermelho ao violeta) e centralizadas na frequência verde. A partir deste marco, foi proposto pela empresa americana Westing house a fabricação de lâmpadas

com três modos de frequência (azul, verde e vermelho) para se adaptar aos mecanismos da visão do ser humano, sendo feita a combinação entre estes compostos, juntamente com a camada de halofosfato, consequentemente melhorando a eficácia luminosa e a reprodução de cores das lâmpadas fluorescentes.

A partir desse método, foram produzidos novos produtos com as emissões próximas as bordas desses espectros, e assim nasceu à família de lâmpadas “trifósforo”. (FONSECA, Romulo Soares.)



Fonte: Google imagens (2019)

Hoje em dia, as lâmpadas fluorescentes são comuns serem comercializadas com características de diâmetro ainda menor, por exemplo, 8/8 polegadas. O custo ainda é elevado e tem desvantagens pela utilização de reator e contadores (starter) no processo, porém é compensado pelo aumento significativo da luminosidade.

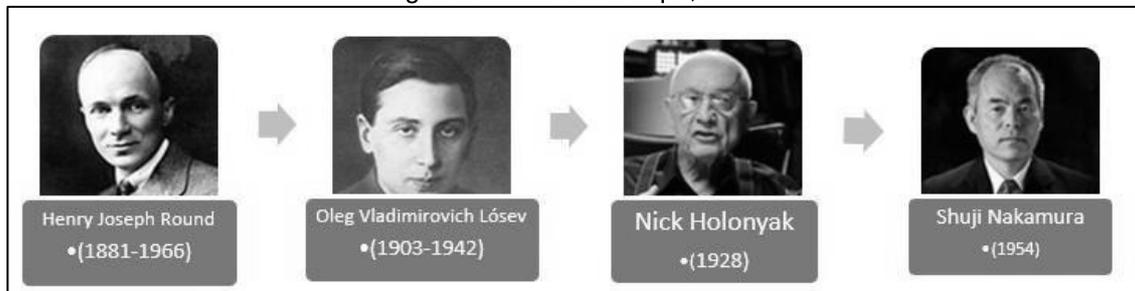
2.3.3 LED – Diodo Emissor de luz (Light Emitting Diode)

2.3.3.1 História

O LED surgiu por volta de 1962, criado pelo engenheiro americano e inventor Nick Holonyak Jr. Primeiramente na cor vermelha e recebeu desdobramentos históricos ao longo dos anos. Para nos ajudar a entender de forma mais ampla esse acontecimento, é preciso ser feito um detalhamento por

meio de linha do tempo considerando o trabalho de outros estudiosos anteriores e posteriores ao fato.

Figura 8 - Linha do tempo, LED.



Fonte: Próprio (2019)

O engenheiro britânico, Henry J. Round, foi um dos primeiros pioneiros da rádio, responsável pelas primeiras descrições sobre o estudo eletroluminescência (princípio básico dos LEDs) por meio de um diodo de estado sólido. Tal relato foi descoberto durante a realização de um teste para a amplificação dos sinais do rádio. Round, ao aplicar tensão sobre semicondutores, percebeu que alguns deles eram capazes de emitir luz através da passagem de corrente elétrica. Após a descoberta, encaminhou sua experiência em nota para a revista *Elétrica World*, que citou em 2 parágrafos, aproximadamente 24 linhas tal acontecimento, e reportou o feito realizado, no dia 09 de fevereiro de 1907. Nessa nota, ele cita a emissão de luz no carboneto de silício durante seus trabalhos com os detectores de bigodes do gato, essas luzes variavam de acordo com a voltagem recebida, para valores baixos de voltagem notou a cor mais amarelada e para valores de voltagens mais elevadas percebeu a presença da cor amarela, verde claro, laranja e azul em diferentes regiões dos cristais. Round, ainda menciona que em todos os testes realizados, ele observou que o brilho na luz aparentava direcionar sempre do polo negativo e uma faísca verde água brilhava no polo positivo. Notando que poderia haver uma relação direta entre a tensão do carboneto (carboneto de silício) e as emissão das luzes. Round faleceu em 1966, por uma breve doença. (Schubert, E. Fred, 2003)

Oleg Vladimirovich Lósev, nascido na Rússia, o cientista mesmo sem formação superior e sem ocupação em posição de pesquisador, estudou por conta própria e finalizou alguns cursos universitários, reconhecido com doutor em física e engenharia na instituição de ciências Loffe. (Tom Simonite 11-04-2007).

Lósev, conseguiu realizar pesquisas aprofundadas e originais sobre semicondutores, fez a primeira teoria correta de seu funcionamento além de na prática comprovar as aplicações como eletroluminescência com embasamento na tese antes descrita por Round. Ele explorou a resistência negativa nos conectores por contato pontual dos semicondutores e as usou na aplicação em amplificação, criando os primeiros amplificadores de estado solido, osciladores, receptores de rádio e geradores de semicondutores de estado solido, cristalina. (Gernsback, Hugo setembro de 1924)

Entre 1924 e 1941, publicou inúmeros artigos descrevendo as funções de um dispositivo de criação e desenvolvimento próprio, sobre um mecanismo que emitia luz por eletroluminescência, quando os elétrons geram luz em níveis mais baixos de energia, através dos mesmos, acabara recebendo 16 homologações por suas descobertas, suas observações sobre os LEDs. Entretanto, seus feitos na época não receberam o devido valor e permaneceram desconhecidos por meio século até serem reconhecidos somente no final do século XX e início do século XXI, para se ter uma noção, somente em abril de 2007, em um artigo publicado da Nature Photonics, Zheludev anunciou a Lósev como a inventora do LED e patenteamento do rele de luz “Light relay” e, assim, previu sua utilização em telecomunicações.

Lósev faleceu em 1942, aos 38 anos de idade, de fome durante a Segunda Guerra Mundial, juntamente com vários outros civis, e meio ao cerco de leningrado na Rússia antes mesmo que sua invenção fosse desenvolvida. (Schubert, E. Fred 2003).

O engenheiro, cientista americano, e atualmente professor de engenharia elétrica e informática na Universidade de Illinois em Urbana-Champaign, Nick Holonyak, nasceu em 1928 em Zeigler, EUA. Responsável pelo patenteamento de 41 criações, ele é considerado o pai do LED (diodo

emissor de luz), ele desenvolveu o primeiro LED visível (vermelho) em meados de 1962. (Illinois Alumni Magazine. Maio – junho de 2007)

Em 1960, durante seus trabalhos na General Electric Company, Holonyak, O colega da GE Robert N. Hall havia desenvolvido um laser usando um diodo semicondutor (um dispositivo semicondutor com eletrodos positivos e negativos que podem servir como retificador - ou seja, um conversor de corrente alternada em corrente direta). O laser de Hall emitia apenas radiação infravermelha, que está além do alcance da visão humana. Holonyak decidiu criar um dispositivo de diodo que emitisse luz visível. (Martin L. White)

Usando o material semicondutor fosforeto de arseneto de gálio (GaAsP) e a técnica de emissão estimulada, em 1962, a Holonyak conseguiu operar o primeiro dispositivo prático visível de LED. O dispositivo de Holonyak emitiu luz vermelha. Depois que os LED's que produzem luz verde e azul foram desenvolvidos (nas décadas de 1970 e 1990, respectivamente), os LEDs que emitem luz branca se tornaram possíveis, revolucionando a indústria da iluminação. (Wolinsky, Howard 2 de maio de 2005).

Nascido em maio de 1954, Shuji Nakamura, o engenheiro japonês, foi premiado no Nobel de física em 2014 pela invenção e desenvolvimento dos diodos emissores de luz azuis, que permitem fontes de luz branca, gerando mais economia de energia devido a eficiência na tonalidade brilhante. Os desenvolvimentos dos estudos dos LEDs tornaram cada vez mais possíveis as fontes de luz mais eficazes. A criação da luz branca para a iluminação nasce da combinação entre as cores vermelha, azul e verde. Nakamura, usou a composição de nitreto de gálio semicondutor de difícil manuseio para criar LEDs azuis eficientes. (Fundação Nobel,2014)

2.3.3.2 Definição

O LED (Light Emitting Diode) é um componente eletrônico semicondutor muito conhecido atualmente por emitir luz de forma eficiente por consumo com um baixo número de energia elétrica. Em comparação com as lâmpadas incandescente. As lâmpadas LEDs precisam de uma quantidade inferior de

potência para gerar a mesma intensidade luminosa das lâmpadas incandescentes, além de não utilizar reator. Contudo, ainda há outras vantagens que destacam cada vez mais esse tipo de lâmpada, por exemplo:

- Qualidade na tonalidade da luz, sendo confortável e eficiente;
- Gera pouco calor;
- Não emite raios ultravioleta e infravermelho (Feixe de luz é frio, facilidade e segurança do usuário);
- Facilidade na troca de lâmpada incandescente por LED, pois as bases de ambas as lâmpadas são iguais,
- Economia no consumo de até 80% em comparativo com as lâmpadas incandescentes;
- Maior durabilidade de utilização (em média 25mil horas);
- Ecológicas - Fácil descarte e reciclagem por não conter chumbo ou mercúrio;

Na figura 9 podemos observar um comparativo entre os tipos de lâmpadas

Figura 9 - Tabela comparativa

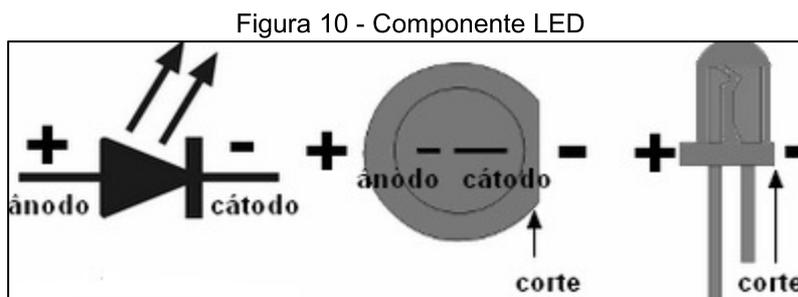
|  |  |  |
|---|---|--|
| INCANDESCENTE | FLUORESCENTE | LED |
| ENERGIA USADA | | |
| 20W | 6W | 3W |
| 45W | 13W | 7W |
| 70W | 15W | 10W |
| 80W | 20W | 12W |

Valores aproximados para comparação de equivalência entre lâmpadas

Fonte: Mundo da elétrica

2.3.3.3 Simbologia

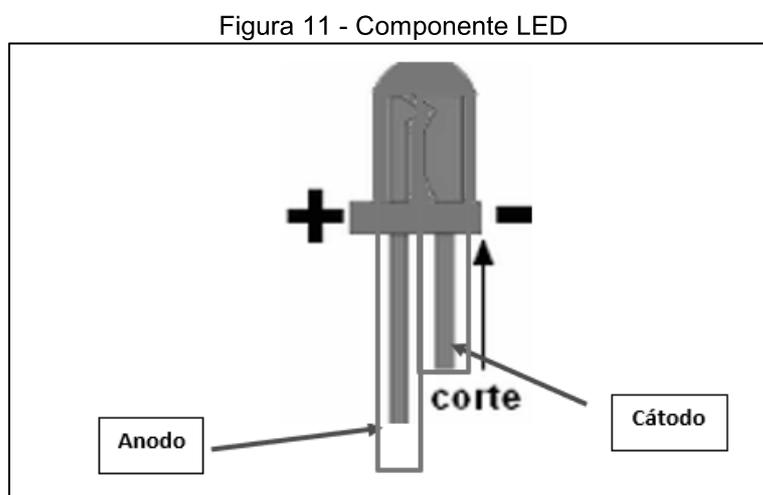
Para a representação do componente LED em circuitos elétricos e diagramas esquemáticos, utiliza-se da simbologia da figura 10 no qual a simbologia é mostrada em comparação com a forma real do componente, sendo assim dividido na vista superior e frontal.



Fonte: Próprio (2019)

2.3.3.4 Identificação e Ligação correta do LED

Para que o LED seja ligado de maneira correta, o circuito de ligação deve ter o ânodo com polaridade positiva (+) e o cátodo com polaridade negativa (-). O cátodo facilmente identificado por possuir uma ponta mais curta e deve possuir um corte no lado da cápsula do LED. O anodo é o eletrodo maior quando observado fisicamente, que também possui um chanfro maior no corpo do componente.



Fonte: Próprio (2019)

Nota: O LED pode ser danificado quando ligado de forma inadequada.

2.3.3.5 Funcionamento

As lâmpadas LEDs, em comparativo as demais lâmpadas comuns atuais, não possui filamento, diminuindo a quantidade de calor produzida, levando assim a uma considerável redução de energia.

O LED é um tipo especial de diodo, possuindo uma junção PN semicondutor composto internamente por uma fita responsável pela geração de luz quando submetido a passagem de corrente elétrica. Ainda assim, existe também um circuito integrado que ajusta a tensão para 12 Volts, necessário para o funcionamento da lâmpada.

2.3.4 Luminotécnica

Qualquer estudo que seja realizado para implementar e utilizar a luz artificial em um ambiente seja ele aberto ou fechado, se caracteriza como estudo de luminotécnica. O estudo surgiu muito antes até mesmo da eletricidade, quando os ambientes eram iluminados por lamparinas e velas. Muito presente no dia a dia, a luz possui os mais variáveis aspectos sendo eles intensam, difusa, opaca entre outras. (NEW LIGHT, 2015).

Através de uma análise das lâmpadas, alguns recursos são considerados para melhorar a iluminação do ambiente, levando em consideração aspectos importantes como a eficiência da luz. No entanto os usos irracionais desses sistemas podem levar a danos nos olhos e desorientação, e consumo elevado de energia elétrica. Por outras palavras é extremamente importante conhecer os modelos de lâmpadas, luzes para criar um ambiente com iluminação duradoura, econômica e agradável. Além disso, cada tipo de lâmpada tem uma determinada cor de temperatura, mais recomendada para certos tipos de ambiente. Portanto, o estudo da iluminação técnica certifica a melhor iluminação para a solicitação assim não causando situações desagradáveis aos olhos humanos. (META CONSULTORIA, 2019)

No Brasil os ambientes devem seguir as normas da ABNT NBR ISO/IEC8995-:2013, sendo ela a que define todos os pontos necessários para

ter uma iluminação adequada e compatível as atividades exercidas no local. (NEW LIGHT, 2015).

2.3.5 Conceito e grandezas fundamentais

2.3.5.1 Fluxo Luminoso

É a radiação total de luz emitida em todas as direções por uma fonte luminosa, capaz de gerar sensibilidade visual ao humano, através de estímulos a retina ocular. Estímulos esses gerados entre os limites de 380 a 780 nm. (FERNANDO CORRÊA, 2015).

Uma fonte luminosa produz luz, em certa quantidade que chamamos de fluxo luminoso, ao olho nu não conseguimos saber o quanto de luz está sendo emitida, mas podemos saber medindo através do lúmen (lm) que é a unidade de medida do fluxo luminoso. (RENATO LIMA, 2018)

Tabela 1 - FLUXO LUMINOSO – RENATO LIMA, 2018

| TIPO DE LÂMPADA | FLUXO LUMINOSO |
|-------------------------------|----------------|
| Vela de Cera | 10 lm |
| Incandescente translúcida 60W | 864 lm |
| Alógena Bipino 50 W | 930 lm |
| Fluorescente compacta 15 W | 900 lm |
| Fluorescente tubular 32 W | 2.700 lm |
| Fluorescente tubular 28 W | 2.900 lm |
| Led de potência 1W | 35 lm |
| Incandescente 40W | 415 lm |
| Fluorescente 65W | 4.800 lm |
| Alógena de alta potência 20kW | 580 000 lm |
| Incandescente de 100W | 1.600 lm |

Fonte: Próprio (2019)

2.3.5.2 Intensidade Luminosa

É a percepção da potência emitida por uma determinada fonte luminosa em uma única direção, essa intensidade luminosa é medida através do Candela (Cd). (ROMULO FONSECA)

—

Onde:

I = Intensidade Luminosa

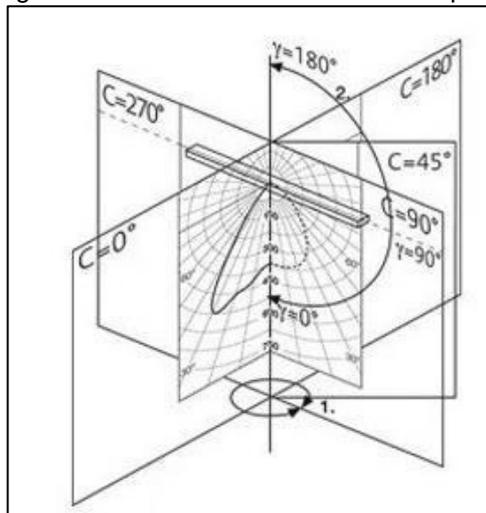
Ω = Direção por unidade em um ângulo sólido

Φ = Fluxo luminoso em lumens.

2.3.5.3 Curva de distribuição de intensidade luminosa

A curva faz análise da distribuição da iluminação das luminárias. Por ela se pode avaliar a classificação das luminárias e o grau de ofuscamento, e também especifica as peças certas do ambiente. A curva se dá por meio de um gráfico que marca a distribuição espacial da luz no plano cartesiano, e suas variáveis são a intensidade luminosa e a distância.

Figura 12 - Curva fotométrica – Curva polar



Fonte: Google imagens (2019)

A curva fotométrica é colocada no gráfico a fim de obter a informação da iluminância no plano que deve ser iluminado por um certo tipo de luminária, bem como a uniformidade e qualquer outro parâmetro luminoso que seja necessário.

Embora os dois planos sobre os quais as curvas sejam determinadas, neste caso, sejam transversais, longitudinais ou diagonais, os resultados são projetados em um mesmo plano, de forma a facilitar a leitura dos valores. (VIVA DECORA, 2018)

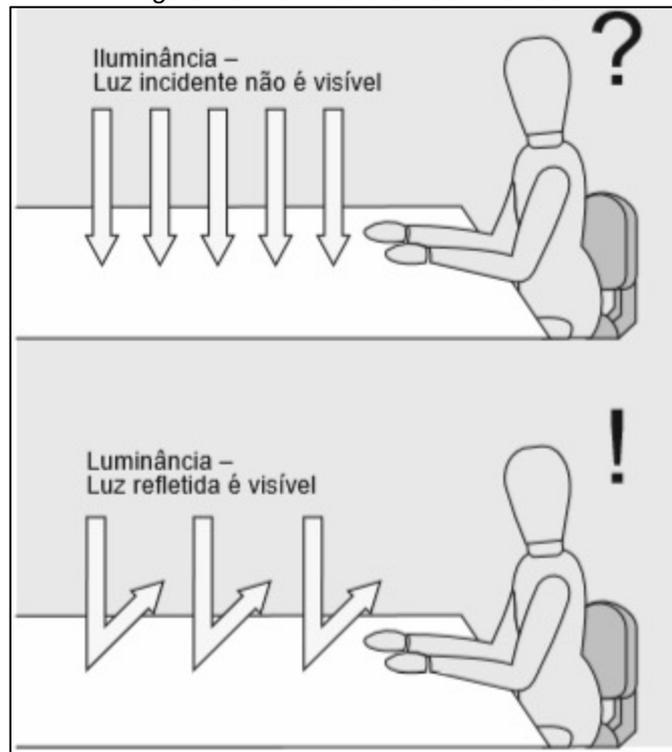
2.3.5.4 Luminância

Quantidade de emissão de luz que atravessa ou reflete de um ponto em uma determinada superfície em um certo ângulo, ela também determina quanto de luminosidade é percebida pelo olho humano. (KONICA MINOLTA, 2016)

2.3.5.5 Iluminância

Refere-se a quantidade de luz que cai e ilumina uma certa área ou superfície. Iluminância é um modo próprio de medir a luz, enquanto o brilho é representado pelas percepções do ser humano a luz. A iluminância não pode ser vista, mas permite ser medida pois quando acendemos uma lâmpada o que enxergamos na realidade não é iluminância e sim a diferença na reflexão de luz. O aparelho capaz de medir iluminância é o luxímetro, ele absorve e calcula a luminosidade de um determinado ambiente. Com ele conseguimos definir a luz ideal para cada tipo de local. (G-LIGHT, 2019)

Figura 13 - Iluminância x Luminância



Fonte: Google imagens (2019)

2.3.6 Cálculo luminotécnico

Para realizar um cálculo luminotécnico, é preciso ter 4 critérios fundamentais: quantidade de luz, equilíbrio da iluminação, ofuscamento e a reprodução de cor.

Ao começar um projeto de iluminação deve-se iniciar com algumas opções preliminares, como qual tipo de iluminação usar (LED, fluorescente, etc), qual luminária será utilizada (semidireta ou direta), pensando também que além destes fatores, essas opções variam de acordo com o ambiente e as atividades que serão realizadas nesse setor.

O método mais comum para definir um sistema de iluminação em áreas fabris é o método de lumens ou método do fluxo luminoso, que tem como objetivo determinar a quantidade de luz necessário para determinados ambientes, com base no tipo de atividade que é desenvolvida no local, modelo da luminária e cor do teto e das paredes.

O modo mais efetivo deste método, é baseado na fórmula abaixo:

$$\Phi = \frac{E * S}{\mu * d}$$

Onde:

Φ : fluxo luminoso em lumens;

E: iluminância ou nível de iluminação em lux;

S: área do recinto em m²;

μ : coeficiente de utilização;

d: fator ou coeficiente de depreciação

Com base no fluxo luminoso, define-se o número de lâmpada necessária da seguinte forma:

$$n = \frac{\Phi}{\phi}$$

Onde:

n: número de lâmpadas;

Φ : fluxo luminoso em lumens;

ϕ : fluxo luminoso de cada lâmpada.

2.3.7 Coeficiente de utilização

O fator de iluminação indica o comportamento da luminária no local considerado para cálculo, sendo elas apresentada pelo fabricante da luminária. Para verificar o fator de utilização, basta cruzar o valor do índice do local (K) calculado anteriormente (dado na horizontal), com os dados de refletância das superfícies do teto, parede e piso (dado na vertical), conforme indicado na tabela 2.

Tabela 2 - Fatores de manutenção recomendados

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

Fonte: Próprio (2019)

2.3.7.1 Fator de manutenção

A iluminância reduz gradativamente com a utilização do sistema de iluminação devido às depreciações do acúmulo de poeira nas lâmpadas e luminárias, também com a depreciação dos materiais usados nas luminárias, a diminuição do fluxo luminoso das lâmpadas e a depreciação das refletâncias das paredes.

O dimensionamento dos sistemas de iluminação deve levar em consideração um fator de manutenção (FM) ou fator de perdas luminosas (FPL) em função do tipo de ambiente e atividade desenvolvida, do tipo de luminária e lâmpada utilizada e da frequência de manutenção dos sistemas.

A tabela 3 define valores de fatores de manutenção conforme período de manutenção e condição do ambiente. (FABIO FLANDOLI, 2018)

Tabela 3 - Fatores de manutenção recomendados

| Ambiente | 2500 h | 5000 h | 7500 h |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| <i>Limpo</i> | <i>0,95</i> | <i>0,91</i> | <i>0,88</i> |
| <i>Normal</i> | <i>0,91</i> | <i>0,85</i> | <i>0,80</i> |
| <i>Sujo</i> | <i>0,80</i> | <i>0,66</i> | <i>0,57</i> |

Fonte: Próprio (2019)

3 METODOLOGIA

O objetivo central é a realização da troca das lâmpadas fluorescente e de vapor metálico por modelos mais eficientes, como as lâmpadas de LED. Esta simples escolha impacta diretamente na economia na conta de energia no final do mês. Devido a isso, foi realizado um estudo, comparando as características dos modelos.

No setor fabril, foram abordados a comparação entre a vida útil das lâmpadas e principalmente o retorno financeiro ao longo da utilização no cotidiano.

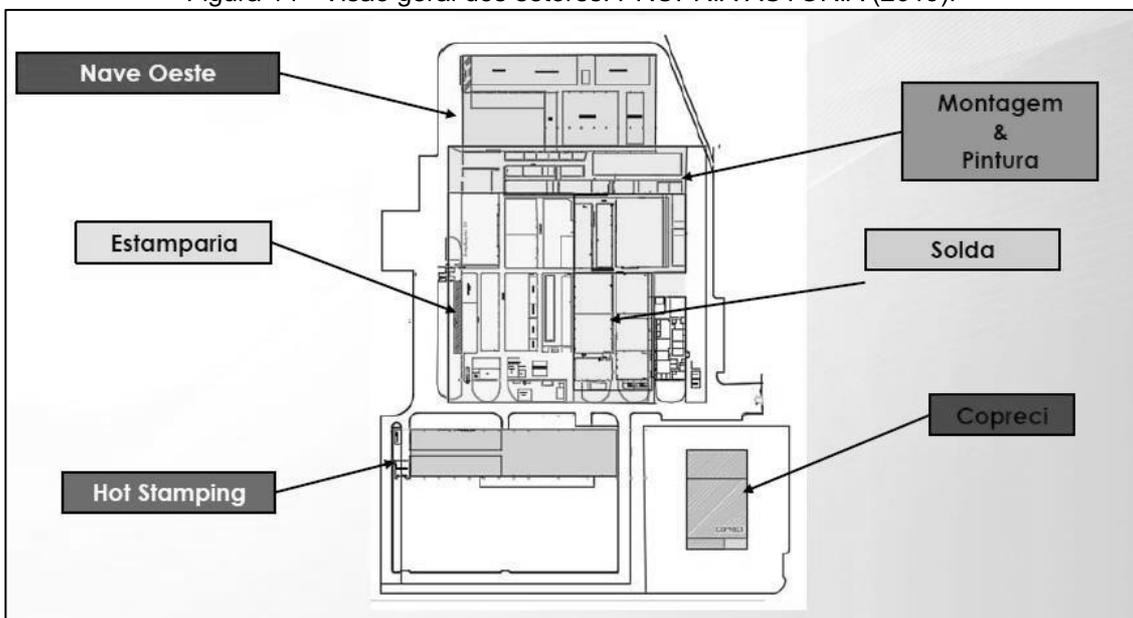
Resumidamente, consideramos os 2 tipos de lâmpadas encontradas atualmente (fluorescente e vapor metálico), para compararmos na teoria e na prática com as lâmpadas de LED.

4 DESENVOLVIMENTO

O trabalho desenvolvido, refere-se à implementação de lâmpadas LEDs no setor fabril com instalações luminosas obsoletas, no caso, lâmpadas incandescentes e lâmpadas de vapor metálico. Foi necessário realizar essa modificação devido à baixa qualidade de luz sob aos custos elevados no consumo de energia elétrica. Outro resultado alcançado nesse projeto, foi a melhoria em requisitos de qualidade do produto final, pois com a substituição das lâmpadas, pode-se notar que o processo operacional trabalha com mais agilidade e segurança tanto do produto, quanto no manuseio operacional, contudo, visando sempre o desenvolvimento de soluções específicas de acordo com às necessidades do cliente.

4.1 Mapeamento - Completo

Figura 14 - Visão geral dos setores. PRÓPRIA AUTORIA (2019).



Fonte: Próprio (2019)

A figura 14 mostra uma visão ampla dos cenários levados em consideração no estudo, de forma geral. Mostrando todo o perímetro fabril, referindo-se ao alto índice no consumo de energia elétrica em diversos locais.

Analisando primeiramente de maneira geral, os dados foram medidos e coletados em campo de modo que sejam feitas comparações entre os dados obtidos, posteriormente analisaremos individualmente cada setor de trabalho. É importante ressaltar que, ambas situações são embasadas nas normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

4.2 Cenário de Iluminação Atual – Mapeamento Completo

– **Luminárias Internas**

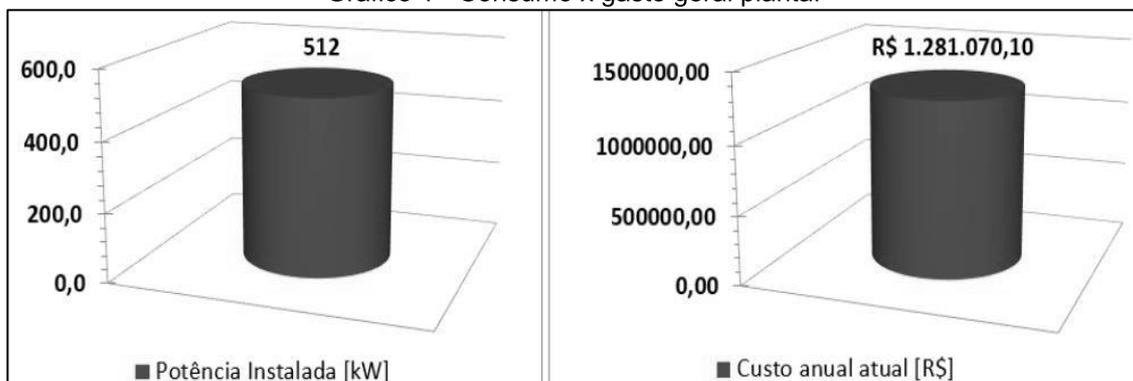
- 710 Luminárias com lâmpadas de 440 W (perda de 10 % no reator)
- 513 Luminárias com 4 lâmpadas T5 de 54 W (perda de 10% no reator)
- 140 Luminárias com 2 lâmpadas T8 de 40 W
- 101 Luminárias com 2 lâmpadas HO Led de 40 W
- Utilização: 24 h/dia, 6 dias/semana, totalizando 7.488 h/ano
- Luminárias Externas
- 42 Luminárias de poste com lâmpadas de 440 W (perda de 10 % no reator)
- 64 Refletores externos com lâmpadas de 440 W (perda de 10 % no reator)
- Utilização: 12 h/dia, 7 dias/semana, totalizando 4.368 h/ano
- Total Luminárias Internas
- 1.464 Luminárias
- Total Luminárias Externas
- 106 Luminárias
- Custo kWh: Aproximadamente R\$ 0,35

– **Luminárias Externas**

- 42 Luminárias de poste com lâmpadas de 440 W (perda de 10 % no reator)

- 64 Refletores externos com lâmpadas de 440 W (perda de 10 % no reator)
- Utilização: 12 h/dia, 7 dias/semana, totalizando 4.368 h/ano

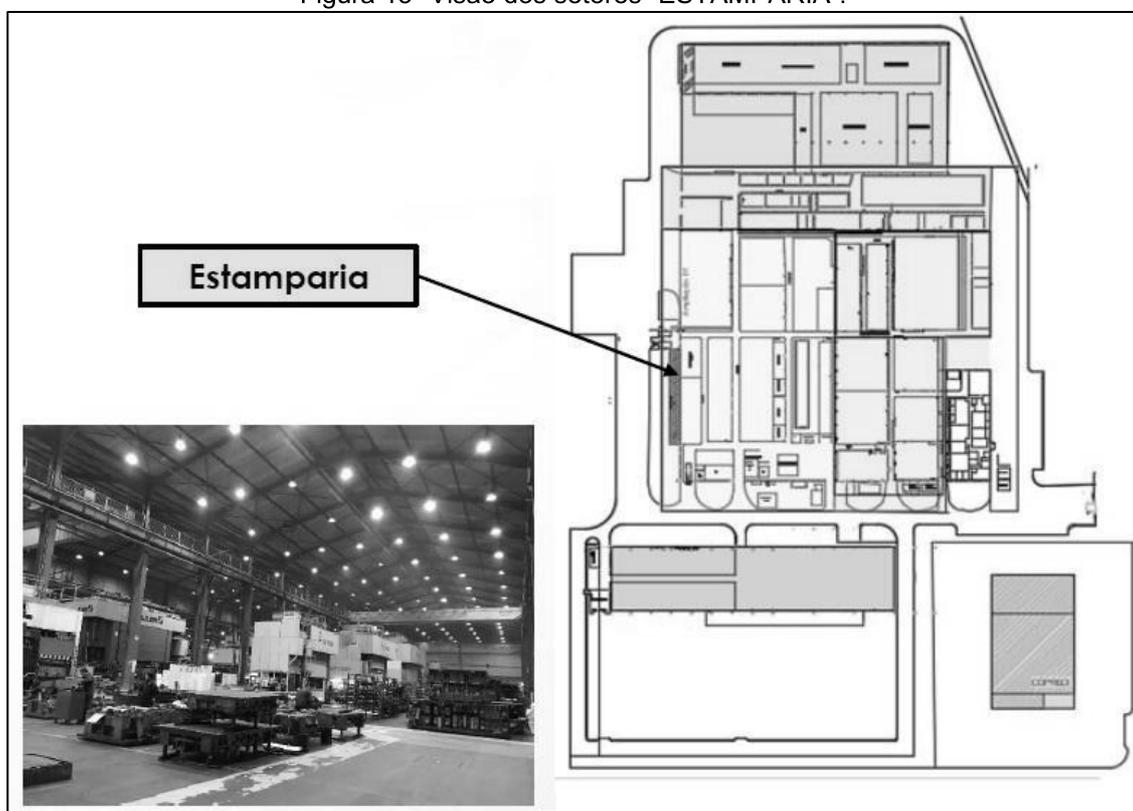
Gráfico 1 - Consumo x gasto geral planta.



Fonte: Próprio (2019)

4.3 Mapeamento - Estamparia

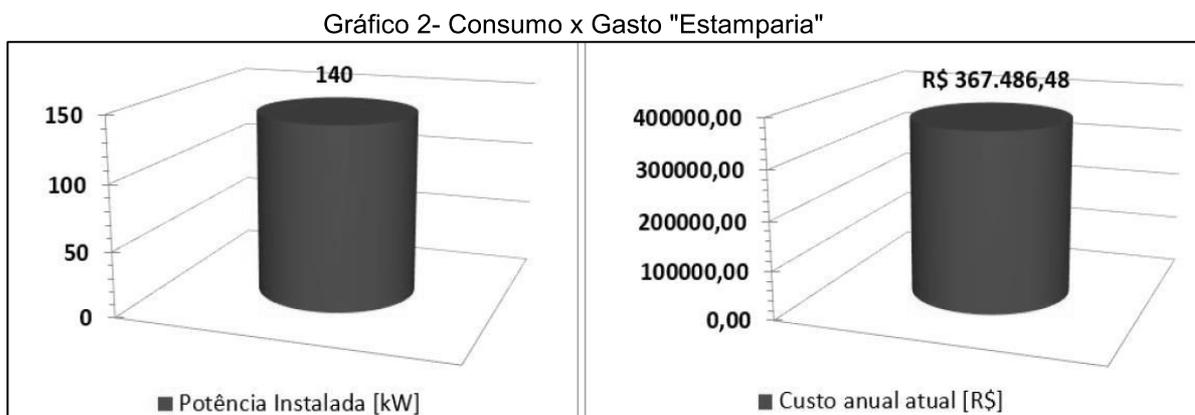
Figura 15 -Visão dos setores "ESTAMPARIA".



Fonte: Próprio (2019)

- **Cenário de Iluminação Atual ± Estamparia**
 - 296 Luminárias com lâmpadas de 440 W (perda de 10 % no reator)
 - 42 Luminárias com 4 lâmpadas T5 de 54 W (perda de 10% no reator)
 - Utilização: 24 h/dia, 6 dias/semana, totalizando 7.488 h/ano
 - Custo kWh: R\$ 0,35

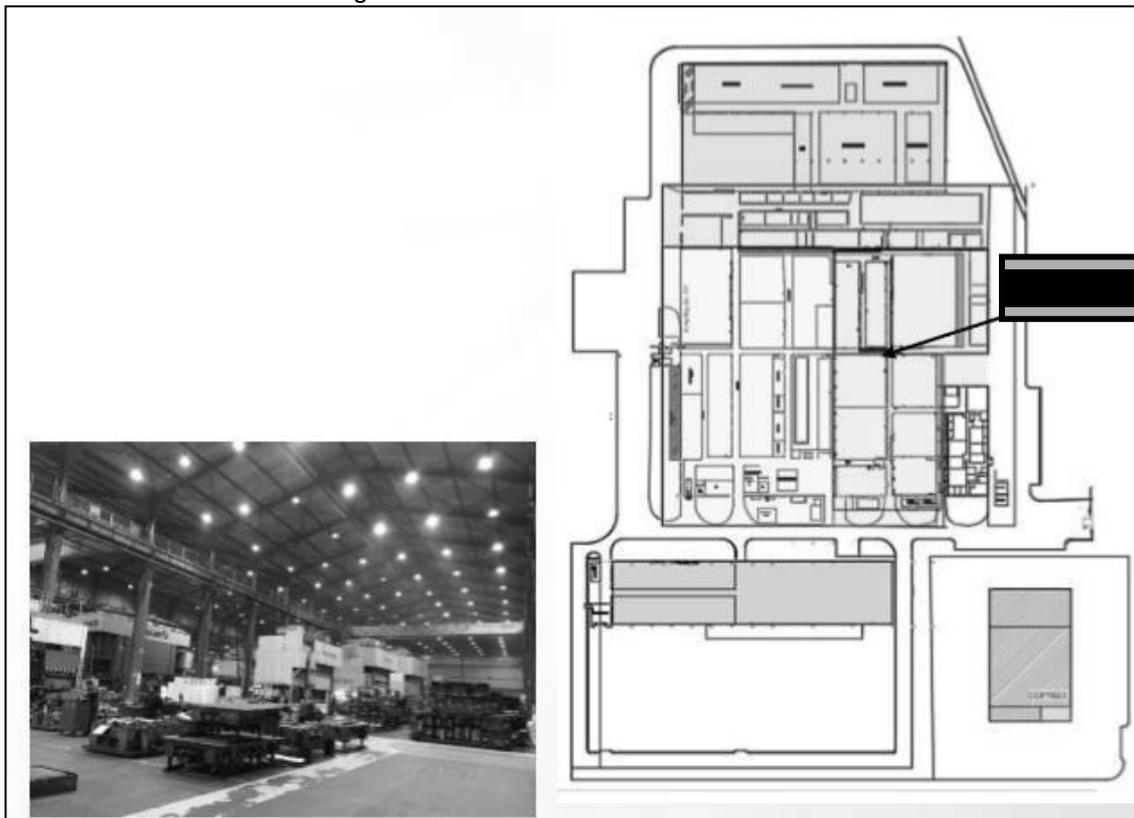
Total de luminárias: 338 Luminárias



Fonte: própria autoria, 2019

4.4 Mapeamento - Solda

Figura 16 - Visão dos setores "SOLDA".



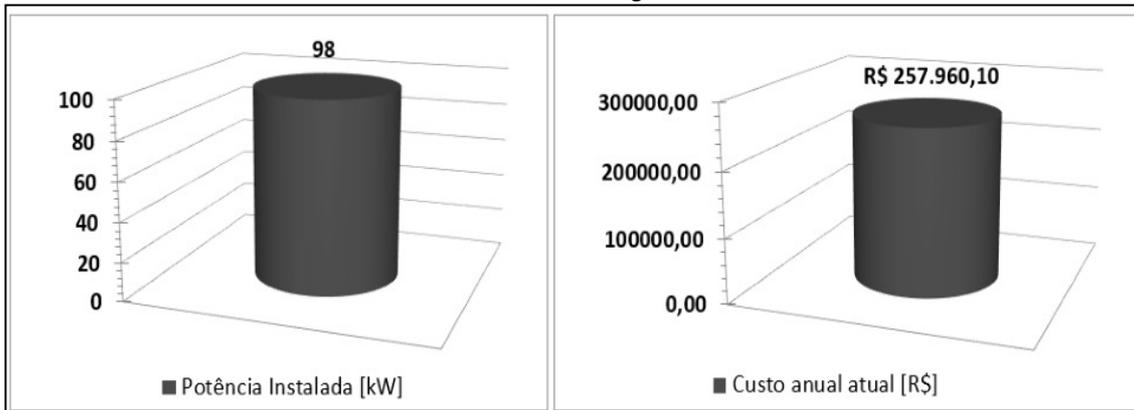
Fonte: Próprio (2019).

– Cenário de Iluminação Atual ± Solda

- 194 Luminárias com lâmpadas de 440 W (perda de 10 % no reator)
- 55 Luminárias com 4 lâmpadas T5 de 54 W (perda de 10% no reator)
- Utilização: 24 h/dia, 6 dias/semana, totalizando 7.488 h/ano
- Custo kWh: R\$ 0,35

Total de luminárias: 249 Luminárias

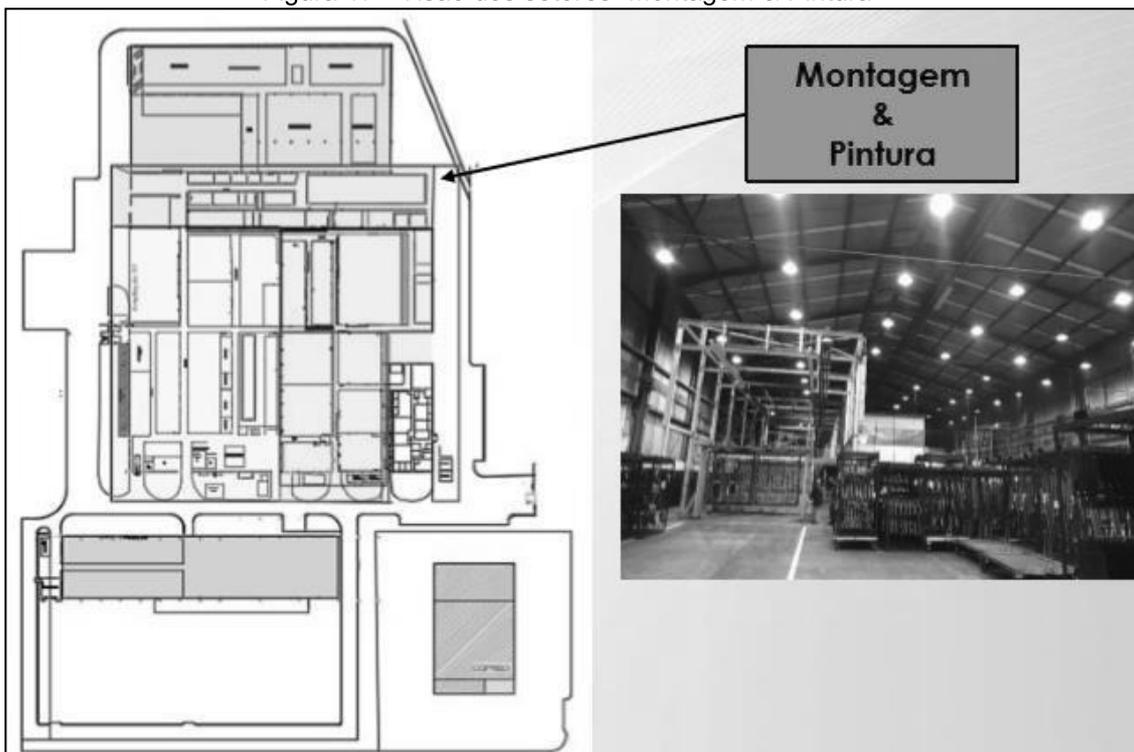
Gráfico 3 - Consumo x gasto “Solda”.



Fonte: Próprio (2019)

4.5 Mapeamento – Montagem & Pintura

Figura 17 - Visão dos setores “Montagem & Pintura”



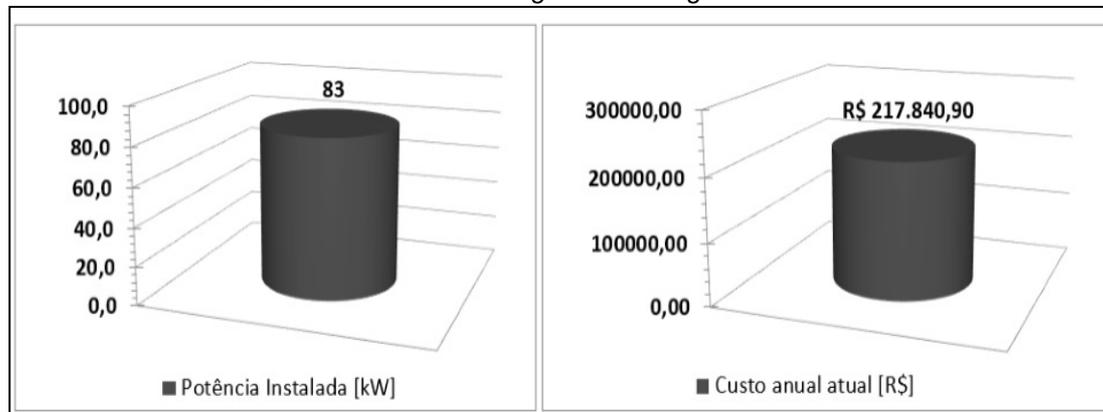
Fonte: Próprio (2019).

- **Cenário de Iluminação Atual ± Montagem & Pintura**
- 180 Luminárias com lâmpadas de 440 W (perda de 10 % no reator)
- 4 Refletores com lâmpadas de 440 W (perda de 10 % no reator)
- Utilização: 24 h/dia, 6 dias/semana, totalizando 7.488 h/ano

- Custo kWh: R\$ 0,35

Total de luminárias: 184 Luminárias

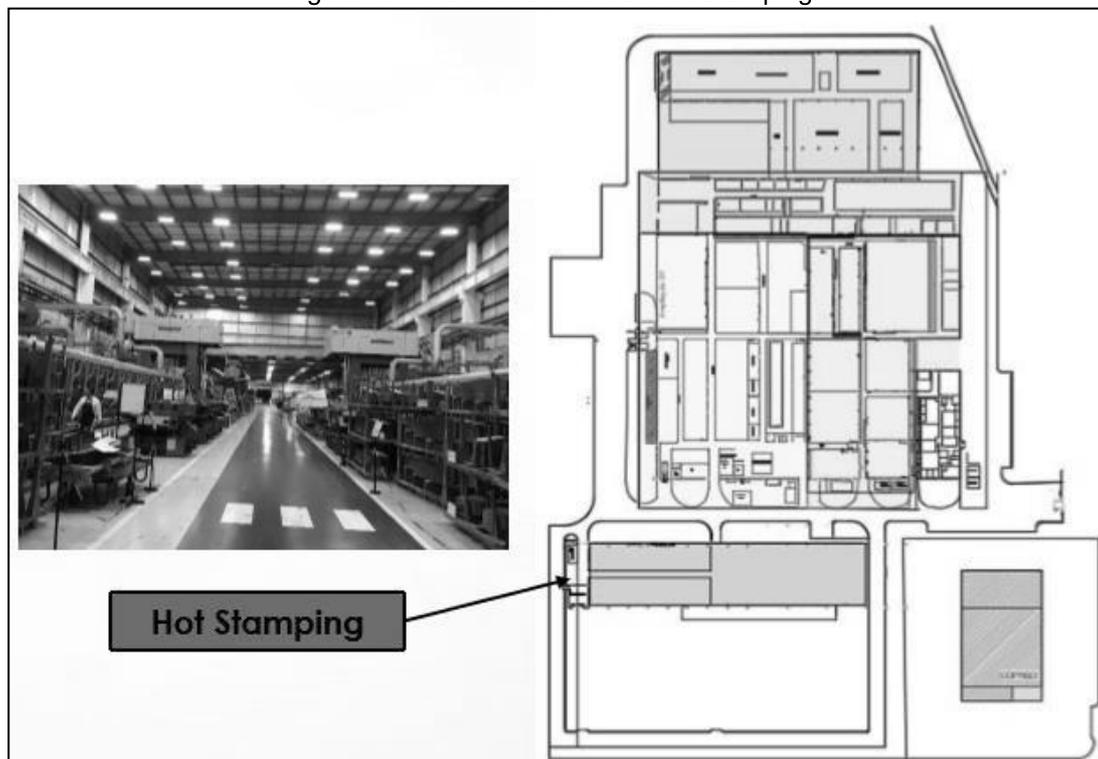
Gráfico 4 - Consumo x gasto “Montagem e Pintura”.



Fonte: Próprio (2019).

4.6 Mapeamento – Hot Stamping

Figura 18 - Visão dos setores “Hot Stamping”.



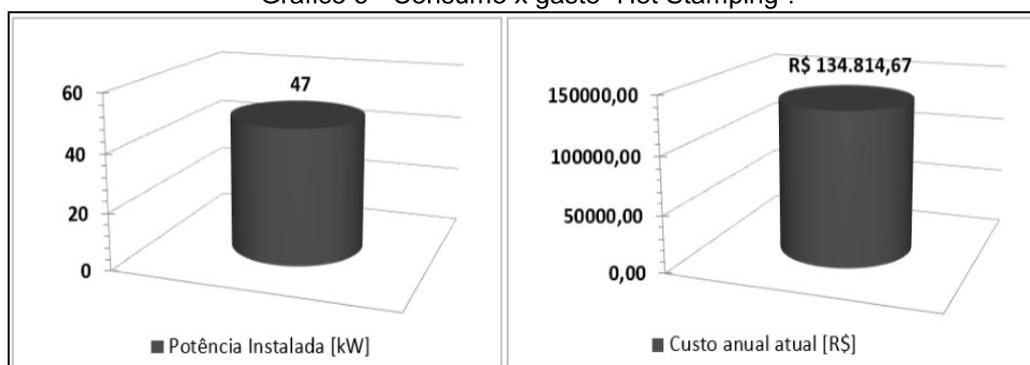
Fonte: PRÓPRIA AUTORIA (2019).

– **Cenário de Iluminação Atual ± Hot Stamping**

- 4 Luminárias com lâmpadas de 440 W (perda de 10 % no reator)
- 192 Luminárias com 4 lâmpadas T5 de 54 W (perda de 10% no reator)
- 49 Luminárias com 2 lâmpadas T8 de 40 W
- Utilização: 24 h/dia, 6 dias/semana, totalizando 7.488 h/ano
- Custo kWh: R\$ 0,38

Total de luminárias: 245 Luminárias

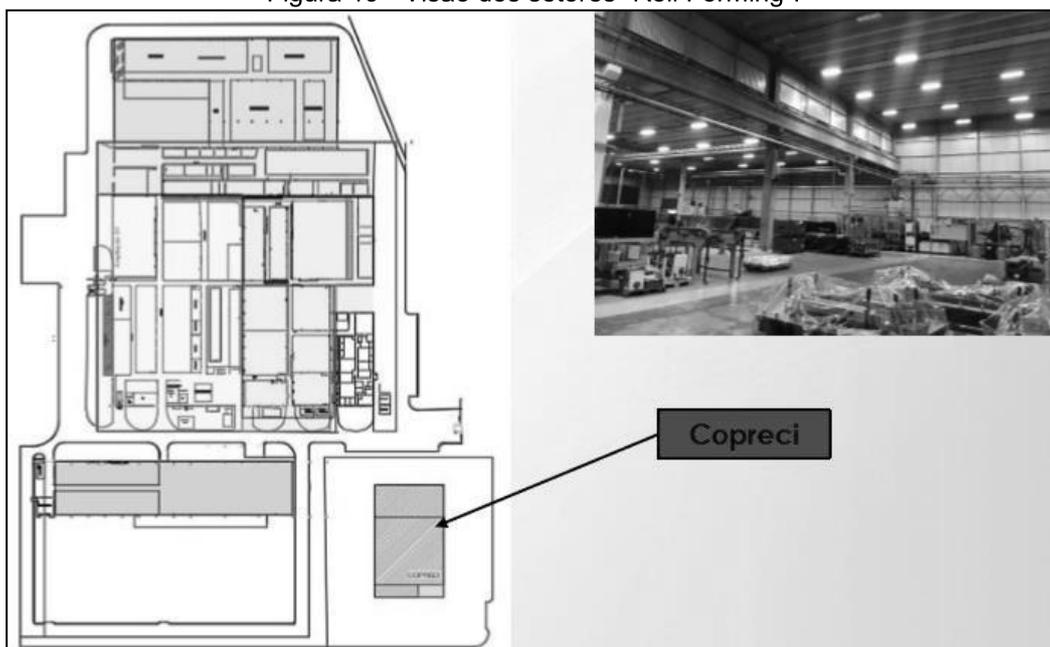
Gráfico 5 - Consumo x gasto "Hot Stamping".



Fonte: Próprio (2019)

4.7 Mapeamento – Roll Forming

Figura 19 - Visão dos setores "Roll Forming".



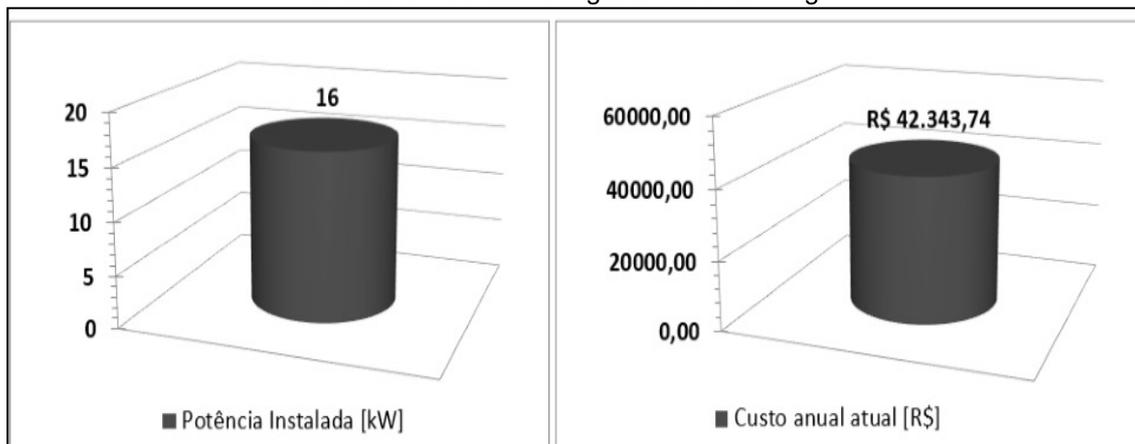
Fonte: Próprio (2019).

– **Cenário de Iluminação Atual ± Roll Forming**

- 68 Luminárias com 4 lâmpadas T5 de 54 W (perda de 10% no reator)
- Utilização: 24 h/dia, 6 dias/semana, totalizando 7.488 h/ano
- Custo kWh: R\$ 0,35

Total de luminárias: 68 Luminárias

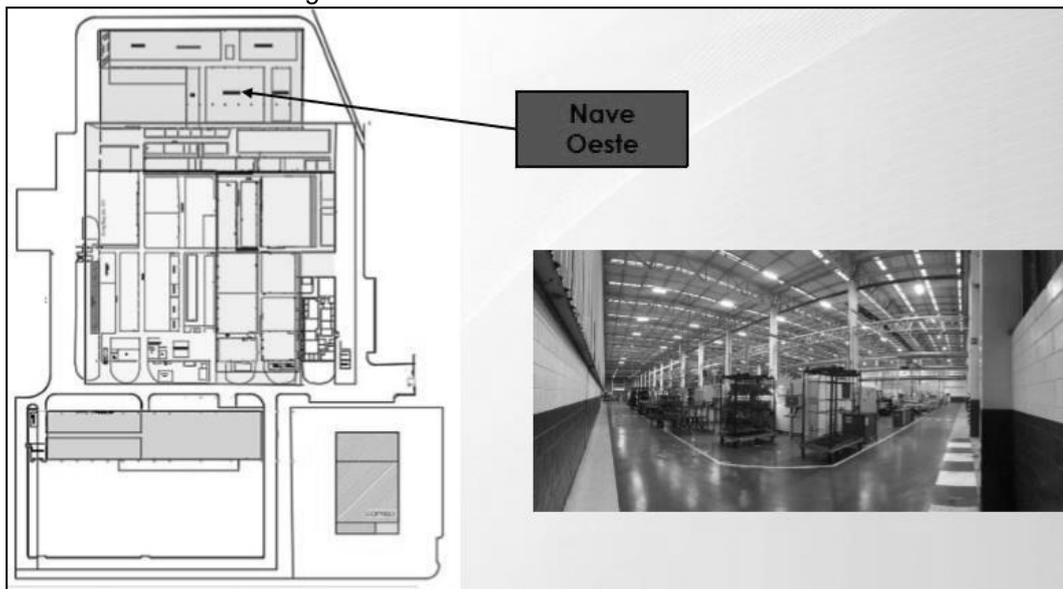
Gráfico 6 - Consumo x gasto "Roll Forming".



Fonte: Próprio (2019)

4.8 Mapeamento – Nave Oeste

Figura 20 - Visão dos setores "Nave Oeste"



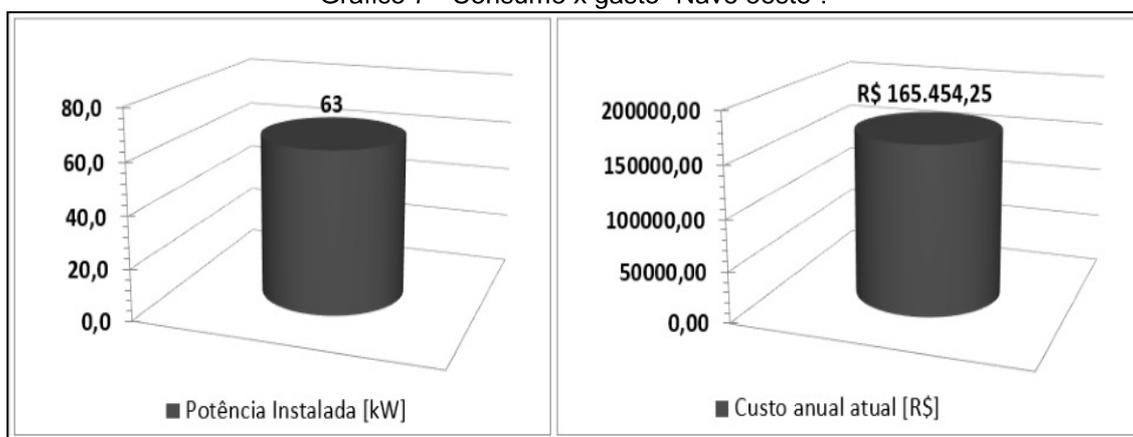
Fonte: Próprio (2019).

– **Cenário de Iluminação Atual ± Nave Oeste**

- 32 Luminárias com lâmpadas de 440 W (Perda de 10 % no reator)
- 162 Luminárias com 4 lâmpadas T5 de 54 W (Perda de 10% no reator)
- 48 Luminárias com 2 lâmpadas HO de led de 40W
- Utilização: 24 h/dia, 6 dias/semana, totalizando 7.488 h/ano
- Custo kWh: R\$ 0,35

Total de luminárias: 242 Luminárias

Gráfico 7 - Consumo x gasto "Nave oeste".



Fonte: Próprio (2019)

4.9 Especificações da Norma ABNT NBR ISSO/IEC 8995-1:2013

Para garantir a confiabilidade nos dados coletados durante a execução do projeto, comparamos os resultados obtidos na prática, com as Especificações da Norma ABNT visando a aplicação da melhoria de maneira correta, atendendo aos requisitos mínimos descritos na norma para cada tipo de processo e setor.

4.9.1 Setor: Estamparia e Ferramentaria

Figura 21 - Norma ABNT "Estamparia e Ferramentaria"

| Especificações da Norma ABNT NBR ISO/IEC 8995-1:2013 | | | | |
|---|---|--|----|--|
|  | ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS | Iluminação de ambientes de trabalho | | |
| | | ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013 | | |
| 14. Trabalho e processamento em metal | | | | |
| Forjamento de molde aberto | 200 | 25 | 60 | |
| Forjamento por derramamento, soldagem, moldagem a frio | 300 | 25 | 60 | |
| Usinagem bruta e media Tolerâncias > 0,1 mm | 300 | 22 | 60 | |
| Usinagem de precisão: afiação Tolerâncias ≤ 0,1 mm | 500 | 19 | 60 | |
| Gravação: inspeção | 750 | 19 | 60 | |
| Desenhar formas fio & tubo | 300 | 25 | 60 | |
| Usinagem de placa ≥ 5 mm | 200 | 25 | 60 | |
| Trabalho em folha de metal < 5 mm | 300 | 22 | 60 | |
| Ferramentaria; fabricação de equipamento de corte | 750 | 19 | 60 | |

Fonte: ABNT (2019)

4.9.2 Setor: Solda

Figura 22 - Norma ABNT "Solda"

| Especificações da Norma ABNT NBR ISO/IEC 8995-1:2013 | | | | |
|---|---|--|----|--|
|  | ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS | Iluminação de ambientes de trabalho | | |
| | | ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013 | | |
| 14. Trabalho e processamento em metal | | | | |
| Forjamento de molde aberto | 200 | 25 | 60 | |
| Forjamento por derramamento, soldagem, moldagem a frio | 300 | 25 | 60 | |
| Usinagem bruta e media Tolerâncias > 0,1 mm | 300 | 22 | 60 | |
| Usinagem de precisão: afiação Tolerâncias ≤ 0,1 mm | 500 | 19 | 60 | |
| Gravação: inspeção | 750 | 19 | 60 | |
| Desenhar formas fio & tubo | 300 | 25 | 60 | |
| Usinagem de placa ≥ 5 mm | 200 | 25 | 60 | |
| Trabalho em folha de metal < 5 mm | 300 | 22 | 60 | |
| Ferramentaria; fabricação de equipamento de corte | 750 | 19 | 60 | |

Fonte: ABNT (2019)

4.9.3 Setor: Montagem

Figura 23 - Norma ABNT "Montagem"

| Especificações da Norma ABNT NBR ISO/IEC 8995-1:2013 | | | | |
|---|--------------------|--|-------|--|
|  | | <p style="text-align: center;">Iluminação de ambientes de trabalho ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013</p> | | |
| Tipo de ambiente, tarefa ou atividade | \bar{E}_m lux | UGR_L | R_a | Observações |
| Montagem: | | | | |
| - bruta | 200 | 25 | 80 | Para montagem alta: ver também a seção 4.6.2 |
| - média | 300 | 25 | 80 | Para montagem alta: ver também a seção 4.6.2 |
| - fina | 500 | 22 | 80 | Para montagem alta: ver também a seção 4.6.2 |

Fonte: ABNT (2019)

4.9.4 Setor: Hot Stamping

Figura 24 - Norma ABNT "Hotstamping"

| Especificações da Norma ABNT NBR ISO/IEC 8995-1:2013 | | | | |
|---|--------------------|--|-------|-------------|
|  | | <p style="text-align: center;">Iluminação de ambientes de trabalho ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013</p> | | |
| Tipo de ambiente, tarefa ou atividade | \bar{E}_m lux | UGR_L | R_a | Observações |
| Forjamento de molde aberto | 200 | 25 | 60 | |
| Forjamento por derramamento, soldagem, moldagem a frio | 300 | 25 | 60 | |
| Usinagem bruta e media Tolerâncias > 0,1 mm | 300 | 22 | 60 | |
| Usinagem de precisão: afiação Tolerâncias ≤ 0,1 mm | 500 | 19 | 60 | |
| Ferramentaria; fabricação de equipamento de corte | 750 | 19 | 60 | |

Fonte: ABNT (2019)

4.9.5 Setor: Roll Forming

Figura 25 - Norma ABNT "Roll forming"

| Especificações da Norma ABNT NBR ISO/IEC 8995-1:2013 | | | | |
|---|--|---------|-------|--|
|  | Associação Brasileira de Normas Técnicas | | | |
| | Iluminação de ambientes de trabalho ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013 | | | |
| Tipo de ambiente, tarefa ou atividade | \dot{E}_m lux | UGR_L | R_a | Observações |
| Fornos | 200 | 25 | 20 | As cores para segurança devem ser reconhecíveis. |
| Usinagem, bobinadeira, linha de corte | 300 | 25 | 40 | |
| Plataformas de controle, painéis de controle | 300 | 22 | 80 | |

Fonte: ABNT (2019)

4.9.6 Setor: Nave Oeste

Figura 26 - Norma ABNT "Nave Oeste"

| Especificações da Norma ABNT NBR ISO/IEC 8995-1:2013 | | | | |
|---|--|---------|-------|--|
|  | Associação Brasileira de Normas Técnicas | | | |
| | Iluminação de ambientes de trabalho ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013 | | | |
| Tipo de ambiente, tarefa ou atividade | \dot{E}_m lux | UGR_L | R_a | Observações |
| Estufas, sala dos disjuntores | 200 | 25 | 60 | |
| Correios, quadros de distribuição | 500 | 19 | 80 | |
| Depósito, estoques, câmara fria | 100 | 25 | 60 | 200 lux se forem continuamente ocupadas |
| Expedição | 300 | 25 | 60 | |
| Estação de controle | 150 | 22 | 60 | 200 lux se forem continuamente ocupadas |
| Áreas de circulação e corredores | 100 | 28 | 40 | Nas entradas e saídas estabelecer uma zona de transição a fim de evitar mudanças bruscas |
| Montagem: | | | | |
| - bruta | 200 | 25 | 80 | Para montagem alta: ver também a seção 4.6.2 |
| - média | 300 | 25 | 80 | Para montagem alta: ver também a seção 4.6.2 |

Fonte: ABNT (2019)

4.10 Aferição de dados

Para a realização das medições das condições atuais na fábrica, foi utilizado o luxímetro para a captura de iluminância, com base nisso, foi feito um levantamento de dados contemplando individualmente cada setor. Assim, foi constatado na prática que os valores de iluminância encontrados em cada setores estavam abaixo das especificações de acordo com seu tipo de processo.

Conforme estabelecido pela normal ABNT, os diferentes tipos de processos, atividades ou tarefas, seguem os padrões abaixo:

- Soldagem, moldagem a frio e forjamento por derramamento a iluminância: mínimo de 300 lux;
- Processo de fabricação de equipamentos de corte (ferramentaria): mínimo 750 lux;
- Processo de montagem de nível médio: mínimo de 300 Lux;
- Usinagem, linha de corte e bobinadeira: mínimo de 300 Lux.;
- Expedição: mínimo de 300 Lux;
- Áreas de circulação e corredores: mínimo de 300 Lux;

Tabela 4 - Dados coletados nos setores

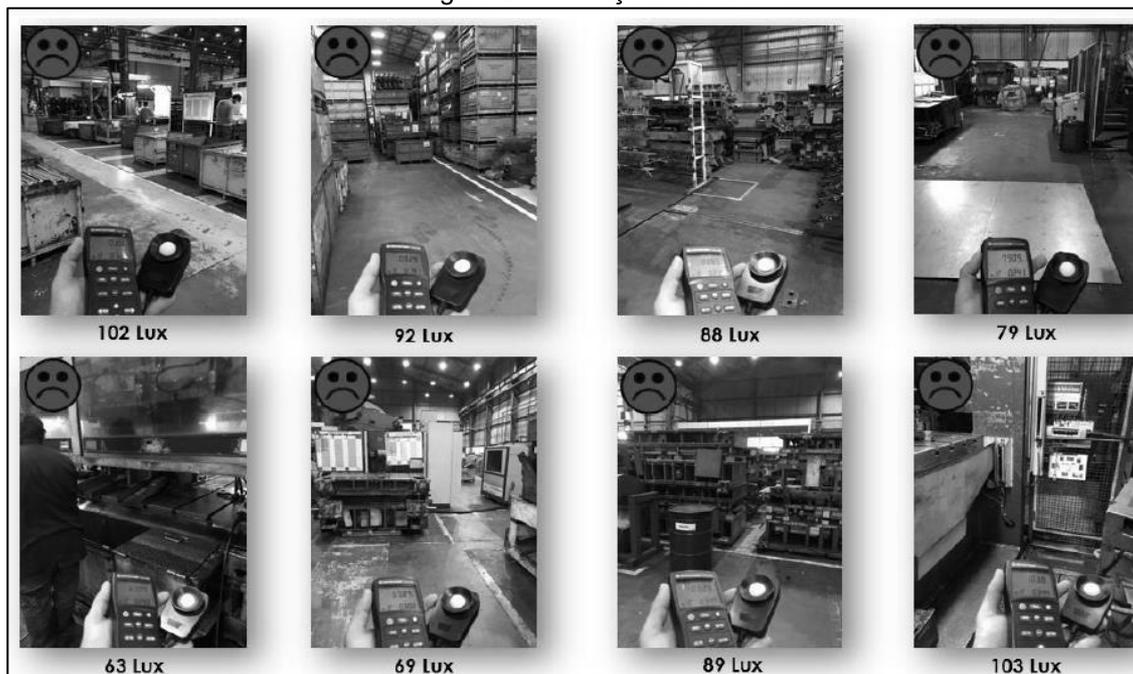
| Estamparia - Mínimo 300 Lux | | | | Hot Stamping - Mínimo 300 Lux | | | | |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Imagem 1 | Imagem 2 | Imagem 3 | Imagem 4 | Imagem 1 | Imagem 2 | Imagem 3 | Imagem 4 | |
| 102 | 92 | 88 | 79 | 268 | 233 | 238 | 277 | |
| Imagem 5 | Imagem 6 | Imagem 7 | Imagem 8 | Imagem 5 | Imagem 6 | Imagem 7 | Imagem 8 | |
| 63 | 69 | 89 | 103 | 127 | 131 | 160 | 187 | |
| Ferramentaria - Mínimo 750 Lux | | | | Copreci - Mínimo 300 Lux | | | | |
| Imagem 1 | Imagem 2 | Imagem 3 | Imagem 4 | Imagem 1 | Imagem 2 | Imagem 3 | Imagem 4 | |
| 71 | 107 | 132 | 162 | 198 | 143 | 220 | 342 | |
| Imagem 5 | Imagem 6 | Imagem 7 | Imagem 8 | Imagem 5 | Imagem 6 | | | |
| 186 | 163 | 188 | 121 | 353 | 192 | | | |
| Imagem 9 | Imagem 10 | Imagem 11 | Imagem 12 | Hot Stamping - Mínimo 300 Lux | | | | |
| 208 | 157 | 152 | 202 | Imagem 1 | Imagem 2 | Imagem 3 | Imagem 4 | |
| Imagem 13 | Imagem 14 | Imagem 15 | | | 69 | 49 | 113 | 48 |
| 330 | 252 | 132 | | | Imagem 5 | Imagem 6 | Imagem 7 | Imagem 8 |
| Solda - Mínimo 300 Lux | | | | 79 | 88 | 90 | 130 | |
| Imagem 1 | Imagem 2 | Imagem 3 | Imagem 4 | Montagem & Pintura - Mínimo 300 Lux | | | | |
| 180 | 194 | 162 | 198 | Imagem 1 | Imagem 2 | Imagem 3 | Imagem 4 | |
| Imagem 5 | Imagem 6 | Imagem 7 | Imagem 8 | 78 | 72 | 189 | 189 | |
| 268 | 371 | 154 | 231 | Imagem 5 | Imagem 6 | Imagem 7 | Imagem 8 | |
| | | | | 188 | 178 | 170 | 140 | |

Fonte: Próprio (2019)

Conforme tabela acima, esses números são consequências da atual infraestrutura iluminária e evidencia sobre a influência direta das lâmpadas no processo fabril. Na sequência, a realização dos testes em cada setor.

4.10.1 Medições de iluminância – Estamparia – Norma 300 lux

Figura 27 - Medições do luxímetro



Fonte: Próprio (2019)

4.10.2 Medições de iluminância – Ferramentaria – Norma 750 lux

Figura 28 - Medições do luxímetro



Fonte: Próprio (2019)

4.10.3 Medições de iluminância – Ferramentaria – Norma 750 lux

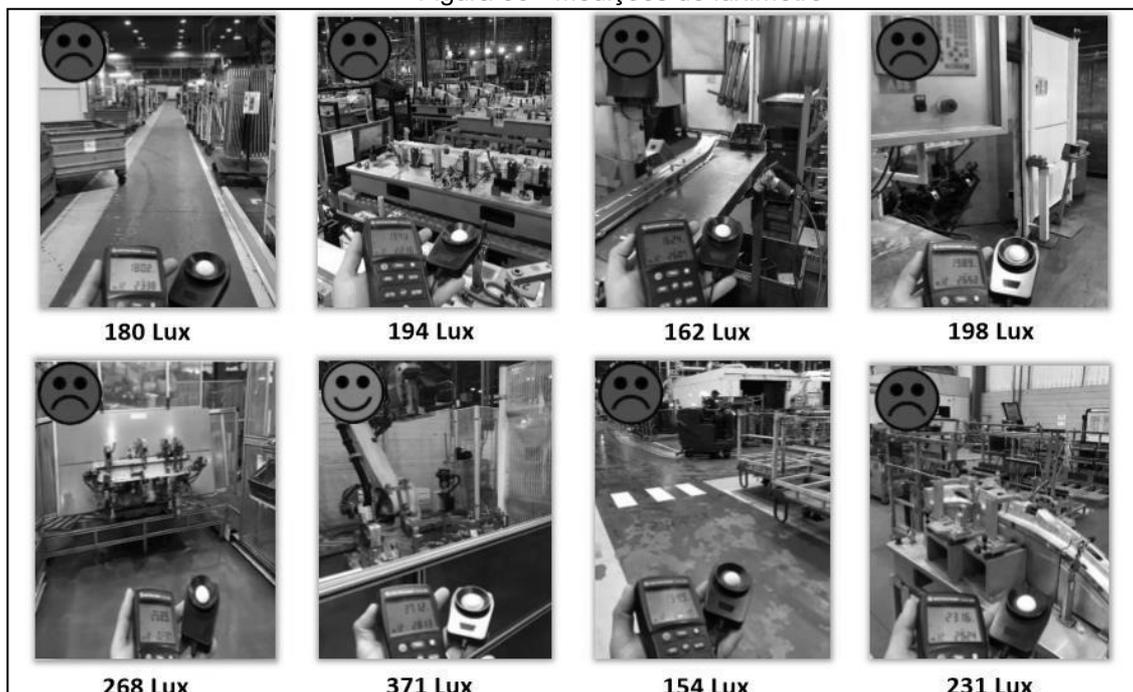
Figura 29 - Medições do luxímetro



Fonte: Próprio (2019)

4.10.4 Medições de iluminância – Solda – Norma 300 lux

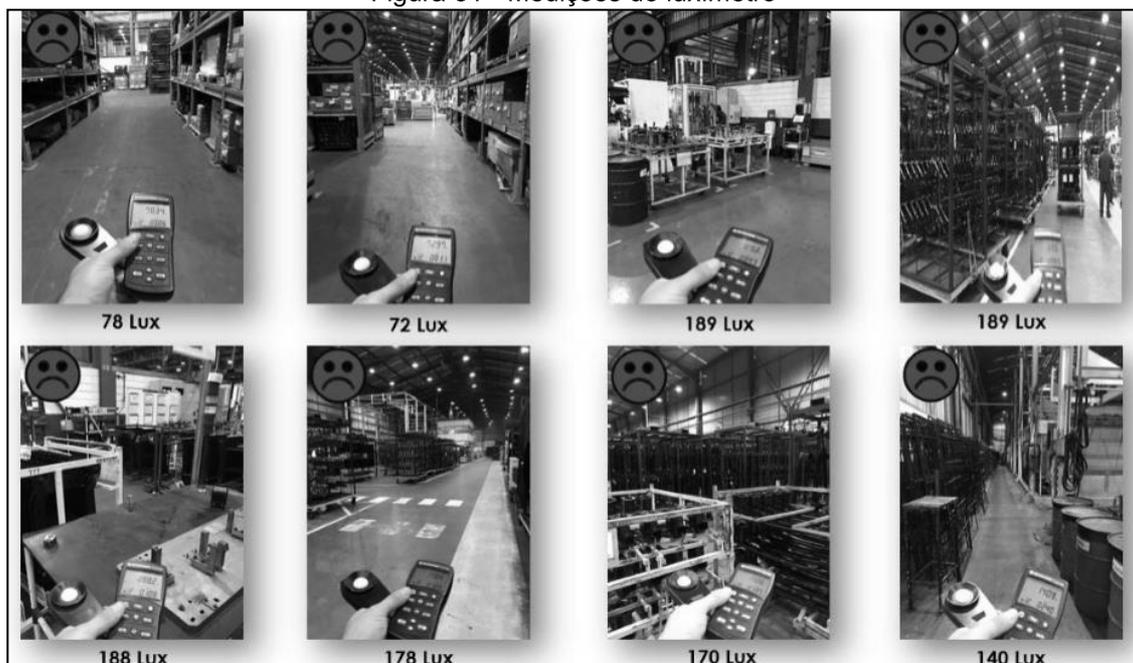
Figura 30 - Medições do luxímetro



Fonte: Próprio (2019)

4.10.5 Medições de iluminância – Montagem & Pintura – Norma 300 lux

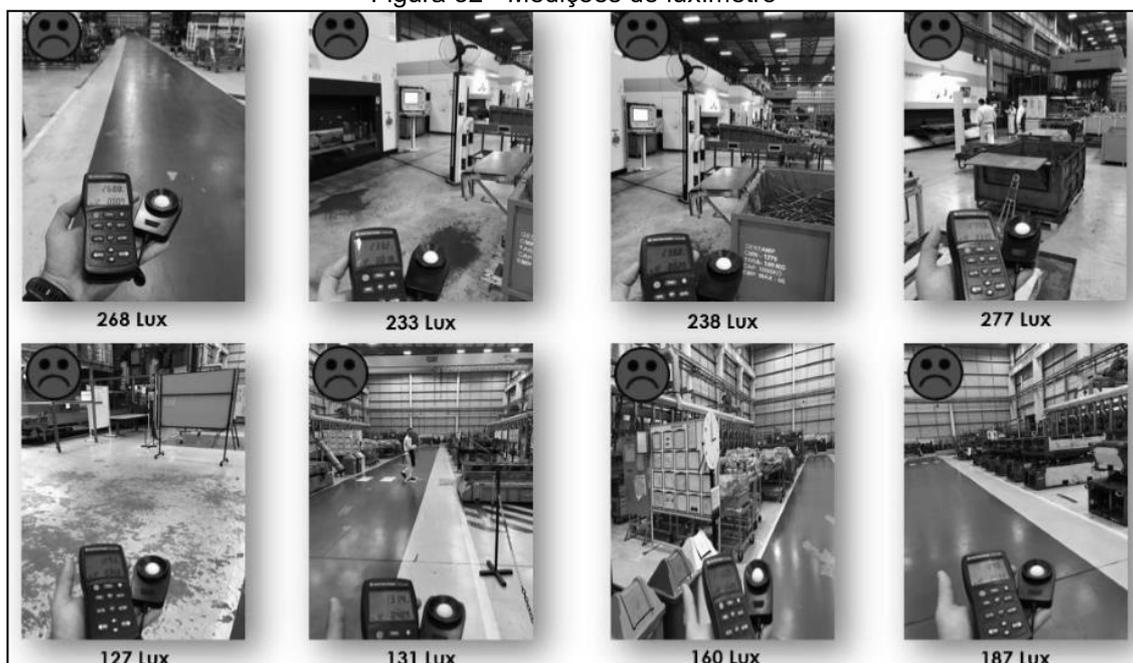
Figura 31 - Medições do luxímetro



Fonte: Próprio (2019)

4.10.6 Medições de iluminância – Hot Stamping – Norma 300 lux

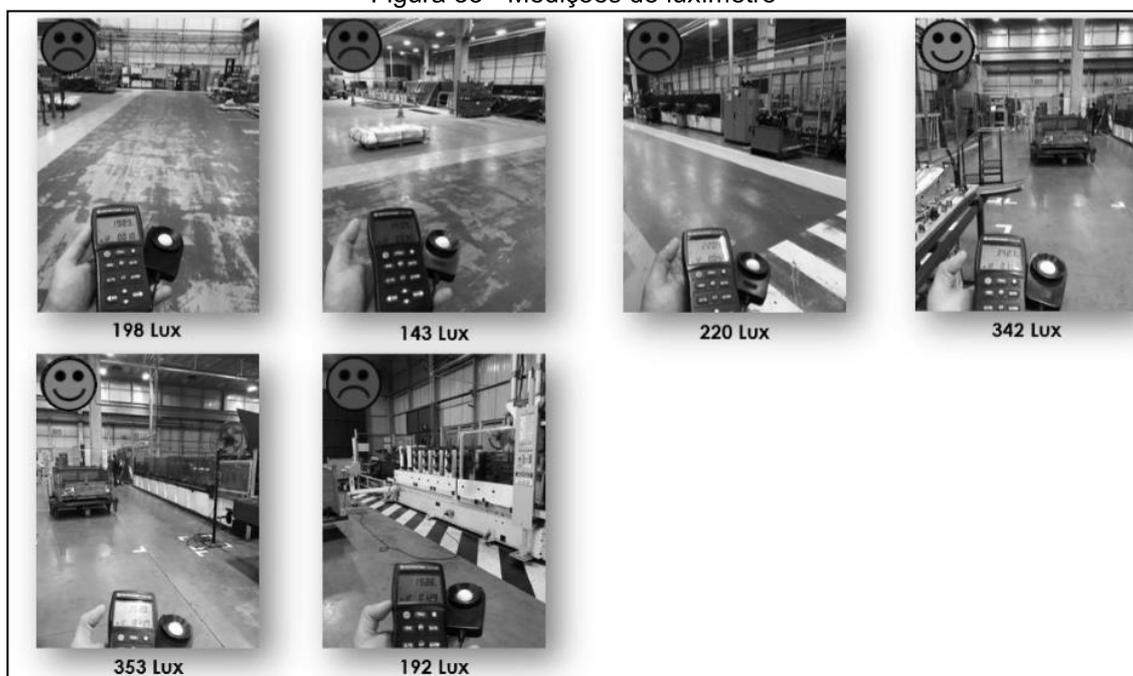
Figura 32 - Medições do luxímetro



Fonte: Próprio (2019)

4.10.7 Medições de iluminância – Roll Forming – Norma 300 lux

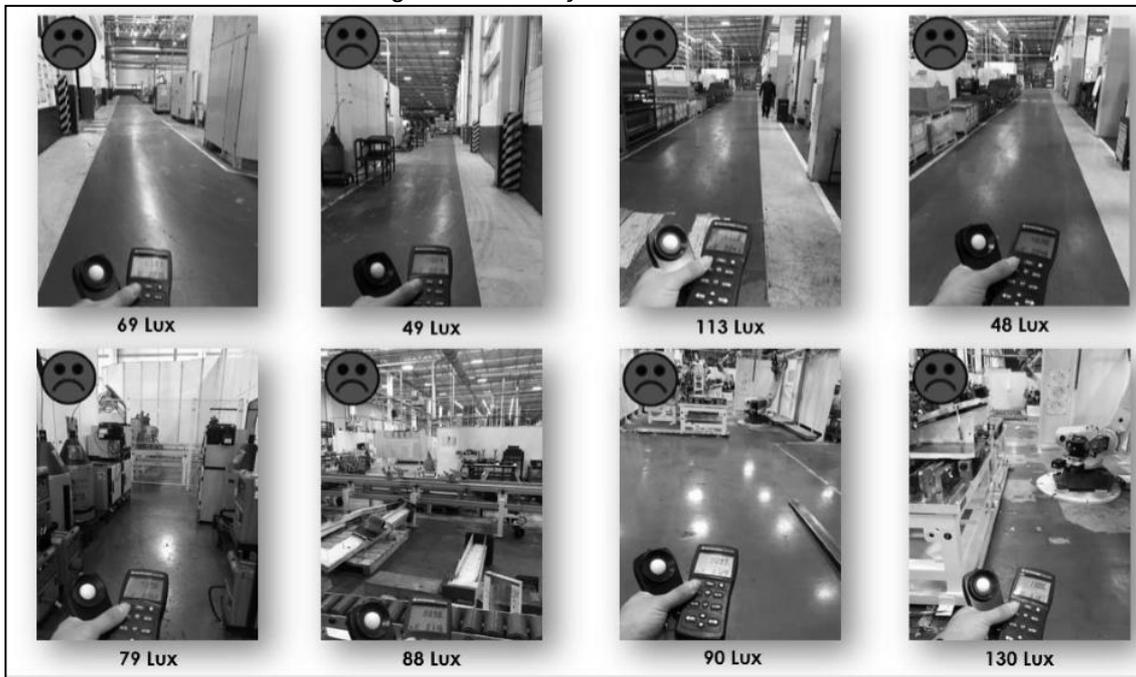
Figura 33 - Medições do luxímetro



Fonte: Próprio (2019)

4.10.8 Medições de iluminância – Nave Oeste – Norma 300 lux

Figura 34 - Medições do luxímetro



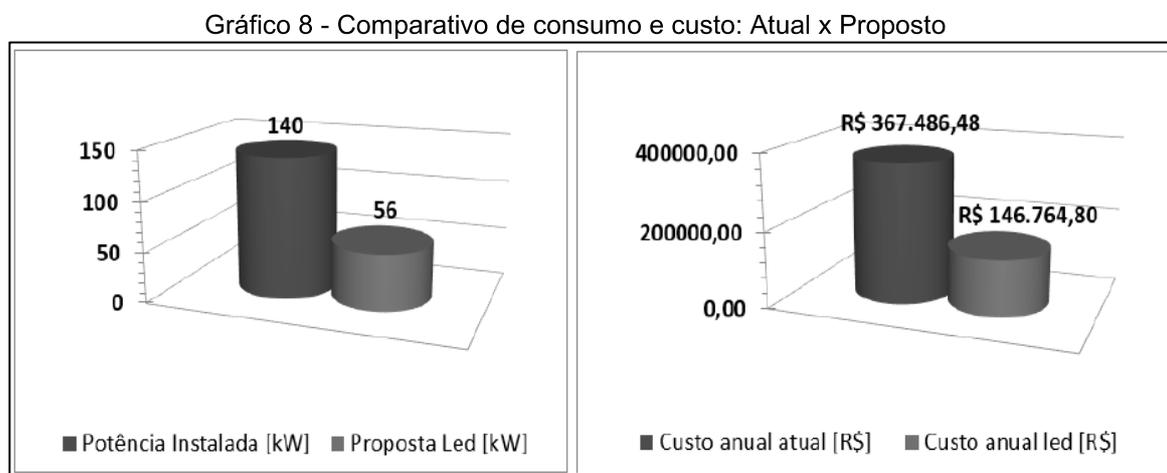
Fonte: Próprio (2019)

5 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo a aplicação de um novo conceito de redução de energia e modo de redução de custos para uma empresa que tem como objetivo a otimização de suas despesas e assim gerando mais lucro e valor agregado nos seus produtos. Com o estudo realizado foi possível primeiramente ter noção das perdas que ocorriam ao longo dos meses, com a infraestrutura antiga e gerando desperdícios grandes. Foi possível também propor uma nova tecnologia que beneficia tanto os custos quanto ao meio ambiente por se tratar de uma energia que o seu descarte não afeta o meio ambiente conforme ocorria com as outras lâmpadas. Por meio das medições realizadas com o aparelho luxímetro foi possível quantificar a diferença do fluxo luminoso entre as regiões mais iluminadas e as regiões sombreadas. Verificou-se que as regiões de sombreamento podem ser evitadas respeitando-se as indicações mostradas na metodologia de desenvolvimento de um projeto luminotécnico. Os parâmetros calculados para a instalação das lâmpadas LED mostraram que há a necessidade de mudar a configuração das luminárias atualmente instaladas das áreas estudadas e de adquirir novas luminárias.

Com base no estudo realizado chegou-se a números finais em relação ao custo e redução das perdas com o projeto luminotécnico.

No setor de estamperia tivemos o seguinte cenário com a proposta das luminárias LED conforme imagem a baixo:

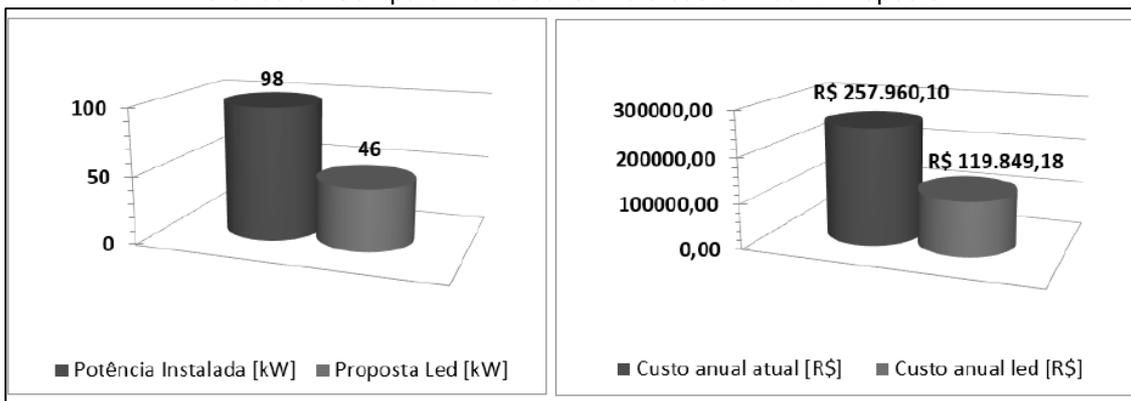


Fonte: Próprio (2019)

Se efetuado o que foi proposto o ganho anual na área da estampa será de R\$ 220.721,68 e com uma redução de 60% se comparada a estrutura de iluminação atual.

Na área de solda temos o seguinte cenário proposto com o estudo realizado, conforme figura abaixo:

Gráfico 9 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto

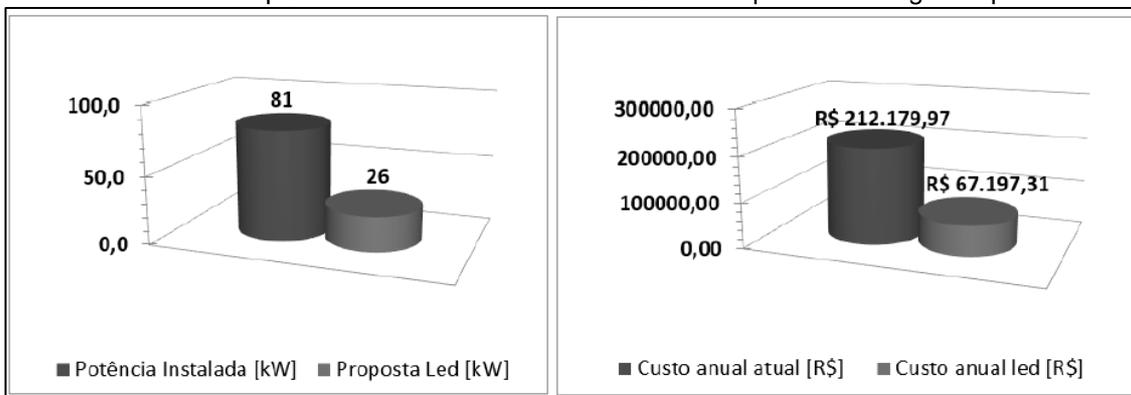


Fonte: Próprio (2019)

Se efetuado o que foi proposto o ganho anual na área da solda será de R\$ 138.110,92 e com uma redução de 53% se comparada a estrutura de iluminação atual.

Na área da montagem e pintura temos o seguinte cenário proposto com o estudo realizado, conforme figura abaixo:

Gráfico 10 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto "Montagem e pintura"

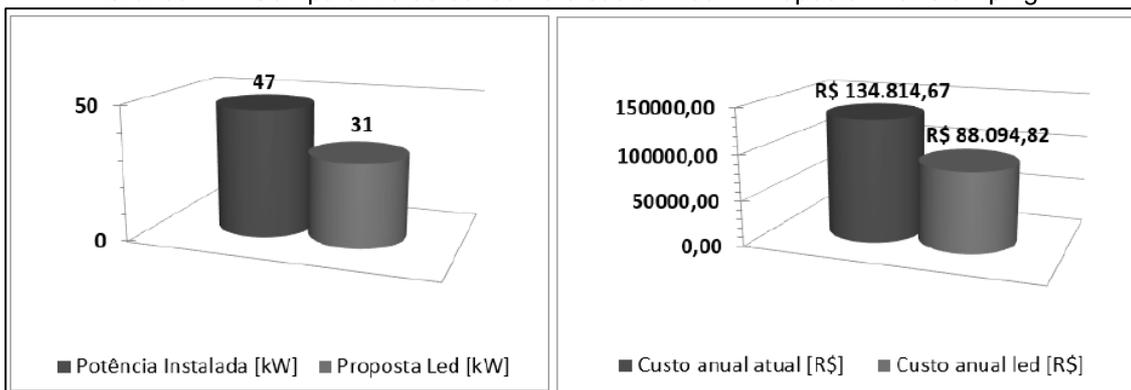


Fonte: Próprio (2019)

Se efetuado o que foi proposto o ganho anual na área da montagem e pintura será de R\$ 144.982,66 e com uma redução de 68% se comparada a estrutura de iluminação atual.

Na área do hot stamping temos o seguinte cenário proposto com o estudo realizado, conforme figura abaixo:

Gráfico 11 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto "Hot Stamping"

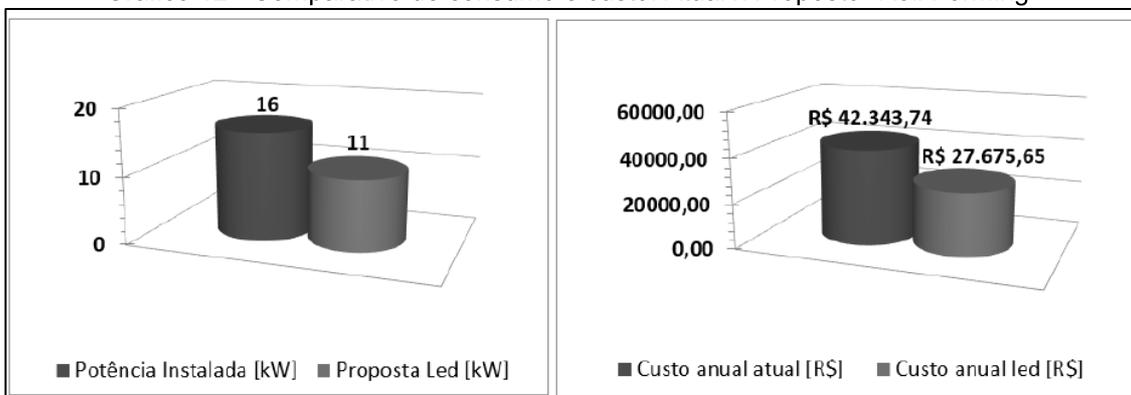


Fonte: Próprio (2019)

Se efetuado o que foi proposto o ganho anual na área do hotstamping será de R\$ 46.719,85 e com uma redução de 34% se comparada a estrutura de iluminação atual.

Na área do roll Forming temos o seguinte cenário proposto com o estudo realizado, conforme figura abaixo:

Gráfico 12 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto "Roll Forming"

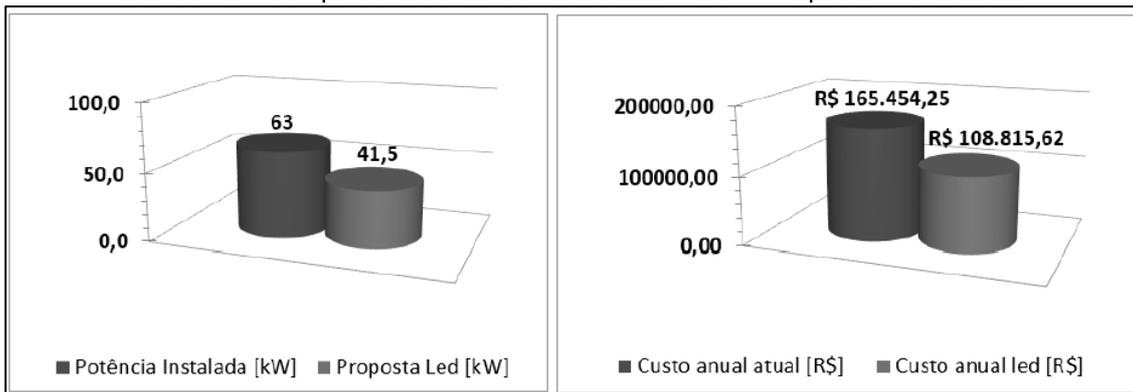


Fonte: Próprio (2019)

Se efetuado o que foi proposto o ganho anual na área do roll forming será de R\$ 14.668,09 e com uma redução de 34% se comparada a estrutura de iluminação atual.

Na área da nave oeste temos o seguinte cenário proposto com o estudo realizado, conforme figura abaixo:

Gráfico 13 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto "Nave oeste"

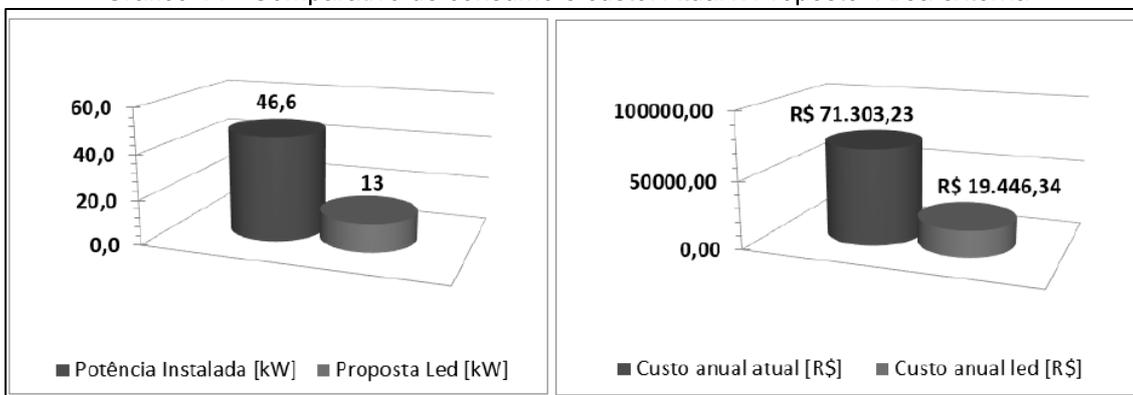


Fonte: Próprio (2019)

Se efetuado o que foi proposto o ganho anual na área da nave oeste será de R\$ 56.638,63 e com uma redução de 34% se comparada a estrutura de iluminação atual.

Na área externa temos o seguinte cenário proposto com o estudo realizado, conforme figura abaixo:

Gráfico 14 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto "Área externa"

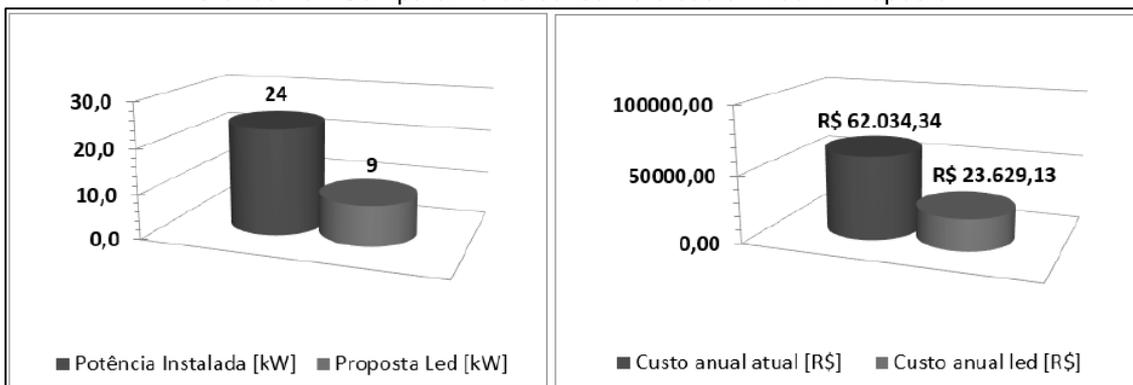


Fonte: Próprio (2019)

Se efetuado o que foi proposto o ganho anual na área externa será de R\$ 51.856,90 e com uma redução de 72% se comparada a estrutura de iluminação atual.

Em relação as iluminações primárias, temos o seguinte cenário proposto com o estudo realizado, conforme figura abaixo:

Gráfico 15 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto

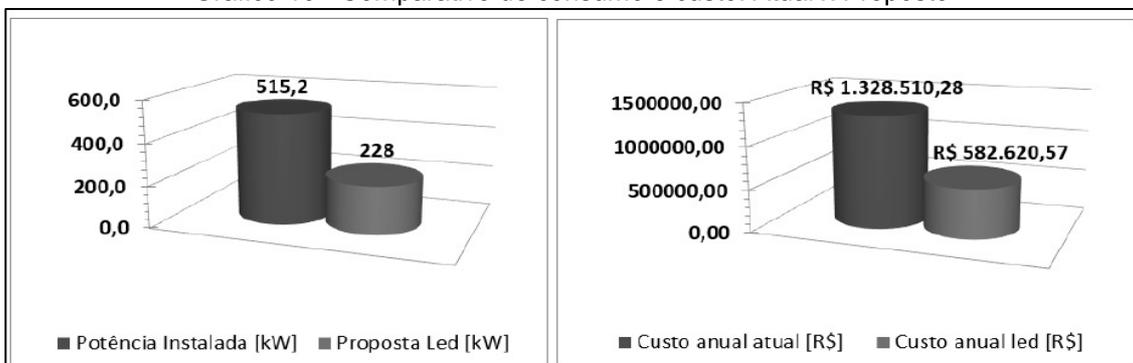


Fonte: Próprio (2019)

Se efetuado o que foi proposto o ganho anual na iluminação primária será de R\$ 38.405,20 e com uma redução de 61% se comparada a estrutura de iluminação atual.

Por fim o projeto realizado teve os números finais ao somar as áreas da fábrica e dimensionar os ganhos, conforme figura abaixo:

Gráfico 16 - Comparativo de consumo e custo: Atual x Proposto



Fonte: Próprio (2019)

Se efetuado o que foi proposto o ganho anual total será de R\$ 745.889,71 e com uma redução de 56% se comparada a estrutura de iluminação atual.

Com isso conclui-se desse estudo que a atualização e adoção de novas tecnologias chegam para melhorar processos e defasagens hoje encontradas no setor fabril das empresas, tendo assim retornos financeiros e atendendo a normais e como consequência também melhorando o aspecto visual.

O estudo comprova que financeiramente a aplicação da tecnologia em LED deve ser implementada para que a empresa tenha ganhos anuais significativos e assim melhorando os resultados finais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IMAI, M. (1990). **Kaizen: a estratégia para o sucesso competitivo**. Tradução Cecília Fagnani Lucca. 3ª ed. IMAM.

GOOGLE TRADUTOR, 2019 Disponível em < <https://translate.google.com.br/> > Consultado em 25 de outubro 2019.

PANESI, André. **Fundamentos de Eficiência energética: Industrial, Comercial e Residencial**, Editora Ensino Profissional, 2006.

RIBEIRO, André. **Guia de aplicações: gestão de energia e eficiência energética**. 3. Ed. Engebook, 2016.

Projeto Luminotécnico. Engenheiro na Web. 29 de junho de 2016. Consultado em 25 de julho de 2019.

Tipos de Lâmpadas. Engenheiro na Web. 28 de junho de 2016. Consultado em 25 de julho de 2019.

MATTEDE, Henrique. O que é luminotécnica. **Mundo da elétrica**, 2019. Disponível em: < <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-luminotecnica/> > consultado em 24 de agosto de 2019.

BARROS, Benjamin; BORELLI, Reinaldo; GEDRA, Ricardo. **Eficiência energética: Técnicas de aproveitamento, gestão de recursos e fundamentos**. Ed. Érica, 18 de maio de 2015

BARROS, Benjamin; BORELLI, Reinaldo; GEDRA, Ricardo. **Gerenciamento de energia: Ações administrativas e técnicas de uso adequado da energia elétrica**. Ed. Érica, 24 de novembro 2015.

CREDER, Hélio, **Instalações Elétricas**, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1991.

LUZ, Jeanine M., Luminotécnica. **Unicamp**, 2019. Disponível em: <<https://hosting.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Livros/Luminotecnica.pdf>>. Consultado em 28 de agosto de 2019.

DA COSTA, Gilberto J. C., **Iluminação Econômica – Cálculo e Avaliação**, EDIPUCRS, 1998.

FONSECA, Romulo Soares. **Iluminação Elétrica**. McGraw-Hill do Brasil.

MOREIRA, Vinicius de Araújo. **Iluminação e Fotometria – Teoria e Aplicação**.

LIMA, Renato. **A história da lâmpada elétrica**. Março 2018. Disponível em: <<https://blog.borealled.com.br/historia-lampada-eletrica-incandescente/>>. Consultado em 29 de agosto de 2019.

CORRÊA, Fernando A. L. **Introdução a luminotécnica**. Disponível em: http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te067/introducao_luminotecnica.pdf Consultado em 29 de agosto de 2019.

Como se dá a percepção das cores pelo olho Humano. Disponível em: <<https://fisicauniverse.blogspot.com/2010/08/4-como-se-da-percepcao-das-cores-pelo.html>>. Consultado em 30 de agosto de 2019.

Espectro eletromagnético. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/espectro-eletromagnetico/>>. Consultado em 01 de setembro de 2019.

Entenda o conceito da distribuição de luz e aprenda a ler uma curva fotométrica. Disponível em: <<https://www.vivadecora.com.br/pro/iluminacao/curva-fotometrica/>>. Consultado em 29 de agosto de 2019.

Shubert, E. Fred (2003), Diodos emissores de luz, **Cambridge University Press**, p. 1, ISBN 0-521-82330-7, **O primeiro diodo emissor de luz (LED) nasceu**.

Gernsback, Hugo (setembro de 1924). "**Uma invenção de rádio sensacional**"

Tom Simonite (11-04-2007). "**O LED - mais antigo do que pensávamos**".
Novos blogs de cientistas. Consultado em 11 de Setembro de 2019.

«After Glow». **Illinois Alumni Magazine**. Consultado em 11 de Setembro de 2019.

Wolinsky, Howard (2 de maio de 2005). «**U. of I.'s Holonyak out to take some of Edison's luster**». Chicago Sun-Times. Consultado em 29 de julho de 2019

«The Nobel Prize in Physics 2014» (em inglês). **Fundação Nobel**. Consultado em 7 de outubro de 2019.