

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA COM ÊNFASE EM AUTOMAÇÃO

ANDERSON RENAN ZILLI
FLAVIA LIMA BORGES DA COSTA
GABRIEL ARTHUR FRANCIOSI SEIXAS

DESENVOLVIMENTO DE LUMINÁRIA INDUSTRIAL A LED COM
APROVEITAMENTO DA DISSIPACÃO TÉRMICA PARA AQUECIMENTO DE
ÁGUA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

ANDERSON RENAN ZILLI
FLAVIA LIMA BORGES DA COSTA
GABRIEL ARTHUR FRANCIOSI SEIXAS

DESENVOLVIMENTO DE LUMINÁRIA INDUSTRIAL A LED COM
APROVEITAMENTO DA DISSIPAÇÃO TÉRMICA PARA AQUECIMENTO DE
ÁGUA

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do curso Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Júlio Cesar Nitsch

CURITIBA

2015

RESUMO

COSTA, Flavia Lima Borges da, SEIXAS, Gabriel Arthur Franciosi e, ZILLI, Anderson Renan. Desenvolvimento de luminária industrial a LED com aproveitamento da dissipação térmica para aquecimento de água. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Elétrica ênfase Automação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Este trabalho de conclusão de curso apresenta o desenvolvimento de um sistema térmico que permita o aproveitamento do calor gerado pela dissipação térmica de uma luminária LED industrial para o aquecimento de um fluido. Foram estudados quatro temas principais: tecnologia LED, luminotécnica, eficiência energética e transferência de calor. No desenvolvimento do trabalho foi descrito detalhadamente o sistema térmico da luminária, seu funcionamento e equacionamento. Foi complementado por relatórios com resultados práticos embasados em cálculos teóricos, chegando à conclusão da viabilidade da execução do projeto.

Palavras-chave: Luminária LED, Eficiência Energética, Transferência de Calor.

ABSTRACT

COSTA, Flavia Lima Borges da, SEIXAS, Gabriel Arthur Franciosi e, ZILLI, Anderson Renan. Development of a thermal system that's allowing the use of heat generated by the thermal dissipation of an industrial LED lamp for heating a fluid. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Elétrica ênfase Automação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

This course conclusion work presents the development of a thermal system that's allowing the use of heat generated by the thermal dissipation of an industrial LED lamp for heating a fluid. Four main themes will be studied: LED technology, lighting, energy efficiency and heat transfer. In developing this work it was described in detail: the thermal system of the lamp, its operation and addressing. It was complemented by reports that deliver results grounded in theoretical calculations and concluded the feasibility of the project execution.

Keywords: LED Lamp, Energy Efficiency, Heat Transfer

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

ABESCO	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CIE	Comissão Internacional de Iluminação
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESCO	Empresas de Serviços de Eficiência Energética
HQI	<i>Halogen Quartz Iodide</i>
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IRC	Índice de Reprodução de Cor
LED	<i>Light Emitter Diode</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MEE	Medidas de Eficiência Energética
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PEE	Programa de Eficiência Energética
PNE	Plano Nacional de Energia
PROCEL	Programa Nacional de Conservação da Energia Elétrica
RGR	Reserva Global de Reversão
ROL	Receita Operacional Líquida
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VSAP	Lâmpadas a Vapor de Sódio Alta Pressão

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emissão de luz em um LED	15
Figura 2 - Eficiência luminosa x Anos	15
Figura 3 - Eficiência luminosa LED x VSAP.....	16
Figura 4 - Luminária AN-HL – 30 W a 160 W	17
Figura 5 - Lâmpada LED Philips.....	17
Figura 6 - Luminárias industriais Philips	18
Figura 7 - LED Acrich 2 – 13 W	19
Figura 8 – Módulo LED com dissipador	19
Figura 9 - Energia dissipada pelo LED	20
Figura 10 - Lâmpada fluorescente	24
Figura 11 - Lâmpada de vapor de mercúrio, GE	24
Figura 12 - Comprimento de onda.....	25
Figura 13 - Espectro da luz visível em função do comprimento de onda	26
Figura 14 - Fluxo luminoso	27
Figura 15 - Iluminância	27
Figura 16 - Luminância	28
Figura 17 - Eficiência luminosa	28
Figura 18 - Curva de distribuição luminosa de uma lâmpada	29
Figura 19 - Diagrama de cromaticidade	32
Figura 20 - Elipses de MacAdam	32
Figura 21 - Binagem de LEDs.....	33
Figura 22 - Binagem Optibin.....	34
Figura 23 - Sequência para um diagnóstico energético	36
Figura 24 - Exemplo didático da temperatura de junção em um semicondutor	48
Figura 25 - Funcionamento interno do LED	51
Figura 26 - Mistura aditiva de cor	51
Figura 27 - Circuito térmico do LED	52
Figura 28 - Térmica do LED	53
Figura 29 - Dimensões do módulo em mm	54
Figura 30 - Circuito de controle	55
Figura 31 - Diagrama de blocos	56

Figura 32 - Diagrama de blocos	56
Figura 33 - LED SAW8KG0B	57
Figura 34 - Ponte retificadora MB6S	58
Figura 35 - Diagrama de blocos DT3001A	59
Figura 36 - Diagrama de blocos aplicado DT3001A.....	60
Figura 37 - Perfil de alumínio.....	61
Figura 38 - Luminária – vista inferior	62
Figura 39 - Dissipadores fixados internamente	62
Figura 40 - Diagrama do sistema.....	63
Figura 41 - Protótipo de luminária para simulações.....	64
Figura 42 - Experimento 1	65
Figura 43 - Corte aa' – Interior da luminária – Experimento 1	66
Figura 44 - Temperatura no LED x tempo	66
Figura 45 - Experimento 2 – Controle de vazão de saída.....	67
Figura 46 - Corte aa' - Interior da luminária - Experimento 2	68
Figura 47 - Temperatura no LED x tempo	68
Figura 48 - Experimento 3.....	69
Figura 49 - Corte aa' - Experimento 3.....	69
Figura 50 - Valores iniciais do experimento 3	69
Figura 51 - Valores finais do experimento 3	70
Figura 52 - Medição de temperatura no encapsulamento do LED (1)	71
Figura 53 - Medição de temperatura no encapsulamento do LED (2)	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condutividade térmica por material	41
Tabela 2 - Características de funcionamento do módulo Acrich SMJE-3V12W1P3.....	54
Tabela 3 - Valores máximos permitidos a $T_a = 25^{\circ}\text{C}$	54
Tabela 4 - Disparos para o controle de corrente	56
Tabela 5 - Características de funcionamento do LED	57
Tabela 6 - Valores máximos permitidos MB6S	58
Tabela 7 - Características térmicas MB6S	58
Tabela 8 - Valores máximos permitidos DT3001A.....	59
Tabela 9 - Variação de temperatura – Experimento 1	66
Tabela 10 - Variação de temperatura – Experimento 2	68
Tabela 11 - Resultados – Experimento 3.....	70
Tabela 12 - Temperatura final do LED	73

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Eficiência luminosa	39
Equação 2 - Energia total de um sistema.....	40
Equação 3 - Variação de energia em um sistema	40
Equação 4 - Energia térmica para sistemas em regime permanente	40
Equação 5 - Condutividade térmica K.....	41
Equação 6 - Quantidade de calor transmitida por condução	42
Equação 7 - Quantidade de calor transmitida por condução (kcal/h).....	43
Equação 8 - Resistência térmica a condução.....	43
Equação 9 - Quantidade de calor transmitida (Regime Permanente).....	43
Equação 10 - Fluxo de calor 1	43
Equação 11 - Fluxo de calor 2	43
Equação 12 - Fluxo de calor 3	43
Equação 13 - Fluxo de calor 4.....	43
Equação 14 - Integrando fluxo de calor.....	43
Equação 15 - Solução da Equação 14.....	43
Equação 16 - Determinação da temperatura.....	43
Equação 17 - Quantidade de calor emitida por irradiação.....	44
Equação 18 - Energia emitida entre dois corpos negros.....	44
Equação 19 - Energia emitida entre dois corpos negros (Caso Real).....	44
Equação 20 - Condutância térmica por irradiação.....	45
Equação 21 - Resistência térmica para irradiação	45
Equação 22 - Coeficiente médio de transmissão de calor	45
Equação 23 - Calor transmitido entre uma superfície sólida e um fluido por convecção	46
Equação 24 - Condutância térmica para convecção	46
Equação 25 - Quantidade de calor transmitida por convecção.....	46
Equação 26 - Quantidade de calor total transmitida para convecção	46
Equação 27 - Quantidade de calor transmitida.....	47
Equação 28 - Coeficiente combinado de transmissão de calor	47
Equação 29 - Equação de fluidos escoando no interior de uma tubulação.....	47
Equação 30 - Coeficiente de filme para água em tubos	47
Equação 31 - Número de Reynolds	47

Equação 32 - Somatório de resistências térmicas entre a junção e o ambiente.....	52
Equação 33 - Diferença de temperatura entre a junção e o ambiente.....	52
Equação 34 - Resistência térmica entre a junção e o ambiente	52
Equação 35 - Temperatura máxima do encapsulamento	53
Equação 36 - Temperatura máxima do encapsulamento (solução)	53
Equação 37 - Média da variação de temperatura.....	72
Equação 38 - Média da variação de temperatura 1	72
Equação 39 - Média da variação de temperatura 2.....	72
Equação 40 - Média da temperatura final do LED	73
Equação 41 - Média da temperatura final do LED 1	73
Equação 42 - Média da temperatura final do LED 2.....	73
Equação 43 - Resistência térmica de paredes compostas	74
Equação 44 - Cálculo da resistência térmica de paredes compostas	74
Equação 45 - Cálculo da resistência térmica de paredes compostas 2	74
Equação 46 - Cálculo da temperatura no região do dissipador	74
Equação 47 - Velocidade em função da vazão	75
Equação 48 - Número de Reynolds (2)	75
Equação 49 - Determinação da temperatura da água – Experimento 1	75
Equação 50 - Temperatura final da água – Experimento 1	75
Equação 51 - Determinação da temperatura da água – Experimento 2.....	75
Equação 52 - Temperatura final da água – Experimento 2	75
Equação 53 - Cálculo da resistência térmica de paredes compostas	76
Equação 54 - Determinação da temperatura.....	76
Equação 55 - Determinação da temperatura da água (1).....	76
Equação 56 - Determinação da temperatura da água (2).....	76

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	TEMA	16
1.1.1	Delimitação do Tema	18
1.2	PROBLEMA	20
1.3	JUSTIFICATIVA	21
1.4	OBJETIVO	21
1.4.1	Objetivo Geral	21
1.4.2	Objetivos Específicos	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	LUMINOTÉCNICA	23
2.1.1	Lâmpadas de Descarga	23
2.1.1.1	Luz Mista	23
2.1.1.2	Fluorescente	23
2.1.1.3	Vapor de Mercúrio	24
2.1.1.4	Vapor de Sódio de Alta Pressão	25
2.1.2	Grandezas e Fundamentos da Luminotécnica	25
2.1.2.1	Luz	25
2.1.2.2	Cor	26
2.1.2.3	Intensidade Luminosa - Candela (cd)	26
2.1.2.4	Fluxo Luminoso - Lúmen (lm)	26
2.1.2.5	Iluminância - lux (lx)	27
2.1.2.6	Luminância - cd/m ² ou <i>nit</i>	27
2.1.2.7	Eficiência Luminosa - lm/W	28
2.1.2.8	Curva de Distribuição Luminosa	29
2.1.2.9	Depreciação do Fluxo Luminoso	29
2.1.2.10	Fator de Utilização	30

2.1.2.11	Ofuscamento.....	30
2.1.2.12	Fator de manutenção.....	30
2.1.2.13	Índice de Reprodução de Cor	30
2.1.2.14	Temperatura de Cor	31
2.2	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	34
2.2.1	Gerenciamento Energético	35
2.2.2	Histórico da Eficiência Energética	36
2.2.3	Programas de Incentivo Brasileiros.....	37
2.2.3.1	Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE).....	38
2.2.3.2	Programa Nacional de Conservação da Energia Elétrica (Procel)	38
2.2.3.3	Programa de Eficiência Energética (PEE).....	38
2.2.4	Eficiência Energética na Iluminação.....	39
2.3	TRANSFERÊNCIA DE CALOR	40
2.3.1	Conservação da energia.....	40
2.3.2	Condutividade Térmica	41
2.3.3	Transferência de Calor	41
2.3.3.1	Condução.....	42
2.3.3.2	Radiação	44
2.3.3.3	Convecção	45
2.3.4	Dissipador de Calor	47
2.3.4.1	Material	48
2.3.4.2	Geometria	49
2.4	LIGHT EMITTER DIODE (LED).....	50
2.4.1	Fundamentos Químicos.....	50
2.4.2	Princípio de Funcionamento.....	50
2.4.3	Características Térmicas.....	52
2.4.3.1	Térmica da Junção do LED	53

2.4.4	Módulo Acrich SMJE-3V12W1P3	53
2.4.4.1	Dimensões	54
2.4.4.2	Circuito Eletrônico	55
2.4.4.3	Led Acrich SAW8KG0B.....	57
2.4.4.4	Ponte Retificadora MB6S.....	57
2.4.4.5	CI Acrich 2 - DT3001A.....	58
3	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	61
3.1	PROTÓTIPO.....	61
3.1.1	Experimento 1	65
3.1.2	Experimento 2	67
3.1.3	Experimento 3	69
3.1.4	Medições	71
3.1.5	Resultados	72
3.1.5.1	Variação de Temperatura.....	72
3.1.5.2	Temperatura Final.....	72
3.2	CÁLCULOS TÉRMICOS	74
3.2.1	Experimento 1	74
3.2.2	Experimento 2	75
3.2.3	Experimento 3	76
4	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

A consolidação dos conceitos de eficiência energética, juntamente com o avanço tecnológico, vem proporcionando uma grande mudança nas instalações elétricas nos últimos anos. A todo o momento pode-se observar novas tecnologias sendo lançadas no mercado, visando sempre um melhor aproveitamento da energia consumida. Esse fato tornou-se um grande fator de decisões em projetos elétricos, em todos os setores, sejam eles residenciais, comerciais ou industriais (GOEKING; MIRANDA; NEGRÃO, 2007).

Dentro da filosofia de eficiência energética, um setor que está em grande desenvolvimento é o da iluminação. Com o avanço da tecnologia LED, *Light Emitter Diode*, o consumo de energia das instalações elétricas tende a diminuir se comparado com a iluminação convencional. O investimento inicial ainda é maior que os sistemas de iluminação convencional. Entretanto, com a gradativa redução do preço dos sistemas LED, já se pode dizer que é possível considerar a viabilidade em muitos projetos. “Já é fácil constatar retorno de investimento em prazos inferiores há um ano”, destaca Fernando Stinchi, presidente da Biosfera, empresa especializada no segmento de iluminação (FREITAS, 2013).

Os equipamentos de iluminação que utilizam LEDs para a emissão de luz já deixaram de ser apenas uma tecnologia futura e passaram a ser uma tecnologia do presente. Além de sua eficiência, que vem crescendo a cada ano, esta tecnologia proporciona uma iluminação com menos radiações na frequência do infravermelho e, também, do ultravioleta (SANADA et al., 2013).

De acordo com Freitas (2013), atualmente, a utilização de LEDs na iluminação representa cerca de 15% do mercado mundial; enquanto no Brasil apenas 5% se considerar todas as lâmpadas e luminárias, nacionais ou importadas. Mas a projeção é que no ano de 2015 essa fatia passe a representar 50% do segmento e segundo expectativas internacionais, atinja cerca de 80% em 2020. Com esses dados vê-se a ascendência dessa nova tecnologia e sua provável dominação do mercado de iluminação.

O LED é um componente eletrônico semicondutor, formado através de uma junção p-n. Os semicondutores são materiais que ao receber deposição de elementos com determinadas cargas, tornam-se levemente carregados, positivamente ou negativamente. Nesta junção p-n tem-se dois tipos de materiais, um com lacunas (positivo) e outro com elétrons (negativo). Ao passar uma corrente elétrica por esse componente, com entrada pelo lado

negativo, força-se um fluxo de elétrons em direção às lacunas, e a recombinação elétron-lacuna provoca a liberação de fótons. A Figura 1 apresenta uma simplificação do fenômeno.

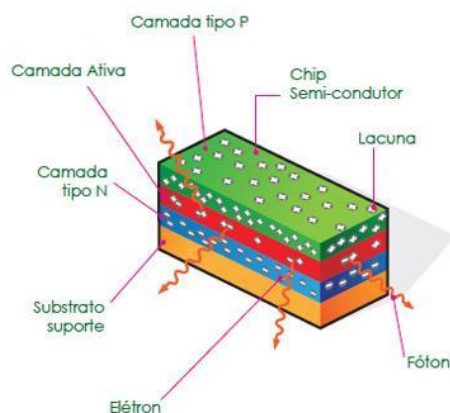


Figura 1 - Emissão de luz em um LED

Fonte: CONEXLED (2013)

Neste sentido, além da nova tecnologia apresentar uma ótima durabilidade ainda se mostra mais vantajosa quanto às questões ambientais, pois não contém materiais nocivos ao ser humano como o mercúrio, presente em lâmpadas de descarga. Mas o que se deve destacar como principal diferencial desta nova tecnologia é a eficiência (lm/W) e o rápido avanço tecnológico apresentado. A Figura 2 retrata bem essa realidade diante das lâmpadas convencionais e da projeção para os próximos anos (SANADA et al., 2013).

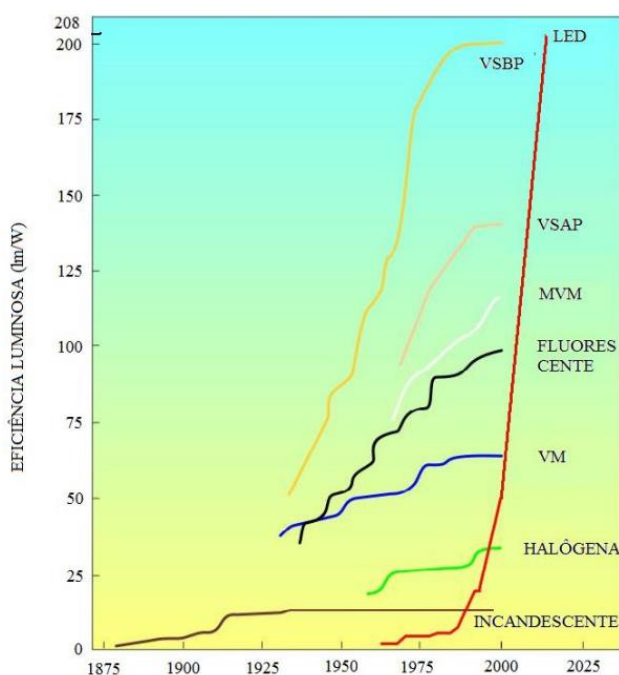


Figura 2 - Eficiência luminosa x Anos

Fonte: SANADA et al. (2013)

Um dos fatores para o LED conseguir uma maior eficiência de lm/W é descrita na dissertação de mestrado de Sales (2011):

A pequena dimensão do LED, e a emissão de luz em ângulo de abertura menor que 180° permite que seja maximizada a utilização do fluxo luminoso, direcionando exatamente para a área a ser iluminada. Como consequência, em relação às lâmpadas de descarga, necessita de menos lúmens para atingir a mesma iluminância. A Bluespan (2009) coloca que neste ponto o LED tem fator de utilização de 85 a 90% acima da lâmpada VSAP (SALES, 2011, p. 47).

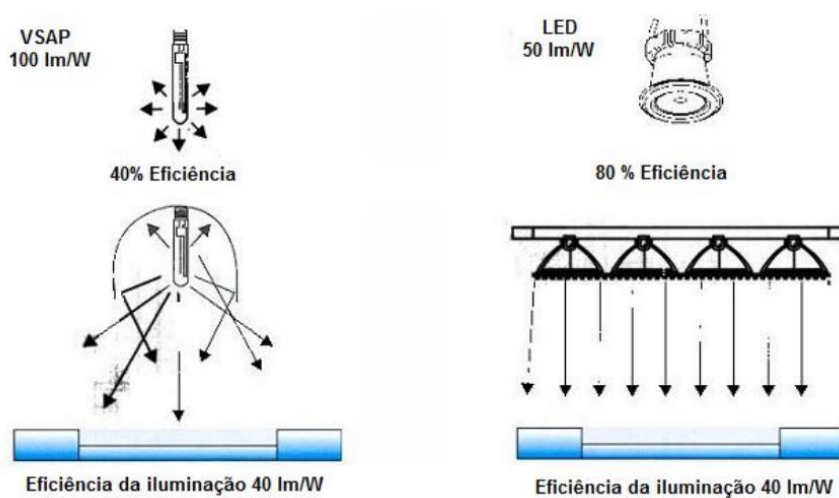


Figura 3 - Eficiência luminosa LED x VSAP

Fonte: Adaptado de SALES (2011)

Observa-se na Figura 3 uma comparação entre LED e lâmpadas a vapor de sódio de alta pressão, onde o LED apresenta um melhor aproveitamento do fluxo luminoso emitido.

1.1 TEMA

Com o progresso acelerado apresentado pelos fabricantes, sistemas a LEDs já conseguem substituir lâmpadas de 400 W ou superiores, modelos extremamente populares em ambientes industriais. Nesse nível de potência, uma luminária LED equivalente dissipa uma quantidade de calor muito elevada. Sem uma eficiente refrigeração, o sistema facilmente pode atingir uma temperatura maior que a nominal, o que causa a redução de sua vida útil (FREITAS, 2013).

Os sistemas tradicionais de refrigeração desenvolvidos pelos fabricantes utilizam os fenômenos físicos de irradiação, condução e principalmente o de convecção através de dissipadores. O projeto correto dos mesmos é um dos pontos necessários para se retirar o

máximo desempenho dos LEDs. Caso o projeto não ocorra de forma adequada, a depreciação do fluxo luminoso do componente acontecerá de forma mais acentuada, proporcionando uma redução em sua vida útil.

As Figuras 4 e 5 apresentam dois modelos diferentes considerando duas tendências no mercado para manter o conjunto em uma temperatura ideal. A luminária industrial para até 160 W comercializada pela Philips é montada sobre um dissipador, o LED é fixado na parte inferior do dissipador, assim o fluxo de calor entre a luminária e o ambiente se dá no sentido horizontal, enquanto a lâmpada da Philips utiliza a própria carcaça para a dissipação (FREITAS, 2013).



Figura 4 - Luminária AN-HL – 30 W a 160 W

Fonte: PHILIPS (2014)



Figura 5 - Lâmpada LED Philips

Fonte: PHILIPS (2014)

1.1.1 Delimitação do Tema

As luminárias industriais mais tradicionais no mercado possuem potências em torno de 250 W de lâmpadas de descarga de alta intensidade. Pode-se considerar como exemplo a Figura 6, que apresenta dois modelos de luminária encontradas no catálogo da Philips, as duas são para lâmpadas de vapor metálico de 250 ou 400 W.



Figura 6 - Luminárias industriais Philips

Fonte: PHILIPS (2014)

No contexto atual, para conseguir uma equivalência de luminosidade é necessária uma potência de aproximadamente 130 W em lâmpadas ou módulos LEDs. Em barracões industriais nota-se uma grande potência instalada para a iluminação do ambiente. Por exemplo: uma instalação com aproximadamente 1000 m², terá aproximadamente 30 luminárias com lâmpadas de 400 W, totalizando 12.000 W. Substituindo essas luminárias pela tecnologia LED tem-se aproximadamente 4.000 W, e essa redução refletiria diretamente no valor pago pelo consumo (R\$/kWh) mensal.

Para atingir essa equivalência, opta-se como objeto de estudo o módulo de 13 W da linha Acrich2 (Acrich SMJE-3V12W1P3) comercializado pelo fabricante Seoul Semiconductor. A escolha levou em consideração três principais fatores: a fácil aquisição desse modelo, uma vez que se pode comprá-lo nacionalmente; a confiabilidade do produto; a não necessidade de fazer adaptações para o propósito do trabalho (SEOUL SEMICONDUCTOR A, 2013).

A tecnologia Acrich2 diferencia-se por ser a primeira a ser conectada diretamente em 127 ou 220 V_{CA}, sem necessidade de um conversor CC. Isso possibilita a sua adequação em várias aplicações de iluminação residencial, comercial e industrial. Outros fabricantes fazem o uso de *drivers* para fornecer uma corrente contínua para os componentes. A Figura 7 mostra o módulo escolhido para o estudo (SEOUL SEMICONDUCTOR A, 2013).



Figura 7 - LED Acrich 2 – 13 W

Fonte: SEOUL SEMICONDUCTOR D (2014)

A luminária desenvolvida traz um conceito inovador, com um sistema de dissipação com o aproveitamento do calor gerado pelos módulos LEDs, possibilitando a transmissão de energia térmica para um fluxo de água corrente entre a tubulação do sistema, acarretando um aumento da temperatura em um determinado volume de água.

Para atingir este objetivo, foram imprescindíveis os conceitos de termodinâmica dos LEDs, e dos materiais que compõem o protótipo. A partir das características do módulo escolhido, foram calculadas as variáveis do circuito que o calor percorrerá até entrar em contato com a água. Um módulo LED com dissipador é mostrado na Figura 8 (SEOUL SEMICONDUCTOR D, 2014).

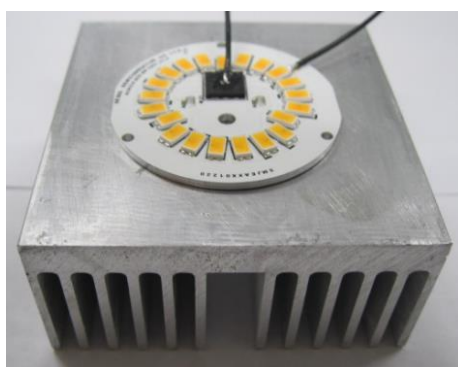


Figura 8 – Módulo LED com dissipador

Fonte: SEOUL SEMICONDUCTOR D (2014)

1.2 PROBLEMA

Há menos de uma década os LEDs eram chamados de luz do futuro. Já eram conhecidas as vantagens sobre as lâmpadas incandescentes e fluorescentes, principalmente em relação à eficiência energética. Segundo Goeking, Miranda e Negrão (2007), embora os LEDs ainda não tenham roubado a cena no setor residencial, inúmeras aplicações já são realidade principalmente no setor industrial.

De acordo com a Seoul Semiconductor A (2013), a detentora da patente dessa nova tecnologia de módulos LED já prontos para aplicação, de toda a energia consumida por um LED, apenas 15% é transformada em luz, os outros 85% é consumida em forma de calor, isso quer dizer que a maior parte da energia consumida não é utilizada, conforme a Figura 9.

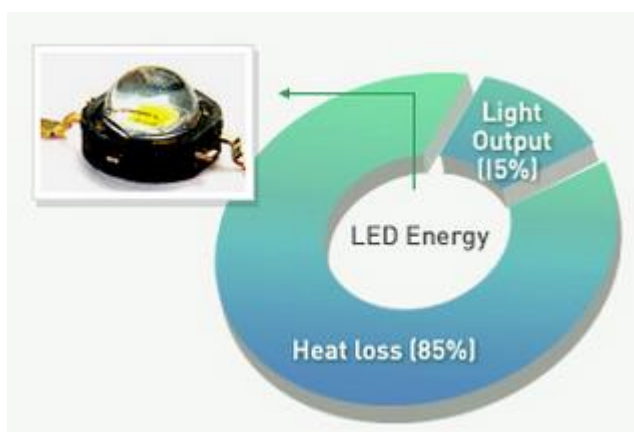


Figura 9 - Energia dissipada pelo LED

Fonte: SEOUL SEMICONDUCTOR A (2013)

Em uma luminária industrial com potência total de 130 W, o equivalente a energia não consumida em forma de luz é de 110,5 W. Levando em consideração que em instalações industriais é comum a utilização de uma grande quantidade de pontos de luz, a demanda de energia consumida sem utilização gera certos questionamentos: **Alguma parte pode ser reaproveitada? Como utilizar essa energia que está sendo "desperdiçada"? O calor gerado pelo LED pode ser reaproveitado para aquecer líquidos?**

1.3 JUSTIFICATIVA

O aumento da população e o avanço tecnológico são dois fatores que ocasionam um aumento do consumo de energia mundial no decorrer dos anos. Conseqüentemente, o ser humano busca suprir essa demanda utilizando recursos naturais, assim se percebe gradativamente o consumo do planeta, literalmente. Pensando na questão ambiental, grandes indústrias e comércios devem sempre buscar a maior eficiência energética possível em suas instalações e produtos.

Percebendo o desperdício no consumo de energia do LED, apenas 15% é convertido em luz, encontra-se a possibilidade de uma solução para a utilização desta energia. Levando em consideração os conceitos de eficiência energética, precisa-se buscar sempre, mesmo que se saiba ser inatingível, 100% de aproveitamento de qualquer processo. Esse projeto justifica-se pela sua capacidade de buscar um melhor aproveitamento do consumo de energia inevitável nas indústrias: a iluminação artificial.

Em relação ao mercado industrial consumidor, há uma fatia ainda não explorada nesse segmento, o que gera expectativas e possibilidades de inovação. Vale destacar que, na área tecnológica não existe nada parecido com o conjunto luminária LED refrigerada a água, evidenciando significativamente o potencial comercial desse projeto. Além disso, aproveitar o calor gerado pelo LED no aquecimento de água não trará nenhum impacto na conta de luz, apenas será utilizado o que já está sendo consumido de energia elétrica.

1.4 OBJETIVO

1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema térmico que permita o aproveitamento do calor gerado pela dissipação térmica de uma luminária industrial LED de alta potência.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudar possíveis soluções para o conjunto de dissipação;
- Fundamentar teoricamente o conjunto térmico de uma luminária LED;
- Escolher uma solução de engenharia para o sistema térmico;

- Equacionar a termodinâmica do sistema;
- Montar e testar o protótipo da solução escolhida;
- Sintetizar as informações obtidas nos testes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 LUMINOTÉCNICA

As lâmpadas fornecem energia luminosa com o auxílio das luminárias, que são seus suportes e são projetados procurando proporcionar um melhor rendimento luminoso, melhor proteção contra intempéries, ligação à rede e também um bom aspecto visual e estético (CREDER, 2002).

2.1.1 Lâmpadas de Descarga

2.1.1.1 Luz Mista

A iluminação mista possui uma eficiência maior que a iluminação incandescente, mas menor que a fluorescente, são adequadas para ambientes internos e externos e não necessitam de equipamentos auxiliares para o seu funcionamento. A lâmpada é composta por um tubo de descarga a vapor de mercúrio, conectado em série com um filamento de tungstênio, ambos encapsulados por um bulbo coberto internamente com uma camada de fosfato de ítrio vanadato. O filamento serve como uma fonte de luz e como limitador de corrente, dispensando assim o reator e possibilitando a instalação em luminárias próprias para incandescentes (CREDER, 2002).

2.1.1.2 Fluorescente

A Figura 10 mostra uma lâmpada fluorescente, indicadas para iluminação de interiores como escritórios, lojas, indústrias, tendo espectros luminosos indicados para cada aplicação. A lâmpada fluorescente utiliza descarga elétrica através de um gás para produzir energia luminosa, consiste em um bulbo cilíndrico de vidro, em suas extremidades existem eletrodos metálicos de tungstênio. O seu interior é preenchido com vapor de mercúrio ou argônio a baixa pressão, e as paredes internas do tubo são pintadas com materiais fluorescentes. Para seu funcionamento é indispensável dois equipamentos auxiliares: *starter* e reator, responsáveis pela limitação de corrente e a partida da lâmpada (INMETRO, 2014).

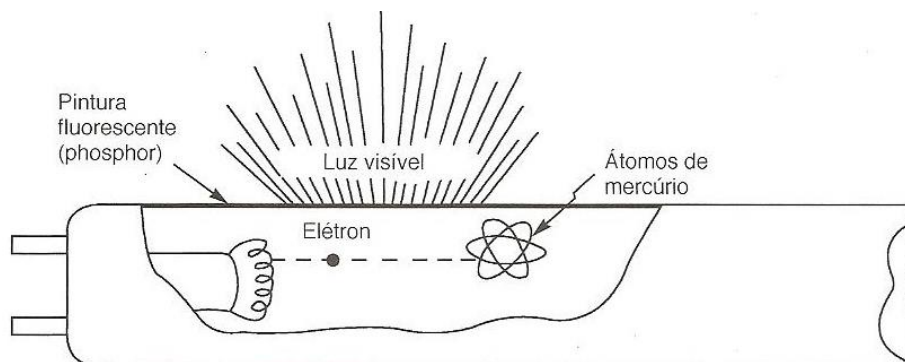


Figura 10 - Lâmpada fluorescente

Fonte: CREDER (2002)

2.1.1.3 Vapor de Mercúrio

Luminárias de vapor de mercúrio são empregadas em interiores de grandes dimensões, vias públicas e áreas externas. Também utiliza o princípio de descarga elétrica através de gases, semelhante à luz fluorescente. Conforme a Figura 11, ela é constituída de um bulbo de vidro, que serve somente para proteção contra choques térmicos, possui em seu interior um tubo de arco, onde se produzirá o efeito luminoso. Para seu funcionamento precisa de um reator para fornecer a tensão necessária na partida e limitar a corrente normal de operação, precisa também de um resistor de partida que já está presente no interior da lâmpada (CREDER, 2002).

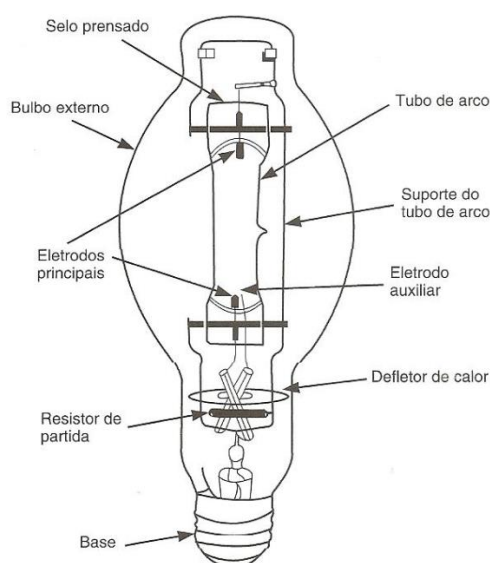


Figura 11 - Lâmpada de vapor de mercúrio, GE

Fonte: CREDER (2002)

2.1.1.4 Vapor de Sódio de Alta Pressão

Lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão são adequadas para aplicação em áreas internas e externas, operam com os mesmos princípios de todas as lâmpadas de descarga, sendo a radiação feita por iodeto de índio, tálio e sódio em adição ao mercúrio. Possuem alta eficiência, alto índice de reprodução de cor, baixa depreciação, vida longa e alta confiabilidade, peca no lado ambiental, pois possui metais controlados e deve ter um descarte adequado (INMETRO, 2014).

2.1.2 Grandezas e Fundamentos da Luminotécnica

Para ser possível fazer cálculos luminotécnicos, deve-se tomar conhecimento das grandezas fundamentais que são aqui apresentadas, baseadas nas definições da ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS A, 2014).

2.1.2.1 Luz

A luz para Creder (2002): "É o aspecto da energia radiante que um observador constata pela sensação visual, determinado pelo estímulo da retina ocular."

A faixa de radiações eletromagnéticas perceptíveis ao olho humano está entre os comprimentos de onda 3800 a 7600 angstroms. O angstrom (\AA) é o comprimento de onda unitário e igual a 10^{-10}m . O comprimento de onda λ é a distância entre duas cristas sucessivas de uma onda, isso pode ser observado na Figura 12.

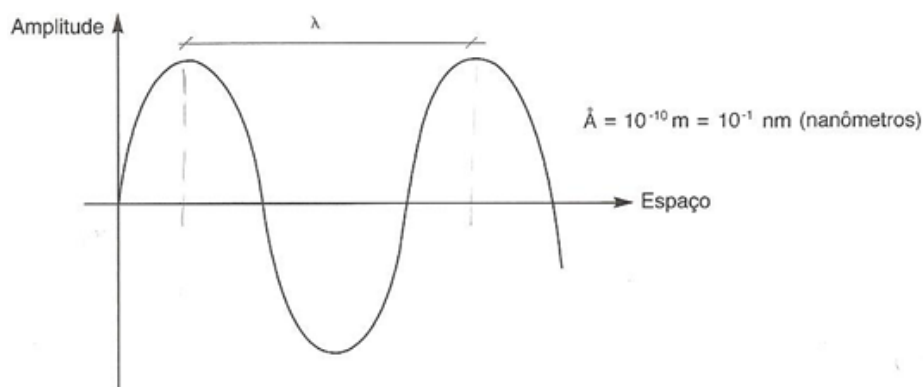


Figura 12 - Comprimento de onda

Fonte: CREDER (2002)

2.1.2.2 Cor

A cor da luz é determinada pelo comprimento de onda tal como na Figura 13. A cor violeta é a de menor comprimento de onda no espectro visível, encontra-se entre 3800 e 4500 Å, e a vermelha é a de maior, encontra-se entre 6400 e 7600 Å (CREDER, 2002).

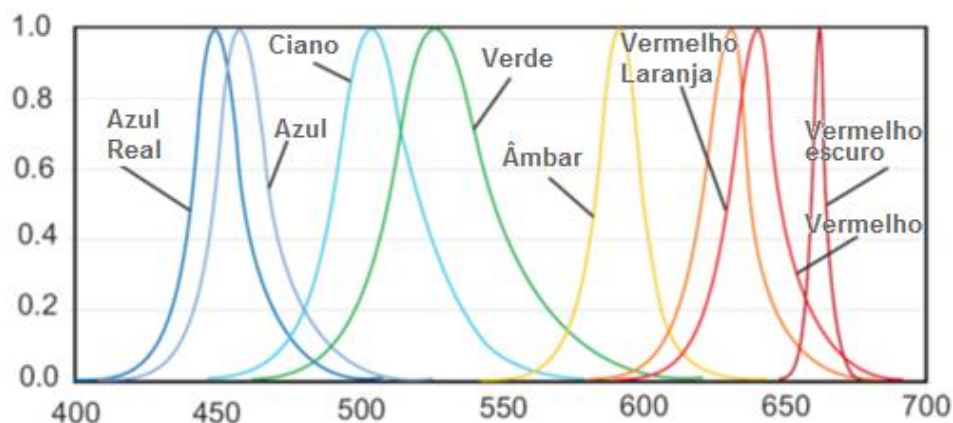


Figura 13 - Espectro da luz visível em função do comprimento de onda

Fonte: CREDER (2002)

2.1.2.3 Intensidade Luminosa - Candela (cd)

A definição de intensidade luminosa pela norma NBR-5461 da ABNT B (2014) é: "De uma fonte, numa dada direção, é a razão do fluxo luminoso $d\phi_v$ que sai da fonte e se propaga no elemento de ângulo sólido cujo eixo coincide com a direção considerada, para esse elemento de ângulo sólido: $I = \frac{d\phi_v}{d\Omega}$ ".

É o fluxo luminoso emitido numa dada direção e é medido em laboratórios através de equipamentos especiais (goniofotômetros) e sua unidade no SI é candela (cd).

2.1.2.4 Fluxo Luminoso - Lúmen (lm)

Segundo Costa (2006), fluxo luminoso é a quantidade total de luz emitida pela lâmpada funcionando com tensão nominal. É a energia, em forma de luz, emitida ou refletida, por segundo, em todas as direções conforme a Figura 14. É um conceito fundamental para a

escolha da lâmpada, pois influencia diretamente no resultado do cálculo luminotécnico. A unidade de medida é o lúmen (lm).



Figura 14 – Fluxo luminoso

Fonte: COSTA (2006)

2.1.2.5 Iluminância - lux (lx)

Iluminância ou nível de iluminação é a densidade de luz necessária para determinadas tarefas visuais ou fluxo luminoso incidente por uma unidade de área iluminada como mostrado na Figura 15. É um índice nacionalmente determinado pela NBR 5413, ABNT B (2014).

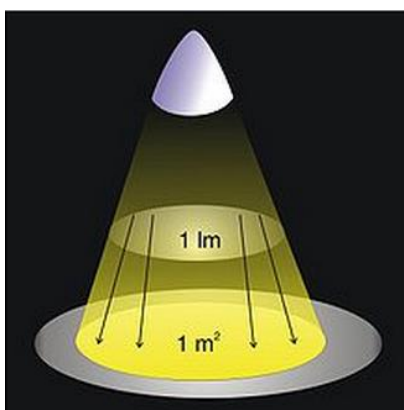


Figura 15 - Iluminância

Fonte: COSTA (2006)

2.1.2.6 Luminância - cd/m^2 ou *nit*

Luminância é a intensidade luminosa emitida ou refletida por uma superfície iluminada em direção ao olho humano, como é possível ver na Figura 16 ou ainda a

intensidade luminosa de uma fonte de luz produzida ou refletida por uma superfície iluminada. Sua unidade é o cd/m^2 (COSTA, 2006).

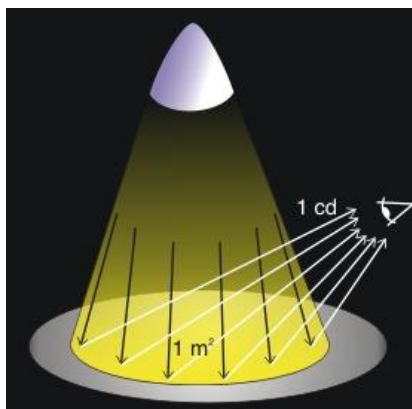


Figura 16 - Luminância

Fonte: COSTA (2006)

2.1.2.7 Eficiência Luminosa - lm/W

A eficiência luminosa ou rendimento luminoso de uma fonte mostra quantos lúmens ela pode fornecer a cada watt consumido, conforme Figura 17, é a razão entre o fluxo emitido por uma fonte de luz e a potência elétrica consumida no processo (CREDER, 2002).

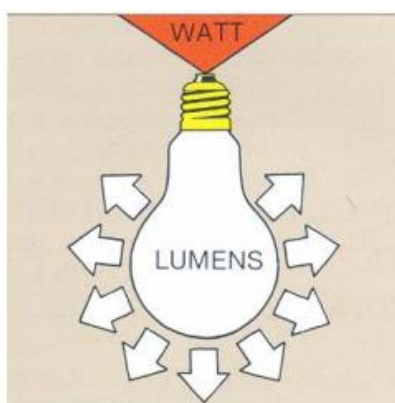


Figura 17 - Eficiência luminosa

Fonte: CREDER (2002)

2.1.2.8 Curva de Distribuição Luminosa

É a forma que os fabricantes utilizam para representar a distribuição da intensidade luminosa nas diferentes direções. É um diagrama polar em que a luminária é reduzida a um ponto no centro desse diagrama e as intensidades luminosas, em função do ângulo, são medidas e registradas. Como é mostrado na Figura 18, o diagrama é padronizado para 1000 lúmens, já que o fluxo depende de cada lâmpada (CREDER, 2002).

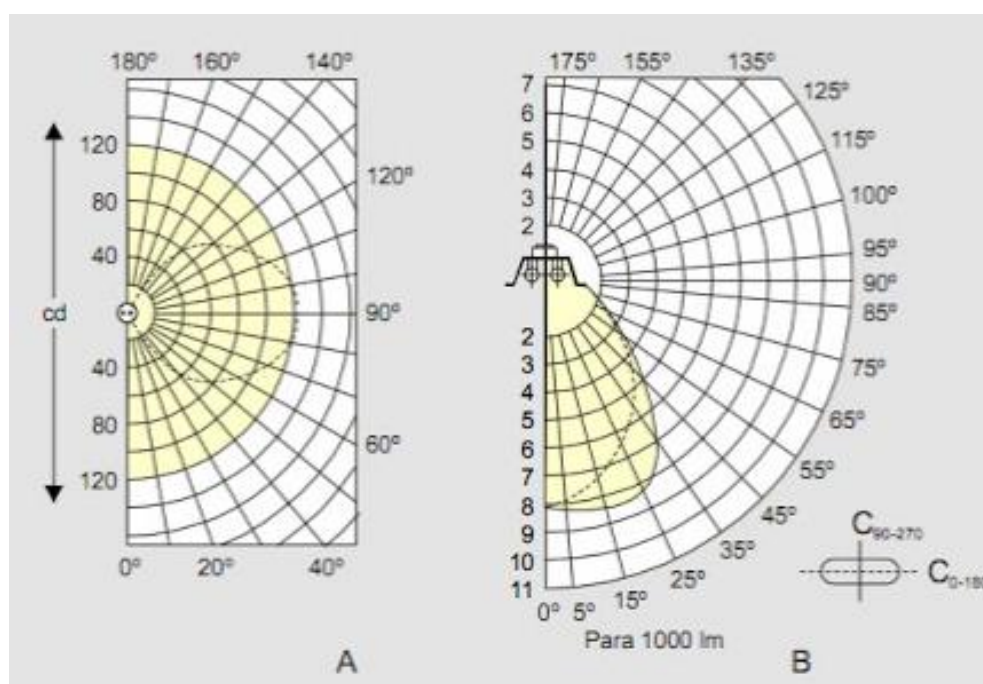


Figura 18 – Curva de distribuição luminosa de uma lâmpada isolada (A) ou associada a um refletor (B)

Fonte: COSTA (2006)

2.1.2.9 Depreciação do Fluxo Luminoso

É a depreciação do fluxo luminoso de uma lâmpada, durante a sua vida útil, em função do seu desgaste natural e do acúmulo de poeira sobre a sua superfície. Conceito importante para manutenção periódica do sistema de iluminação, evitando que o aproveitamento do conjunto, lâmpada e luminária, atinja níveis inferiores aos desejados (ITAIM, 2008).

2.1.2.10 Fator de Utilização

É um índice ligado diretamente ao rendimento da luminária e ao fator de reflexão do ambiente. É a razão entre o fluxo luminoso que atinge uma superfície e a soma dos fluxos luminosos das lâmpadas fora da luminária. É apresentado em forma de tabelas, fornecidas pelos fabricantes de luminárias (ITAIM, 2008).

2.1.2.11 Ofuscamento

O ofuscamento é o que traz o desconforto visual e redução de capacidade de ver objetos, proporcionado pelo excesso de luminância na direção da visão. Ocorre de forma direta ou indireta, ou seja, através do conjunto da luminária e lâmpada ou através da reflexão de determinadas superfícies do ambiente (COSTA, 2006).

2.1.2.12 Fator de manutenção

É a razão entre a iluminância média após dado um período de uso dividido pela iluminância média obtida sob as mesmas condições da instalação nova. Fator diretamente ligado ao intervalo de limpeza, quanto mais limpo o ambiente maiores valores esse índice pode atingir (INMETRO, 2014).

2.1.2.13 Índice de Reprodução de Cor

O índice de reprodução de cor é baseado em uma tentativa de mensurar a percepção da cor avaliada pelo cérebro. O IRC é o valor percentual médio relativo à sensação de reprodução de cor, baseado em uma série de cores padrões. Para indicar de forma consistente as propriedades de reprodução de cor de uma fonte de luz, idealizou-se um índice de reprodução de cores padrões, que são oito, sob diferentes iluminantes (DINO *et al*, 2010).

O método de avaliação consiste na avaliação das cores padrões, quando submetidas à luz da fonte a ser analisada e sob a luz de uma fonte de referência que deveria ser um corpo negro, radiador integral, que apresenta um valor de 100%. Costuma-se, então, relacionar com a lâmpada incandescente, pois esta tem um comportamento próximo ao do radiador integral.

Então, se uma fonte luminosa apresenta um índice de 60%, este está relacionado como radiador integral que é de 100%. Isto é verdade em parte (DINO *et al*, 2010).

Como a percepção varia segundo o indivíduo e suas experiências anteriores, nem sempre esta avaliação corresponde à realidade. Para facilitar o esclarecimento, é costume, a apresentação de uma tabela que informe comparativamente o índice de reprodução de cores, a temperatura de cor e a eficácia ou eficiência luminosa (DINO *et al*, 2010).

Um IRC em torno de 60% pode ser considerado razoável, 80% é bom e 90% é excelente. Essa classificação dependerá da exigência da aplicação que uma lâmpada deve atender. Um IRC de 60% mostra-se inadequado para uma iluminação de loja, porém, é mais que suficiente para a iluminação de vias públicas (DINO *et al*, 2010).

2.1.2.14 Temperatura de Cor

A classificação da cor pela temperatura começou quando o físico Inglês William Kelvin decidiu aquecer um bloco de carvão, onde o mesmo brilhava no calor, produzindo uma gama de diferentes cores a diferentes temperaturas. O cubo negro que a princípio produzia uma diminuta luz vermelha aumentava para um amarelo brilhante enquanto a temperatura subia e chegava a produzir até um brilho azul esbranquiçado nas temperaturas mais altas (AQUADEEN, 2014).

Na Figura 19 é representada a curva do corpo negro no diagrama de cromaticidade criado pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE). No diagrama constam todas as cores visíveis ao olho humano, distribuídas de acordo com o comprimento de onda. Já a curva do corpo negro é trajeto que a cor de um corpo negro percorre neste diagrama de espaço de cromaticidade ao sofrer as diversas mudanças de temperatura. As variações nessa curva são medidas em graus Kelvin, enquanto as variações perpendiculares são indicadas em Duv, que mede o grau de mudança da cor de acordo com a variação da temperatura (PHILIPS, 2014).

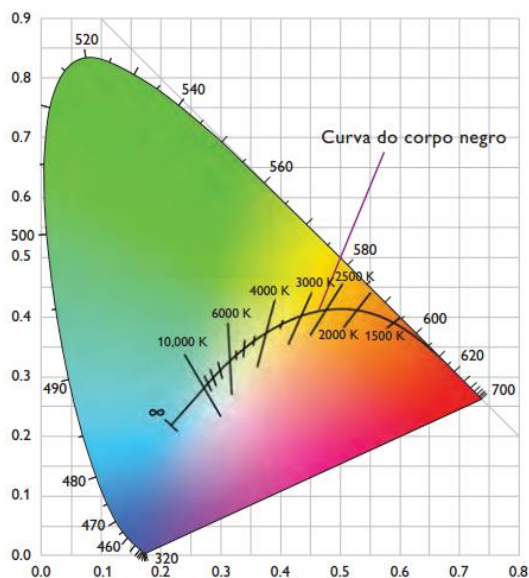


Figura 19 - Diagrama de cromaticidade

Fonte: PHILIPS (2014)

Para o olho humano, pequenas alterações na cromaticidade da luz podem não ser perceptíveis. Através de estudos práticos realizados por MacAdam em que um voluntário recebia duas cores, e deveria fazer a segunda ficar o mais próxima possível da primeira, todas as combinações feitas ficaram dentro de uma elipse no diagrama da cromaticidade da CIE. Esse limite foi definido como uma elipse de MacAdam, e cada uma representa o limite a partir do qual uma diferença de cor passa a ser perceptível. A Figura 20 ilustra essas elipses, pode-se notar que o tamanho e a orientação das elipses MacAdam variam de acordo com sua posição no diagrama de cromaticidade da CIE (PHILIPS, 2014).

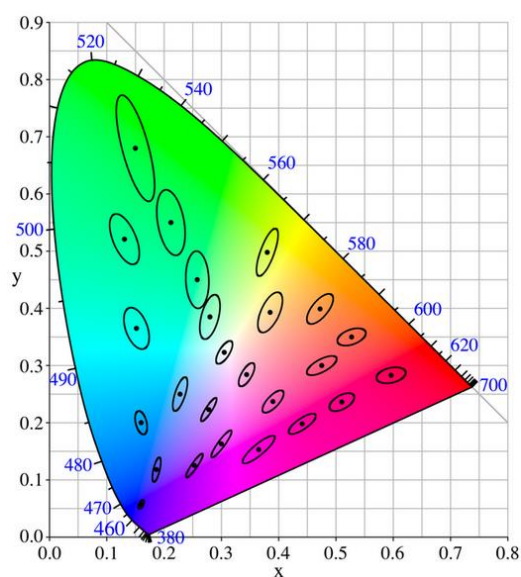


Figura 20 - Elipses de MacAdam

Fonte: PHILIPS (2014)

Como a temperatura de cor nominal não garante uma boa uniformidade entre diferentes luminárias de uma mesma produção, os fabricantes de luminárias LEDs criaram esquemas de classificação mais precisos com o objetivo de garantir que as diferenças de cor sejam imperceptíveis. Os fabricantes utilizam métodos para dividir os LEDs produzidos em quadriláteros menores que a norma ANSI determina. Para exemplificar, apresenta-se o diagrama na Figura 21 que contém um plano de classificação de LEDs de luz branca de 2700 K de um fabricante (AQUADEEN, 2014).

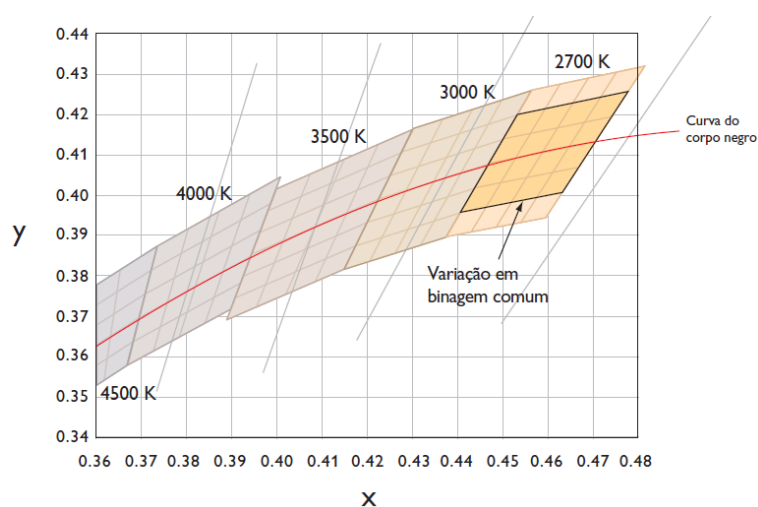


Figura 21 - Binagem de LEDs

Fonte: PHILIPS (2014)

As tolerâncias de matiz e Temperatura de Cor do Optibin (tecnologia de binagem patenteada pela Philips) para luminárias LEDs ficam dentro de uma elipse MacAdam de quatro estágios, em vez da elipse de sete estágios prevista na norma ANSI. Para assegurar que as variações de cor serão pouco perceptíveis, o Optibin prescreve o uso de LEDs de classificações com a maior proximidade possível da curva do corpo negro dentro de uma elipse de quatro estágios conforme Figura 22 (PHILIPS, 2014).

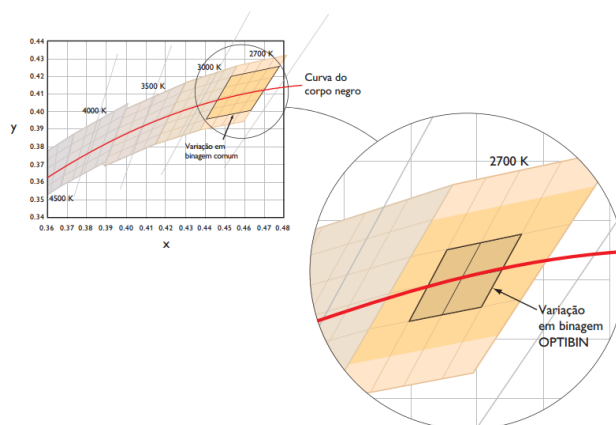


Figura 22 - Binagem Optibin

Fonte: Philips (2014)

2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Todas as atividades em uma sociedade moderna somente acontecem com o intenso uso de uma ou mais formas de energia. Entre todas as diferentes formas de energia, estão as que são processadas e disponibilizadas aos consumidores onde e quando necessárias, como a eletricidade, gasolina, álcool, óleo diesel, gás natural, etc. (INEE, 2014).

A energia é utilizada em diversos tipos de equipamentos, sejam eles simples, como lâmpadas, ou mais complexos, como um automóvel. Estes equipamentos, cada um de uma forma diferente, transformam a energia consumida e parte dela é perdida durante o processo. Esse fato é inerente aos processos de transformação de energia, não existe nenhuma transformação com absolutamente 100% de aproveitamento. Por exemplo: uma lâmpada tem o objetivo de iluminar, então sua eficiência é calculada pela razão entre a energia da luz emitida e a energia consumida, mas um percentual é dissipado de outra forma, geralmente em calor (INEE, 2014).

Outra parcela de desperdício é ocasionada pelo uso inadequado desses equipamentos. O melhor exemplo seria de um ambiente, como um escritório, com os sistemas de iluminação e ar condicionado ligados sem ninguém estar presente. Dessa forma os equipamentos não estão servindo aos seus propósitos (o de iluminação e condicionamento de temperatura) e apenas estão consumindo energia (INEE, 2014).

Os conceitos da eficiência energética e suas metodologias buscam melhorar o aproveitamento da energia, consumir menos para realizar o mesmo serviço. Trata-se de uma atividade técnico-econômica que objetiva:

- Proporcionar o melhor consumo de energia e água, com redução de custos operacionais correlatos;
- Minimizar contingenciamentos no suprimento desses insumos;
- Introduzir elementos e instrumentos necessários para o gerenciamento energético e hídrico da empresa ou empreendimento (ABESCO, 2014).

2.2.1 Gerenciamento Energético

No gerenciamento de qualquer negócio, um item que vem assumindo uma importância cada vez maior é o consumo de energia, motivado pela redução de custos em um mercado competitivo, restrições ambientais e incertezas na disponibilidade energética. Qualquer que seja a motivação, promover a eficiência energética é usar o conhecimento de forma aplicada, juntando conhecimentos de engenharia, economia e administração aos sistemas energéticos. Para obter um bom gerenciamento energético é necessário utilizar-se de algumas técnicas e métodos para definir objetivos e ações em busca de um melhor desempenho e reduzir perdas nos mais variados processos (SANTOS, 2007).

Além de tornar cada vez mais eficientes as instalações, sistemas e equipamentos, os responsáveis técnicos pela gestão de energia devem também avaliar de forma adequada o montante de energia ou demanda energética necessária ao atendimento de suas necessidades atuais e prever o montante futuro com base nas projeções da empresa. E, então, adquirir ou contratar essa disponibilidade energética tanto no Ambiente de Contratação Regulado (ACR) como consumidor cativo ou no Ambiente de Contratação Livre (ACL) como consumidor livre, ou ainda optar por própria geração (SANTOS, 2007).

Antes de começar qualquer tipo de projeto ou ação corretiva é necessário tomar conhecimento e diagnosticar a realidade energética, para depois implantar projetos de melhorias e redução de perdas. Isso é válido tanto para novas instalações, como uma ação preventiva, quanto para as já existentes, como uma ação corretiva.

A gestão energética de uma instalação existente aborda as seguintes medidas:

- 1) Conhecimento das informações relacionadas com os fluxos de energia, as ações que influenciam estes fluxos, os processos e atividades que utilizam a energia e relacionam com um produto ou serviço;
 - 2) Acompanhamento dos índices de controle como, por exemplo, consumo de energia, custos específicos, fator de utilização e os valores médios, contratados, faturados e registrados de energia;
 - 3) Atuação nos índices com vista a reduzir o consumo energético através da implementação de ações que buscam a utilização racional de energia.
- (Santos, 2007, p. 2)

Com uma visão simplificada, e que deve ser adaptada caso a caso é a sequência de atividades apresentada na Figura 23, que pode ser utilizada para desenvolver um diagnóstico energético (SANTOS, 2007).

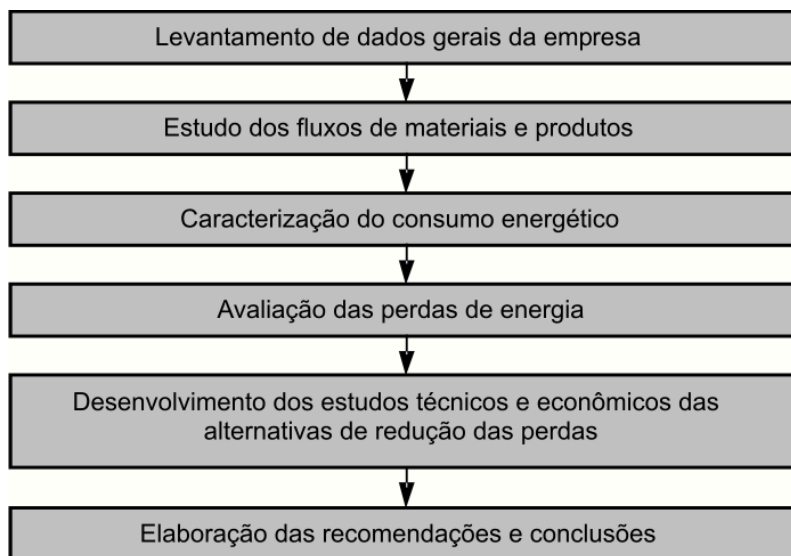


Figura 23 - Sequência para um diagnóstico energético

Fonte: SANTOS (2007)

Após obter o resultado dessas atividades é possível gerar um relatório consistente que servirá de base para projetos de melhoria de desempenho e o aumento da eficiência energética.

2.2.2 Histórico da Eficiência Energética

O uso de energia de forma eficiente, principalmente a elétrica, já está em pauta no mundo desde a crise do petróleo na década de 70, quando ficou evidente que as reservas fósseis não durariam para sempre e seu uso é prejudicial ao meio ambiente. Então se descobriu que os equipamentos de consumo final de energia (iluminação, aquecimento, equipamentos eletroeletrônicos, força motriz, etc.) poderiam operar com menos gastos de energia, trazendo repercussões econômicas, ambientais, sociais e culturais. Além da capacidade, os equipamentos passaram a ser analisados quanto a sua eficiência energética, e os hábitos de uso começaram a serem repensados. Verificou-se então que a adequação de hábitos e a aquisição de equipamentos mais eficientes eram "economicamente viáveis", ou seja, o custo da implantação era menor que o custo do consumo de energia que essa prática evitava (MME, 2007).

Estas medidas - uso de equipamentos e hábitos que fazem um menor uso de energia para proporcionar o mesmo serviço - receberam o nome de Medidas de Eficiência Energética (MEE). A grande variedade de medidas disponíveis e as diferentes oportunidades de implementação abriu um novo campo de atuação. Então se deu o surgimento de uma indústria chamada de Empresas de Serviços de Eficiência Energética (ESCO) a partir do início da década de 80. O serviço prestado por essas empresas se dá por meio de um "contrato de desempenho", e a remuneração vem por meio da economia proporcionada pela MEE proposta (MME, 2007).

Muito já se evoluiu na visão desse tipo de investimento e apesar dos benefícios que uma boa MEE pode proporcionar para quem a implante e para toda a sociedade, muitas barreiras ainda impedem a sua disseminação em certos países. Dificuldades como falta de informação, conscientização, treinamento, acesso a tecnologias e equipamentos eficientes, altos custos de implantação, falta de confiança nos resultados, etc. E para essas barreiras serem quebradas, é necessário que hajam políticas adequadas e o desenvolvimento de agentes promotores como as ESCO (MME, 2007).

2.2.3 Programas de Incentivo Brasileiros

De acordo com a primeira edição da Revista Eficiência Energética A (2013):

"A Lei nº 10.295/2001, conhecida como Lei da Eficiência Energética representa o marco regulatório da eficiência energética no país. Ela dispõe sobre a política nacional de conservação e uso racional da energia, visando à alocação eficiente dos recursos energéticos e a preservação do meio ambiente. Prevê ainda que cabe ao Poder Executivo estabelecer os níveis máximos de consumo específico de energia ou mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos fabricados ou comercializados no país, com base em indicadores técnicos pertinentes, que considerem a vida útil dos equipamentos."

Após pesquisas realizadas pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2007 o Ministério de Minas e Energia (MME) lançou o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE), onde estão inseridas as políticas públicas de eficiência energética. Neste plano são analisados e também são apresentadas varias sugestões para diversas questões do setor, com uma previsão de que o país reduza em 10% o consumo de energia até o ano de 2030 (Revista Eficiência Energética A, 2013).

2.2.3.1 Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE)

Mantido pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), publica a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia, que classifica os produtos em faixas coloridas que variam da mais eficiente (A) a menos eficiente (de C até G), dependendo do produto (Revista Eficiência Energética A, 2013).

2.2.3.2 Programa Nacional de Conservação da Energia Elétrica (Procel)

Divulgado pela Eletrobrás, possui o selo nacionalmente conhecido, afixado em eletrodomésticos novos. Indica os produtos que apresentam os melhores níveis de eficiência energética dentro de cada categoria. Para receber o Selo Procel, o produto deve ser submetido a ensaios específicos em laboratório idôneo. Os recursos utilizados são da Eletrobrás e da Reserva Global de Reversão (RGR), fundo federal constituído com recursos dos consumidores. Desde 1986, quando foi criado, o programa investiu mais de R\$ 1,2 bilhão em ações de eficiência energética. Em 2012, essas ações possibilitaram uma economia de energia da ordem de 9,1 terawatts-hora (TWh), o que equivale ao consumo de 4,8 milhões de residências. De 1986 a 2012, essa economia chegou a 60,3 TWh (Revista Eficiência Energética B, 2013).

2.2.3.3 Programa de Eficiência Energética (PEE)

Regulado e fiscalizado pelo programa ANEEL, representa a principal fonte de recursos para eficiência energética no Brasil. Tais valores são uma exigência da Lei nº 9.991/2000, que estabeleceu que as distribuidoras de energia elétrica devessem aplicar 0,5% da sua Receita Operacional Líquida (ROL) em ações de promoção da redução do consumo e de combate ao desperdício de energia. Além disso, desde 1998, os contratos de concessão firmados por essas empresas com a ANEEL estabeleceram que elas aplicassem anualmente um percentual mínimo de sua ROL em ações dessa natureza. Graças a essa determinação, o PEE soma mais de R\$ 4,6 bilhões em investimentos, contemplando setores como iluminação pública, residencial, comercial, prédios públicos e industriais, além de projetos voltados à gestão energética municipal e ações educacionais. A economia de energia obtida ultrapassa

8,5 terawatts-hora (TWh) por ano e a retirada de demanda na ponta foi da ordem de 2,5 GW (Revista Eficiência Energética B, 2013).

Infelizmente o PEE acabou perdendo o foco de eficiência energética e adquiriu um teor de programa social. Isso ocorreu devido a interferências políticas que através da lei nº 12.212/2010, que estipulou a destinação de 60% dos valores do PEE para projetos que beneficiem consumidores inscritos na Tarifa Social de Energia Elétrica. Então o programa se tornou sinônimo de troca ou entrega de eletrodomésticos novos em comunidades de baixa renda (Revista Eficiência Energética B, 2013).

Essa destinação de recursos acabou sendo prejudicial ao programa, considerando que de acordo com especialistas na área, esse grupo da população é responsável apenas por 4% do consumo de energia no país, enquanto a indústria responde por mais de 40%. Observando esses dados é fácil perceber como o programa está defasado do seu objetivo inicial. José Starosta, presidente da Abesco diz: "Os recursos devem servir para fomentar grandes projetos, inclusive voltados para a indústria, onde há um grande desperdício de energia". Máximo Luiz Pompermayer, superintendente de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética da ANEEL, explica que a ação de priorizar os consumidores de baixa renda foi uma iniciativa na ANEEL e ele mesmo pontua a medida como "incoerente" (Revista Eficiência Energética B, 2013).

Em outros países os programas de eficiência energética não fazem doação de equipamentos. São feitas ações de incentivo a aquisição de equipamentos mais eficientes e o governo entra apenas com subsídios para os equipamentos se tornarem mais baratos. Deve-se investir mais em projetos de fontes de energias renováveis como a solar, eólica e biomassa, proporcionando maiores ganhos em eficiência energética e conscientização da população (Revista Eficiência Energética A, 2013).

2.2.4 Eficiência Energética na Iluminação

A eficiência luminosa é a relação entre o fluxo luminoso emitido por uma lâmpada ou luminária e a energia consumida. Este valor serve para comparar determinados tipos de sistemas de iluminação e verificar qual é o mais eficiente (SHIGA *et al*, 2008).

$$\text{Eficiência} \left[\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right] = \frac{\text{fluxo luminoso}}{\text{potência nominal}} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde o fluxo luminoso é fornecido pelo fabricante e a potência nominal é a potência nominal do circuito.

2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A partir do estudo da termodinâmica de trabalho, energia e calor, sabe-se que a energia pode ser transferida através de interação de um sistema com a sua vizinhança. Com o estudo da transferência de calor é possível entender o comportamento de todo o processo de interação entre corpos (INCROPERA, 2008).

Segundo Incropera (2008), transferência de calor é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço. Existem mecanismos físicos que fundamentam os modos de transferência de calor, entre eles estão condução, convecção e radiação térmica.

2.3.1 Conservação da energia

Segundo a primeira lei da termodinâmica, a energia total de um sistema é conservada, isso quer dizer que a quantidade de energia de um sistema só pode mudar se a energia cruzar a fronteira. E isso pode acontecer de duas formas: transferência de calor e trabalho realizado pelo sistema. Para um sistema fechado tem-se a seguinte expressão (ARAUJO, 1982):

$$\Delta E = Q - W \quad \text{Eq. 2}$$

Onde E é a energia total do sistema, Q é o valor de calor transferido para o sistema e W é o valor do trabalho efetuado pelo sistema (INCROPERA, 2008).

Segundo Araujo (1982), com a variação do tempo, o aumento da energia acumulada em um volume de controle deve ser igual à quantidade de energia que entra no volume (E_{ent}) menos a quantidade de energia que deixa o volume (E_{sai}) de controle mais a energia que é gerada no interior do volume (E_g).

$$\Delta E = E_{ent} - E_{sai} + E_g \quad \text{Eq. 3}$$

Tem-se ainda a equação da energia térmica para sistemas em regime estacionários:

$$q = \dot{m}c(T_{sai} - T_{ent}) \quad \text{Eq. 4}$$

2.3.2 Condutividade Térmica

A condutividade térmica κ quantifica a facilidade com que os materiais conduzem calor. Materiais com alta condutividade térmica conduzem calor de forma mais rápida que os materiais com baixa condutividade térmica. Desta maneira, materiais com alta condutividade térmica são utilizados como dissipadores de calor e materiais de baixa condutividade térmica são utilizados como isolamentos térmicos. Esta propriedade, que depende da variação de temperatura do sistema, pode ser estudada a partir da equação de transporte de Boltzmann. (INCROPERA, 2008)

$$k = \frac{\Delta Q.L}{A.\Delta t.\Delta T} \quad \text{Eq. 5}$$

A condutividade térmica é uma característica específica de cada material e depende fortemente da temperatura e da pureza do material (especialmente sob baixas temperaturas). Em geral, os materiais tornam-se mais condutores de calor com o aumento da temperatura. A condutividade térmica equivale à quantidade de calor Q transmitida através de uma espessura L , numa direção normal a superfície de área A , devido a uma variação de temperatura ΔT quando a transferência de calor se deve apenas a variação de temperatura (ARAUJO, 1982).

Tabela 1 - Condutividade térmica por material

Material	Condutividade térmica (a 27°) em K
Prata	426
Cobre	398
Alumínio	237
Tungstênio	178
Ferro	80,3
Fita termo condutora	73
Vidro	0,72
Água	0,61
Ar	0,026
Isopor	0,025

Fonte: INCROPERA (2008)

2.3.3 Transferência de Calor

Existem três modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. (INCROPERA, 2008).

2.3.3.1 Condução

De acordo com Araujo (1982) a condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região de temperatura mais alta para outra de temperatura mais baixa, dentro de um meio sólido, líquido ou gasoso ou entre meios diferentes em contato físico direto. Essa explicação abrange tanto a apresentação da Segunda Lei da Termodinâmica, quando se diz que a transmissão de calor parte de uma região de temperatura mais alta para outra de temperatura mais baixa, quanto à definição específica do processo de transmissão de calor por condução.

Portanto, a transmissão de calor por Condução ocorre quando corpos em diferentes temperaturas estão literalmente encostados um no outro. A energia do corpo de temperatura mais alta agita as moléculas do corpo de temperatura mais baixa, fazendo com que a energia cinética média das moléculas deste último se eleve, aumentando, assim, sua energia interna. Consequentemente, a temperatura do corpo que está recebendo a energia em forma de calor se eleva até o estado de equilíbrio (INCROPERA, 2008).

Para ilustrar este fenômeno, imagina-se um bule com água fervendo ao fogão. O fogo aquece o bule, o qual, por condução, aquece a parcela de líquido que está em contato direto com o mesmo. Esta transmissão de calor por condução é a única maneira de que o calor pode ser transmitido entre corpos sólidos opacos. Já em meios líquidos, a condução também apresenta grande importância, embora esteja, quase sempre, relacionada com outros meios de transmissão de calor (ARAUJO, 1982).

Segundo Incropera (2008), a quantidade de calor transmitida por condução segue a seguinte lei:

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Eq. 6}$$

Na formulação acima, k representa a condutividade térmica do material, A representa a área da seção através da qual o calor flui por condução (medida perpendicularmente à direção do fluxo) e dT/dx representa o gradiente de temperatura na seção. Nesta formulação, toma-se como convenção a direção de aumento na coordenada x como fluxo positivo de calor. Sabendo-se que, pela segunda lei da termodinâmica, o calor flui da região de maior temperatura para a região de menor temperatura, deve-se adotar o sinal negativo para o produto acima, conforme mostra a Equação 6 (INCROPERA, 2008).

Como se pode observar pelo balanço de unidades da fórmula acima, q_k é medido em quantidade de calor por unidade de tempo. Usualmente, esta grandeza é expressa em

quilocalorias por hora, ou kcal/h (ARAUJO, 1982). O valor da condutividade térmica varia de aproximadamente $0,06 \frac{W}{m \cdot K}$ para os gases, até $398 \frac{W}{m \cdot K}$ para o cobre.

Aplicando a fórmula acima a uma parede plana, em regime permanente, pode-se facilmente chegar ao seguinte resultado:

$$q_k = Ak \frac{\Delta T}{L} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde L é a espessura da parede.

Segundo Incropera (2008), dividindo os dois termos pelo fator $A \cdot k$, teremos que a quantidade de calor transmitida por unidade de tempo será igual à diferença de temperatura entre os dois lados da parede, sobre o fator $\frac{L}{A \cdot k}$. A este último fator, dá-se o nome de Resistência Térmica à Condução. Portanto, define-se Resistência Térmica à Condução como segue:

$$R = \frac{L}{A \cdot k} \quad \text{Eq. 8}$$

Portanto, a quantidade de calor por unidade de tempo transmitida em regime permanente por uma parede plana pode ser escrita simplesmente como:

$$q_k = \frac{\Delta T}{Rk} \quad \text{Eq. 9}$$

A expressão geral para calcular a temperatura T, após um tempo t, em uma parede plana de espessura d, área A, resistência térmica R, partindo da temperatura ambiente, com massa específica ρ e temperatura final T_f , pode ser observada na determinação que segue:

$$q_1 - q_2 = dq_3 \quad \text{Eq. 10}$$

$$\frac{T_f - T}{R} - \frac{T}{R} = \rho A d c \frac{dT}{dt} \quad \text{Eq. 11}$$

$$\frac{T_f - 2T}{R} = \rho A d c \frac{dT}{dt} \quad \text{Eq. 12}$$

$$\frac{dT}{T_f - 2T} = \frac{dt}{R \rho A d c} \quad \text{Eq. 13}$$

$$\int_0^T -\frac{2dT}{T_f - 2T} = -\frac{2}{R \rho A d c} \int_0^t dt \quad \text{Eq. 14}$$

$$T_f - 2T = e^{-\frac{2t}{R \rho A d c}} \quad \text{Eq. 15}$$

A equação para determinar a temperatura segue:

$$T = \frac{1}{2} (T_f - e^{-\frac{2t}{R \rho A d c}}) \quad \text{Eq. 16}$$

2.3.3.2 Radiação

De acordo com Barrosa (2014) a radiação é um processo pelo qual o calor é transmitido de um corpo a alta temperatura para um de mais baixa quando tais corpos estão separados no espaço, ainda que exista vácuo entre eles.

Por esta definição, vê-se que não há necessidade de um contato físico entre os corpos para que a energia (na forma de calor) seja transmitida entre eles. Ao calor transmitido desta forma dá-se o nome de calor radiante. Esta forma de energia se assemelha fenomenologicamente à radiação da luz, diferindo-se apenas nos comprimentos de onda. A transmissão do calor radiante ocorre na forma de quanta (porções discretamente definidas) de energia (INCROPERA, 2008).

$$q_k = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad \text{Eq. 17}$$

Na Equação 17, σ é chamada de constante de Stefan-Boltzmann, tendo o valor experimental de $\sigma = 4,88 \times 10^{-8} \frac{\text{kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$. A é a área total da superfície em metros quadrados, e T é a temperatura absoluta do corpo (na área), medida em Kelvin (INCROPERA, 2008).

Por esta formulação, nota-se que a quantidade de calor emitida por um corpo negro independe das condições dos arredores do corpo. Porém, para nossos casos práticos, é interessante conhecer a troca de calor entre dois corpos. Portanto, a energia que um corpo negro emite para outro corpo negro que o envolve completamente pode ser dada pela formulação abaixo (ARAUJO, 1982).

$$q_k = \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{Eq. 18}$$

Na fórmula acima, o termo T_2 representa a temperatura do corpo que está posicionado externamente, ou seja, que envolve, enquanto o termo T_1 representa a temperatura do corpo que está posicionado internamente, ou seja, que é envolvido. Obviamente, em casos práticos, não se utilizam muitos corpos com características de corpos negros. Portanto, para estes casos, adiciona-se um termo multiplicador que modifica a Equação 18. Este termo leva em conta as emissividades (frações de emissão de irradiação do corpo em relação aos corpos negros) e as geometrias dos corpos reais, sendo usualmente representado pelo símbolo F_{1-2} . Portanto, para casos reais, a Equação 17 é escrita como segue:

$$q = F_{1-2} \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{Eq. 19}$$

Na maior parte das aplicações práticas, o calor transmitido por irradiação está em conjunto com outras formas de transmissão de calor. Portanto, usa-se a definição de

Condutância e Resistência térmica para irradiação, K_r e R_r , respectivamente (ARAÚJO, 1982).

$$K = \frac{F-2 \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{(T_1 - \frac{dT_2}{dt})} \quad \text{Eq. 20}$$

As unidades comuns de condutância térmica são $\frac{\text{Kcal}}{\text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$. A resistência térmica é simplesmente o inverso da condutância, $R_r = \frac{1}{K_r}$. Portanto, a Equação 21 é usada na maioria dos casos práticos (ARAÚJO, 1982).

$$q = \frac{(T_1 - \frac{dT_2}{dt})}{R_r} \quad \text{Eq. 21}$$

Onde T_2 é qualquer temperatura de referência.

Outra definição importante na irradiação é o coeficiente médio de transmissão de calor, dado por:

$$h = \frac{K_r}{A} \quad \text{Eq. 22}$$

As unidades de coeficiente médio de transmissão de calor mais comuns são $\frac{\text{kcal}}{\text{h} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2}$ (BARROSA, 2014).

2.3.3.3 Convecção

De acordo com Kreith e Bohn (1977) a convecção é o processo de transporte de energia pela ação combinada da condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura. A convecção é importante principalmente como mecanismo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um líquido ou gás.

Em um fluido, onde a mobilidade das partículas é grande, as partículas aquecidas pelo contato direto com a superfície sólida tendem a migrar para locais onde as temperaturas são mais baixas. Esta movimentação de partículas acarreta uma transferência de energia de uma posição para a outra, caracterizando a transmissão de calor por convecção (INCROPERA, 2008).

Para exemplificar, toma-se novamente o exemplo do bule com água adotado para a condução. Inicialmente, o calor do bule (superfície sólida) é transmitido para as moléculas de água que estão em contato direto com o mesmo, por condução. Após estas moléculas possuírem certa quantidade de energia (calor), elas migrarão para outras posições do fluido onde a temperatura é menor, transmitindo o calor para outras partículas. Isto pode ser

visivelmente constatado ao se observar este fenômeno. À medida que o líquido vai se esquentando, este começa a se movimentar cada vez mais rápido, transmitido o calor para as demais partículas (INCROPERA, 2008).

Neste caso, como o líquido se movimenta livremente devido à diferença de temperatura, diz-se que se trata de convecção livre. Em casos onde a mistura é causada por algum agente externo, como bombas ou ventiladores, por exemplo, diz-se que se trata de convecção forçada (ARAUJO, 1982).

O calor, por unidade de tempo, transmitido de uma superfície sólida para um fluido, por convecção, pode ser calculado da seguinte forma:

$$q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 23}$$

Na Equação 23, h representa o coeficiente médio de transmissão de calor por convecção, o qual depende da geometria da superfície, da velocidade do fluido e das propriedades físicas do fluido, incluindo sua temperatura. Em geral, h é medido em $\frac{\text{Kcal}}{\text{h}^\circ\text{Cm}^2}$. A grandeza A representa a área de transmissão de Calor, em m^2 , e ΔT é a diferença de temperaturas entre a da superfície T_s e a do fluido em um local especificado T_∞ (INCROPERA, 2008).

A condutância térmica por convecção é definida na Equação 24:

$$K = h \cdot A \quad \text{Eq. 24}$$

Reciprocamente, a Resistência térmica por convecção é dada como $R_c = \frac{1}{K_c}$.

Portanto, a fórmula quantidade de calor transmitida por convecção por unidade de tempo pode ser escrita como segue:

$$q = \frac{\Delta T}{R_c} \quad \text{Eq. 25}$$

Em geral, nas aplicações reais, os processos de transmissão de calor são dados não por um dos fenômenos acima, mas, como o simples exemplo do bule indica, por uma combinação destes fenômenos. Assim, a quantidade de calor total transmitida em um processo real deve ser escrita da seguinte forma:

$$q = \frac{\Delta T}{(R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n)} \quad \text{Eq. 26}$$

O termo $(1/R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n)$ é usualmente substituído pelo chamado coeficiente global de transmissão de calor, U . Este coeficiente é calculado por unidade de área, portanto, para se expressar a quantidade de calor transmitida, deve-se tomar a seguinte formulação:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 27}$$

O coeficiente U pode ser baseado em qualquer área escolhida.

Por último, para se determinar o coeficiente combinado de transmissão de calor, h, deve-se tomar a seguinte relação (BARROSA, 2014):

$$h = h_c + h_r \quad \text{Eq. 28}$$

Para fluidos escoando no interior de tubulação usa-se a equação:

$$h = 0,023 \cdot \frac{K}{D} \cdot \left(\frac{Vd\rho}{\mu}\right)^{0,8} \cdot \left(\frac{\mu C_p}{K}\right)^n \quad \text{Eq. 29}$$

Sendo que n=0,4 se o fluido estiver se aquecendo e n=0,3 se ele estiver se resfriando. E onde ρ é a massa específica do fluido, μ é a viscosidade absoluta, C_p é o calor específico e V é a velocidade do fluido.

Existe também uma fórmula simplificada para encontrar o coeficiente de filme para água em tubos, mas só pode ser usado se a temperatura da água não passar de 82°C, para ter total segurança que não haverá vaporização da mesma. Sendo que T é a temperatura inicial da água

$$h = 0,00134 \cdot (T + 37,7) \cdot \frac{V^{0,8}}{D^{0,2}} \quad \text{Eq. 30}$$

No entanto, antes de aplicar qualquer fórmula, deve-se analisar se a convecção é forçada ou livre, e para isso é necessário encontrar o número de Reynolds, e se este for menor que 2300 a convecção não é turbulenta.

$$N_{Re} = \frac{VD\rho}{\mu} \quad \text{Eq. 31}$$

Caso não seja uma convecção forçada é possível usar a regra da calorimetria como a Equação 4.

2.3.4 Dissipador de Calor

Um importante aspecto no funcionamento de componentes de semicondutores é a influência da temperatura sobre os mesmos, deve-se observar com cuidado as especificações dos fabricantes em relação à temperatura de trabalho. A vida útil de um componente semicondutor, em média, pode ser duplicada com a simples redução à metade da temperatura de operação. Assim, por exemplo, se um diodo emissor de luz possui uma temperatura máxima permissível para a junção de 100°C, poderá ter sua vida útil atenuada caso trabalhe muito próximo a essa condição. Caso se utilize um dissipador que permita transmitir de forma

adequada esse calor para o ambiente, pode-se fazer com que o diodo dissipe maior potência e tenha uma temperatura de junção mais baixa que a máxima permissível (MELLO, 1980).

A Figura 24 ilustra como o uso de um dissipador afeta a temperatura na junção de um componente de semicondutor. Por exemplo, se a temperatura máxima permissível para a junção do componente em questão fosse de 90°C, ele não poderia dissipar nem 1 W sem o uso de um dissipador, mas com o uso do mesmo poderia, por exemplo, permitir que o mesmo dissipasse 2 W com uma temperatura de junção de apenas 75°C (MELLO, 1980).

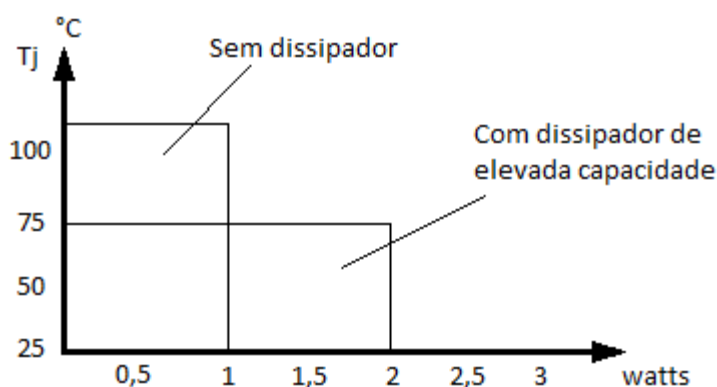


Figura 24 – Exemplo didático da temperatura de junção em um semicondutor

Fonte: MELLO (1980)

Portanto, projetistas de equipamentos ou componentes com semicondutores devem conhecer a técnica do uso de dissipadores, pois com a utilização dos mesmos, é possível obter uma vida útil maior e aumentar a confiabilidade do produto. É importante considerar que uma boa técnica a se adotar é a previsão da necessidade do uso de dissipadores de calor e assim projetar a parte estrutural com dimensões adequadas (MELLO, 1980).

2.3.4.1 Material

Os materiais mais usados são o alumínio e o cobre, e é possível usar o alumínio em duas versões: o anodizado brilhante e o anodizado enegrecido. O enegrecido precisa de uma área menor para manter a mesma descarga térmica, considerando as leis do corpo negro. Em aplicações específicas, pode-se utilizar o magnésio, que tem uma excelente condutibilidade térmica, mas tem um custo muito elevado (MELLO, 1980).

Uma técnica utilizada é construir a estrutura do equipamento de alumínio ou outro material com boa condutibilidade térmica, e utiliza-la como dissipador. Deve-se analisar

cuidadosamente se as condições são favoráveis a esse modelo e se a superfície definida para dissipar o calor não será aquecida por outros componentes. Esse método é muito utilizado em luminárias e lâmpadas LED, conseguindo assim uma montagem mais compacta (MELLO, 1980).

2.3.4.2 Geometria

A capacidade de um dissipador de calor é uma função de diversos parâmetros, tais como o material empregado, a área-exposta, o acabamento das suas superfícies os níveis de temperatura do dissipador e do ar ambiente. Entretanto, os fatores predominantes são a forma geométrica e área efetiva de superfície. Além disso, há um fator muito importante a considerar que é o de penetração do ar nas irregularidades microscópicas da superfície do dissipador, originando uma película sobre o dissipador. Esta camada (filme ou camada limite) forma uma cobertura que dificulta a transmissão de calor, uma vez que o ar tem baixa condutibilidade térmica (MELLO, 1980).

O objetivo, no projeto de um dissipador de calor, é destruir esta camada limite e consequentemente aumentar a capacidade de dissipação para o meio ambiente. O efeito desta camada limite é traduzido pelo coeficiente de filme (h), e este coeficiente de filme é função da viscosidade, da condutibilidade térmica, da temperatura e da velocidade do fluido, fatores estes que são normalmente fixados pela aplicação em questão (MELLO, 1980).

A solução para tal problema é destruir mecanicamente a camada limite pela escolha de um formato adequado para a superfície do dissipador, o que fará com que a energia cinética das moléculas do fluido destrua a camada com uma perda mínima da energia do fluido. Por exemplo, um dissipador realizado na forma de uma placa plana de alumínio exige uma elevada velocidade do fluido para destruir a camada limite, o que implica em uma elevada perda de energia. Estas explicações justificam o número imenso de formas de dissipadores de calor, algumas extremamente exóticas, mas criadas com a finalidade de melhorar a troca de calor (MELLO, 1980).

2.4 LIGHT EMITTER DIODE (LED)

Há pouco menos de 15 anos, os LEDs não passavam de apenas uma promessa, assim como outras tecnologias que surgiram no mercado de iluminação com o passar do tempo. Porém atualmente a realidade já é diferente, o LED se tornou a luz do presente. A tecnologia de iluminação em estado sólido, como também é chamada, evoluiu rapidamente e agora já é possível encontrar ótimas soluções em iluminação para diversos setores utilizando essa tecnologia (MARTELETO, 2011).

2.4.1 Fundamentos Químicos

Os fótons são as unidades básicas da luz. Os fótons, no LED, são liberados como resultado do movimento de elétrons. Em um átomo, os elétrons se movem em órbitas ao redor do núcleo. Elétrons em órbitas diferentes têm quantidades diferentes de energia. De maneira geral, os elétrons com mais energia se movem em órbitas mais distantes dos núcleos (MARTELETO, 2011).

Para um elétron pular de uma órbita mais baixa para uma órbita mais alta, algo deve aumentar seu nível de energia. Inversamente, um elétron libera energia quando cai para uma órbita mais baixa, essa energia é liberada em forma de um fóton. A produção de luz dependerá do material semicondutor da construção dos LEDs (MARTELETO, 2011).

2.4.2 Princípio de Funcionamento

Os LEDs são compostos de camadas diferentes de semicondutores em estado sólido, que convertem energia elétrica diretamente em luz. Aplicando uma tensão entre anodo e cátodo do semicondutor, os elétrons do material tipo *n* e as lacunas do material tipo *p* se deslocam em direção à junção *p-n*, como na Figura 25. Esta recombinação exige que a energia do elétron seja liberada na forma de fóton. Em materiais como arenito de gálio ou fosfeto de gálio, o número de fótons da energia luminosa é suficiente para criar uma fonte de luz. Esse processo é chamado de eletroluminescência (MARTELETO, 2011).

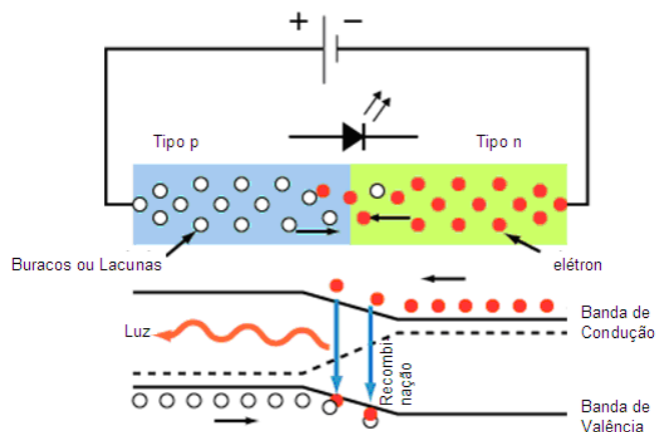


Figura 25 - Funcionamento interno do LED

Fonte: MARTELETO (2011)

A geração de luz branca com LED é conseguida com uma mistura de cores (normalmente azul e amarelo claro). A luz azul é gerada pelo *chip* LED, a amarela, por meio de um conversor fosfórico que absorve parte da luz azul e converte em luz amarela. O conversor fosfórico é colocado ao redor do diodo emissor de luz (MARTELETO, 2011).

Antes da descoberta do LED branco utilizando fósforo, era feita a superposição de cores. Adicionava-se o vermelho e o verde junto ao azul, dessa forma a mistura de cores atingia a coloração branca. Com essa mistura se pode conseguir qualquer cor do espectro partindo das cores fundamentais: azul, vermelho e verde. Porém esse método era menos eficiente e não tinha muita precisão (MARTELETO, 2011).

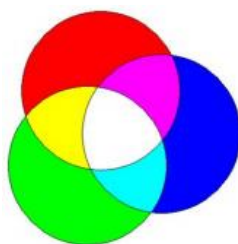


Figura 26 - Mistura aditiva de cor

Fonte: MARTELETO (2011)

2.4.3 Características Térmicas

A corrente que circula do LED produz calor, e esse calor gerado deve ser transferido para o meio ambiente, caso contrário a temperatura de junção se eleva acima dos limites permitidos e provoca à redução da vida útil e/ou a queima do componente. Por isso faz-se necessário o uso de dissipadores na iluminação LED (Hart, 2012).

Com base nos conceitos de termodinâmica, a Figura 27 mostra o circuito equivalente (partindo da junção PN, passando pela cápsula, dissipador e ao ambiente):

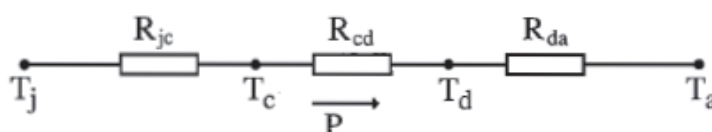


Figura 27 - Circuito térmico do LED

Fonte: HART (2012)

T_j – Temperatura de junção ($^{\circ}\text{C}$)

T_c – Temperatura da cápsula ($^{\circ}\text{C}$)

T_d – Temperatura do dissipador ($^{\circ}\text{C}$)

T_a – Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

P – Potencia térmica produzida pela corrente que circula no componente sendo transferida ao meio ambiente (W)

R_{jc} – Resistencia térmica entre a junção e a capsula ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) – fornecida pelo fabricante do componente.

R_{cd} – Resistencia térmica entre o componente e o dissipador ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) – fornecida pelo fabricante do componente.

R_{da} – Resistencia térmica entre o dissipador e o ambiente ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

R_{ja} – Resistencia térmica entre a junção e o ambiente ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

$$R_{ja} = R_{jc} + R_{cd} + R_{da} \quad \text{Eq. 32}$$

$$T_j - T_a = R_{ja}P \quad \text{Eq. 33}$$

$$R_{ja} = \frac{T_j - T_a}{P} \quad \text{Eq. 34}$$

2.4.3.1 Resistência Térmica da Junção do LED

De acordo com o seu *datasheet*, o módulo LED Acrich 13 W tem uma resistência térmica de $27^{\circ}\text{C}/\text{W}$ de junção do diodo emissor de luz para a ligação do LED. A temperatura máxima admissível da junção do LED é 125°C , por conseguinte, a temperatura máxima da cápsula do componente é (T_{s_max}) (SEOUL SEMICONDUCTOR D, 2014):

$$T_{s_max} = T_{j_max} - (R\theta_{j-s} \cdot P_d) \quad \text{Eq. 35}$$

Onde:

T_{j_max} – Temperatura máxima de junção;

$R\theta_{j-s}$ – Resistência térmica entre a junção e a cápsula;

P_d – Potência máxima dissipada pelo LED de acordo com o *datasheet*;

$$T_{s_max} = 125^{\circ}\text{C} - (27^{\circ}\text{C}/\text{W} \cdot 0,58\text{W}) = 109,34^{\circ}\text{C} \quad \text{Eq. 36}$$

Embora esta seja a temperatura máxima de ligação, o fabricante recomenda manter a temperatura de junção em 70°C .

Na figura 28 é possível ver o esquemático da térmica no LED.

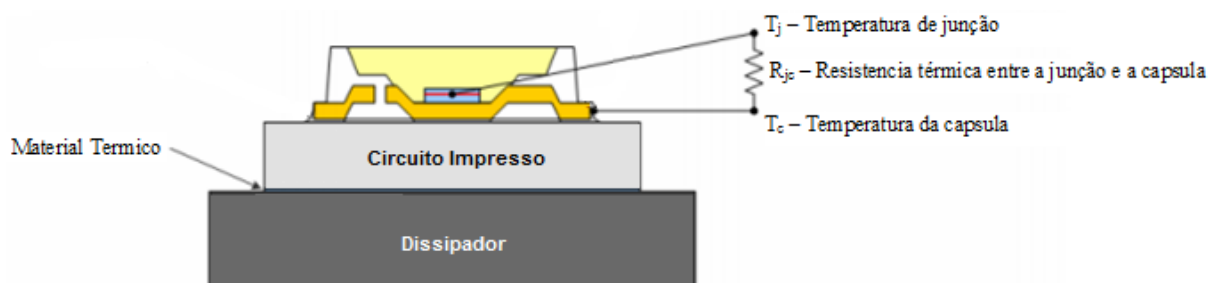


Figura 28 - Térmica do LED

Fonte: Adaptado de Seoul Semiconductor D (2014)

2.4.4 Módulo Acrich SMJE-3V12W1P3

O módulo Acrich 13 W - 220 V da linha Acrich2 da Seoul Semiconductor é composto por 30 LEDs modelo SAW8KG0B, uma placa de circuito, um circuito integrador Acrich DT3001A e uma ponte retificadora MB6S.

Na Tabela 2 é possível ver algumas características do módulo como: fluxo luminoso, temperatura de cor, que para esse módulo vai de 5300 a 6000 K e potência nominal.

Tabela 2 – Características de funcionamento do módulo Acrich SMJE-3V12W1P3

Parâmetros	Valor típico	Unidade
Fluxo Luminoso	1000	lm
Temperatura da Cor	5300 - 6000	K
Tensão de funcionamento	220	V
Potência Consumida	13	W
Frequência de operação	50 / 60	Hz

Fonte: Adaptado de Seoul Semiconductor D (2014)

Já na Tabela 3 estão os valores máximos que o sistema pode atingir sem gerar danos aos componentes. É importante destacar a temperatura máxima de operação de 85°C.

Tabela 3 – Valores máximos permitidos a $T_a = 25^\circ\text{C}$

Parâmetros	Valor típico	Unidade
Máxima Tensão de funcionamento	264	V
Potência Consumida	17,5	W
Temperatura de Operação	30 - 85	°C
Temperatura de Estoque	40 - 100	°C

Fonte: Adaptado de Seoul Semiconductor D (2014)

2.4.4.1 Dimensões

A dimensão mais relevante para o projeto é o diâmetro do módulo completo, que é de 50 mm, pois a partir desse dado foi decidido o tamanho da barra dissipadora e do duto utilizado para o fluxo de água conforme Figura 29.

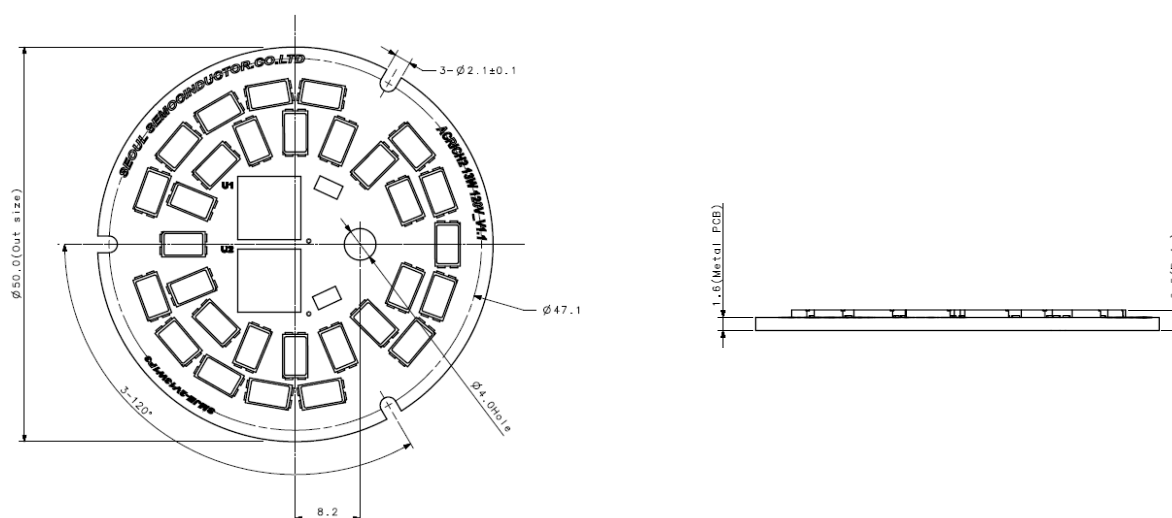


Figura 29 - Dimensões do módulo em mm

Fonte: Seoul Semiconductor D (2014)

2.4.4.2 Circuito Eletrônico

Na Figura 30 é apresentado o circuito de controle do módulo SMJE-3V12W1P3 fornecido pela Seoul Semiconductor D (2014).

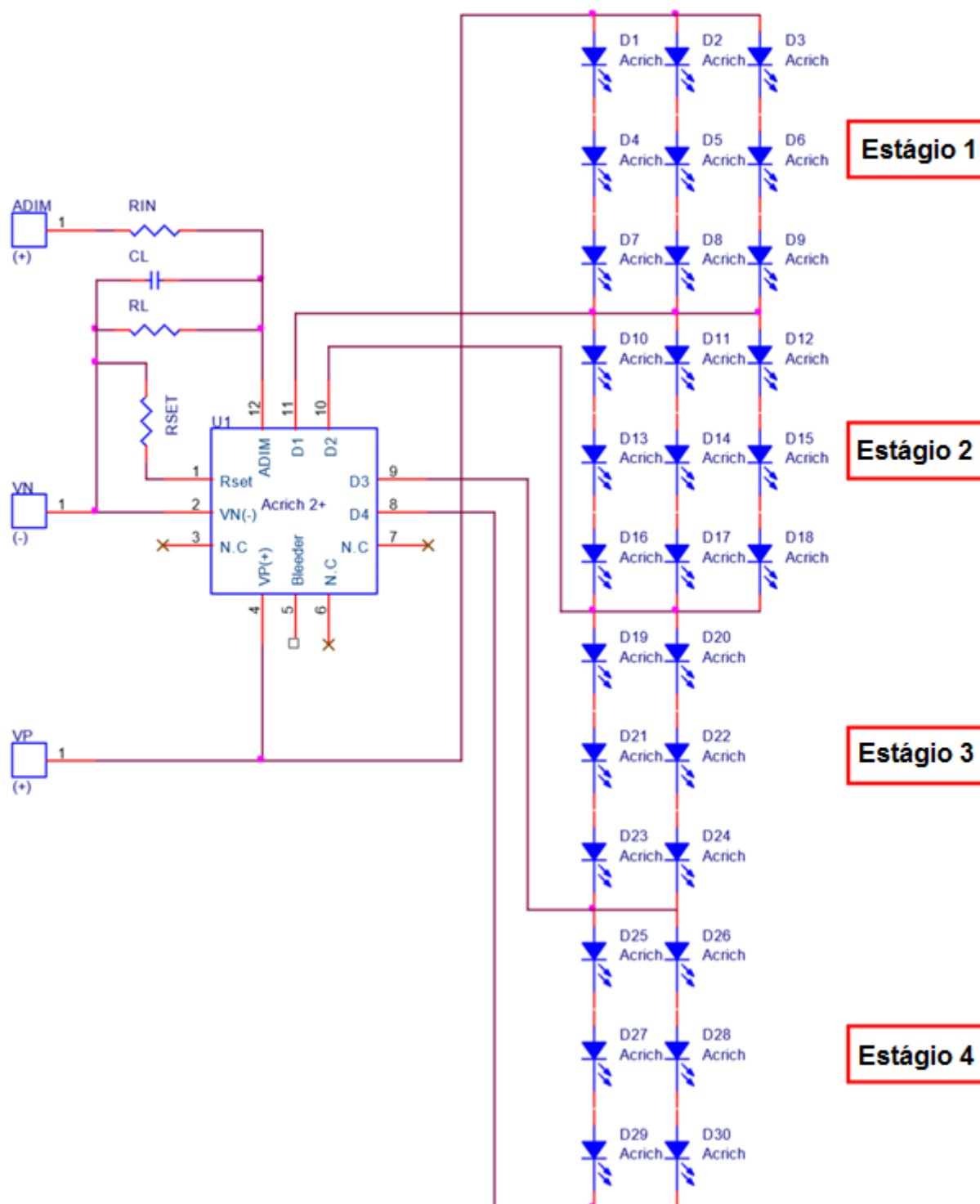


Figura 30 - Circuito de controle

Fonte: Adaptado de Seoul Semiconductor D (2014)

As Figuras 31 e 32 exemplificam como o conjunto da ponte retificadora e o CI conseguem controlar a corrente nos diodos emissores de luz. Nenhum LED fica ligado durante o tempo todo, um semiciclo senoidal é dividido em sete etapas, nas quais o CI aciona ou desaciona determinados grupos para manter a corrente nominal no circuito, como é observado na figura 32 e na Tabela 4, que mostra quais grupos são ligados e desligados em cada etapa.

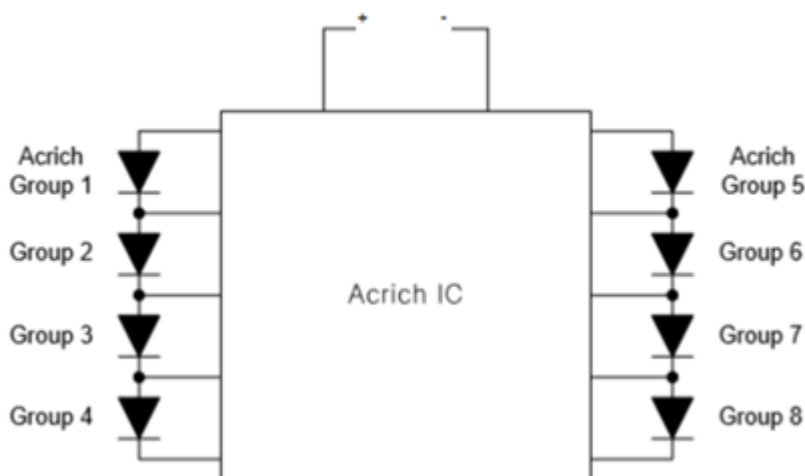


Figura 31 – Diagrama de blocos

Fonte: Adaptado de Seoul Semiconductor D (2014)

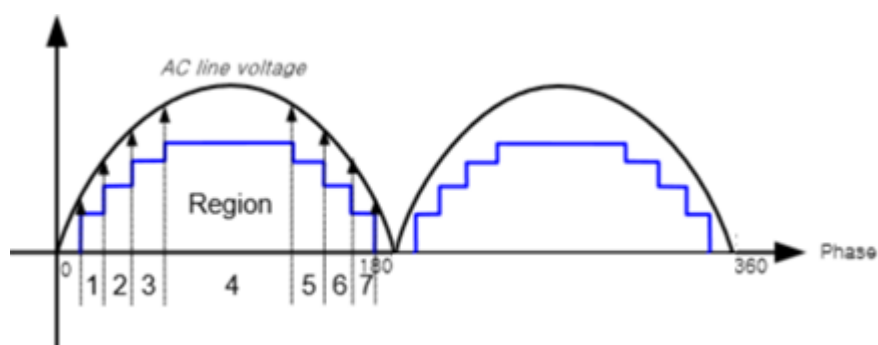


Figura 32 – Diagrama de blocos

Fonte: Adaptado de Seoul Semiconductor D (2014)

Tabela 4 – Disparos para o controle de corrente

Região	1	2	3	4	5	6	7
Grupo 1	On	On	On	On	On	On	On
Grupo 2	Off	On	On	On	On	On	Off
Grupo 3	Off	Off	On	On	On	Off	Off
Grupo 4	Off	Off	Off	On	Off	Off	Off

Fonte: Adaptado de Seoul Semiconductor D (2014)

2.4.4.3 Led Acrich SAW8KG0B

O LED SAW8KG0B é apresentado na Figura 33.



Figura 33 - LED SAW8KG0B

Fonte: SEOUL SEMICONDUCTOR C (2014)

Tabela 5 – Características de Funcionamento do LED

Parâmetros	Valor típico	Unidade
Corrente	20	mA
Tensão de Funcionamento	22	V
Intensidade Luminosa	52,8	lm
Potência Consumida	0,58	W
Temperatura de Junção	125	°C
Temperatura de Operação	85	°C
Temperatura de Estoque	100	°C

Fonte: Adaptado de Seoul Semiconductor C (2014)

Da Tabela 5 é importante ressaltar a temperatura de junção de 125°C e a temperatura de operação de -30 a 85°C. Este LED é alimentado com 25 mA e 22 V. No caso do módulo LC12W-A-220-V2, que possui 6200 K de temperatura de cor, tira-se a informação de que o LED possui 52,8 lm de fluxo luminoso. Além disso, cada LED consome uma potência máxima de 0,58 W, que no total de 30 LEDs gera 17,5 W, como encontrado na Tabela 3 como potência máxima do módulo.

2.4.4.4 Ponte Retificadora MB6S

A tensão fornecida pela concessionária de energia elétrica é alternada, ao passo que os dispositivos eletrônicos geralmente operam com tensão contínua. Então é necessário retificá-la e isto é feito através dos circuitos retificadores que convertem corrente alternada em

corrente contínua. No módulo Acrich, é a ponte retificadora MB6S que tem essa função, conforme Figura 34.

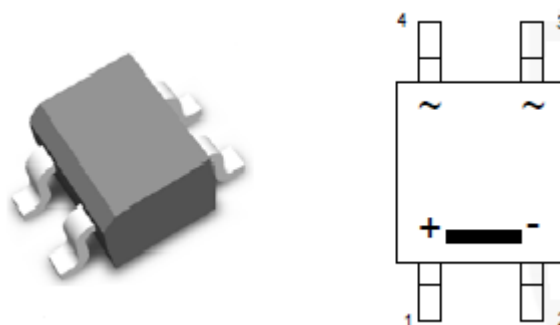


Figura 34 - Ponte retificadora MB6S

Fonte: FAIRCHILD (2014)

Do *datasheet* da ponte retificadora foram retiradas as Tabelas 6 e 7 (FAIRCHILD, 2014):

Tabela 6 – Valores Máximos permitidos MB6S

Parâmetros	Valor típico	Unidade
Máxima Tensão Reversa	600	V
Máxima Tensão de Entrada da Ponte Retificadora	420	V
Media da Corrente Direta Retificada	0,5	A
Temperatura de Estoque	-55 a +150	°C
Temperatura de Junção	-55 a +150	°C

Fonte: Adaptado de FAIRCHILD (2014)

Sobre as características térmicas é importante ressaltar que a resistência térmica da junção para o ambiente é de 85°C/W.

Tabela 7 – Características Térmicas MB6S

Parâmetros	Valor típico	Unidade
Potência Dissipada	1,4	W
Temperatura de junção com Ambiente	85	°C/W
Temperatura de Junção com Cápsula	20	°C/W

Fonte: Adaptado de FAIRCHILD (2014)

2.4.4.5 CI Acrich 2 - DT3001A

O CI acrich2 DT3001A pertence à segunda geração de CIs Acrich 2 desenvolvidos pela Seoul Semiconductor e na Figura 35 se encontra o diagrama de bloco desse CI.

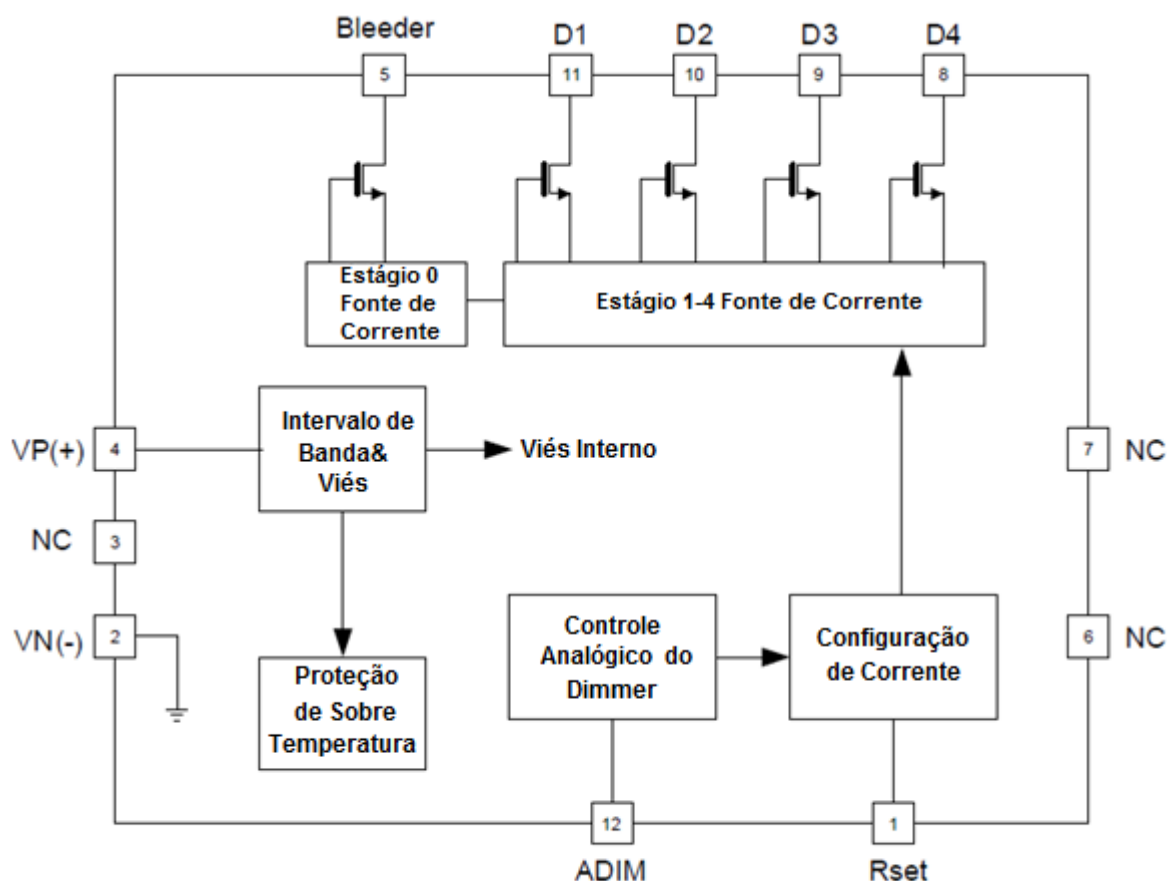


Figura 35 – Diagrama de blocos DT3001A

Fonte: Seoul Semiconductor B (2014)

Os valores máximos são muito importantes, pois passados esses valores é possível danificar o sistema. Pode-se observar que a temperatura deste CI pode ser superior a do LED sem danificar o circuito.

Tabela 8 – Valores máximos permitidos DT3001A

Parâmetros	Valor típico	Unidade
Temperatura ambiente de operação	- 30 a 100	°C
Temperatura de Estoque	- 40 a 120	°C
Temperatura da Placa	125	°C
Máxima temperatura de Junção	-55 a +150	°C

Fonte: Adaptado de Seoul Semiconductor B (2014)

A Figura 36 é a representação de como é ligado o CI e os LEDs.

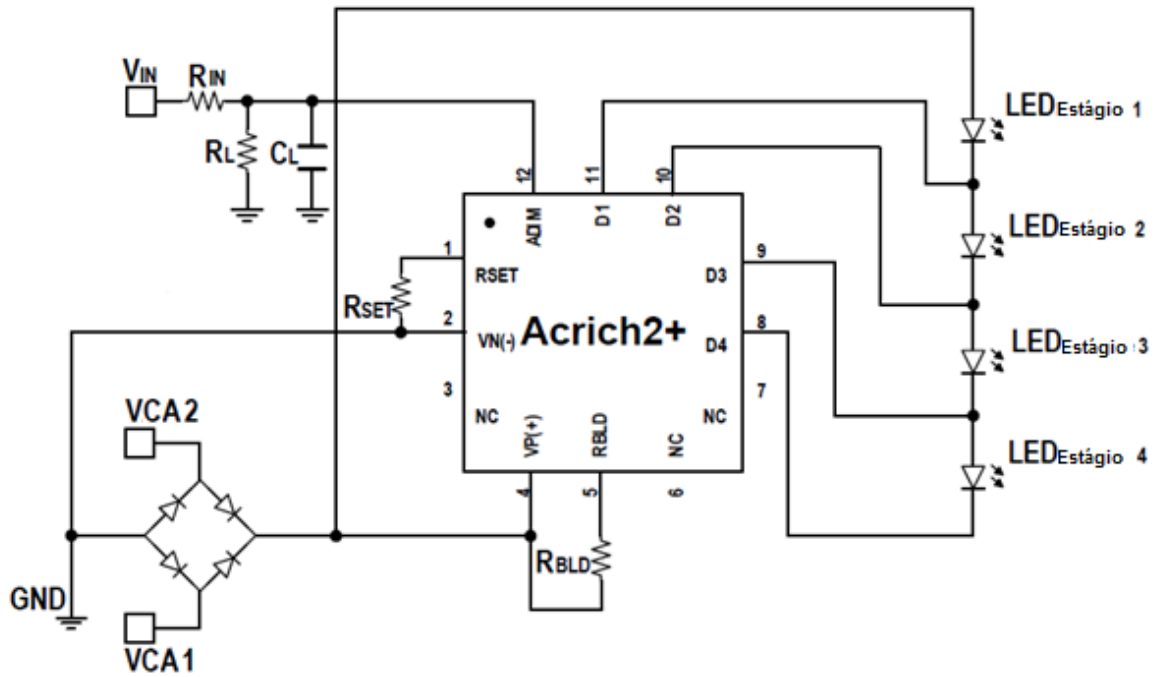


Figura 36 – Diagrama de blocos aplicado DT3001A

Fonte: Seoul Semiconductor B (2014)

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

3.1 PROTÓTIPO

Para confrontar a análise teórica com a prática e atingir o objetivo principal desse trabalho, pensou-se na concepção de um protótipo que possibilitasse uma montagem simples e funcional. A escolha dos materiais e acessórios foram feitos com base nos estudos realizados na etapa de fundamentação teórica, e também em materiais que se adequassem a montagem.

O primeiro passo foi escolher o material para a montagem da luminária, pois era preciso de uma peça que possibilitasse a fixação dos módulos e ao mesmo tempo permitisse que um fluxo de água percorresse seu interior. Foi procurado um material com uma boa condutibilidade térmica mas a um preço acessível. Encontrou-se então um perfil quadrado de alumínio que atendia perfeitamente a necessidade do protótipo, conforme Figura 37.



Figura 37 - Perfil de alumínio

Fonte: Própria (2015)

Na face inferior externa desse perfil, foram colados os quatro módulos LED. O fluxo de água percorreria o interior do tubo e o calor seria transferido pelas paredes internas. Mas para melhorar a transmissão de calor dos módulos para a água, foi colocado 2 dissipadores que cobriram toda a superfície inferior interna do perfil. Montagem que se mostrou mais vantajosa de acordo com os conceitos apresentados na fundamentação teórica.

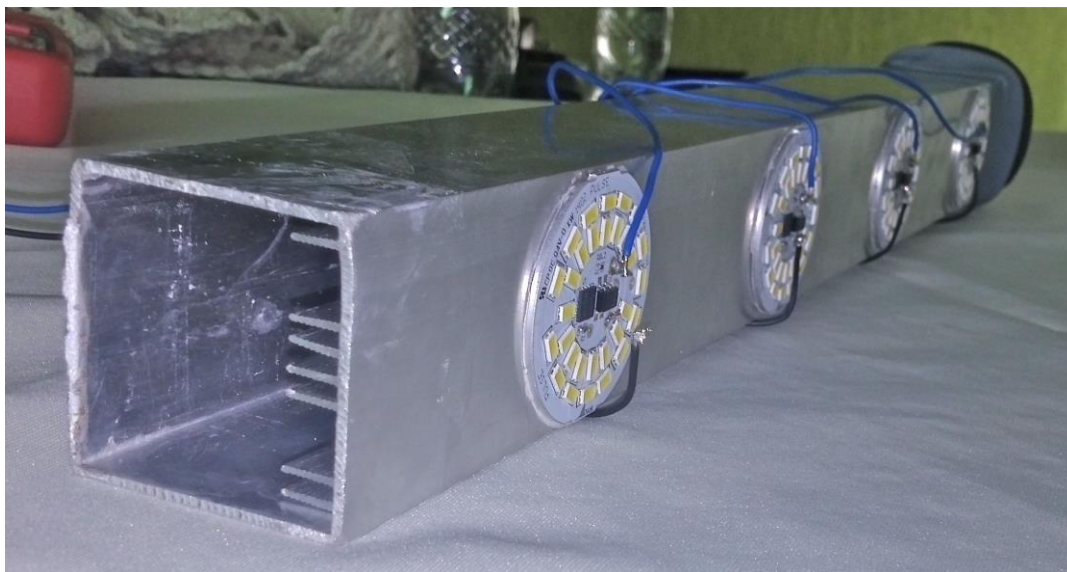


Figura 38 – Luminária – vista inferior

Fonte: Própria (2015)

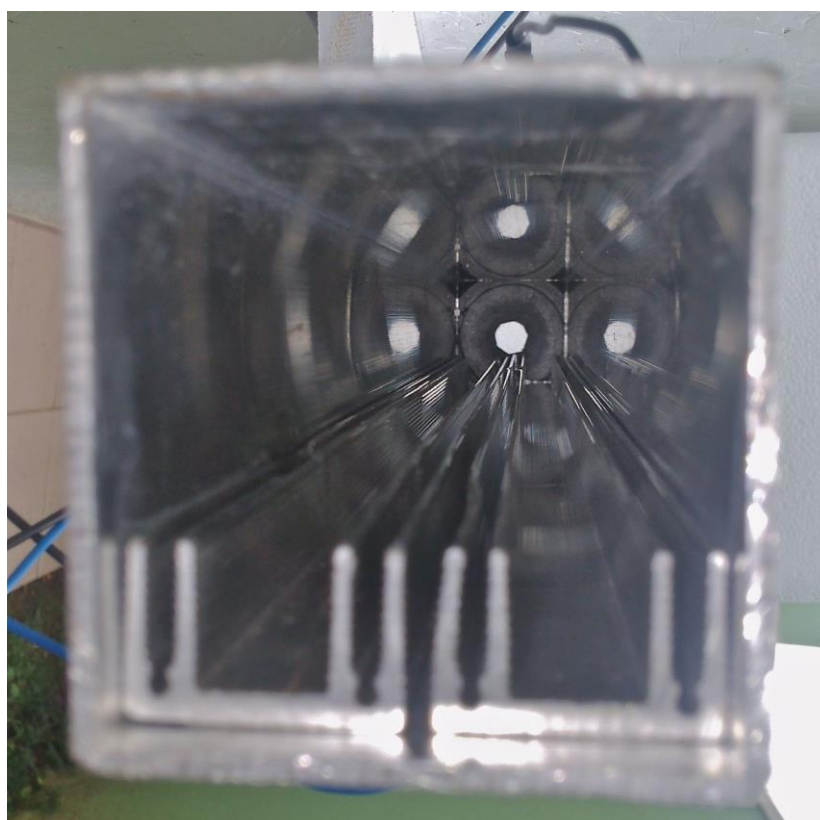


Figura 39 – Dissipadores fixados internamente

Fonte: Própria (2015)

Na fixação dos módulos e dos dissipadores, foram utilizadas fitas térmicas, materiais amplamente utilizados na colagem de componentes eletrônicos em dissipadores. O uso desse material se adequou à aplicação, pois era necessária uma boa transmissão de calor entre as superfícies e também a fixação de todas as peças na luminária.

No segundo momento, fez-se necessário a montagem de uma estrutura que possibilitasse que um fluxo de água percorresse a luminária e tivesse condições de fazer a medição de temperatura inicial e final da água. Para não se utilizar nenhum sistema de bombeamento, pensamos na estrutura de modo que se aproveitasse a gravidade para criar o fluxo do líquido dentro da luminária. O diagrama da montagem pode ser observado na Figura 40.

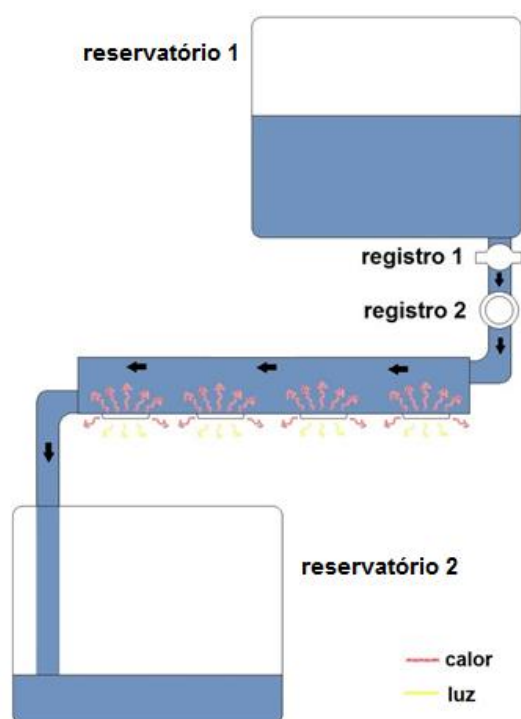


Figura 40 - Diagrama do sistema

Fonte: Própria (2015)

Para o isolamento térmico de todo o sistema, optou-se por utilizar caixas de isopor como compartimento de armazenamento da água, pois as mesmas possuem um bom isolamento térmico e são facilmente encontradas no mercado.

A estrutura, apresentada na figura 41, foi montada numa base de madeira de 1,20x0,80 m, com duas prateleiras e mãos francesas para suporte da luminária e isopores. O isopor na parte superior (isopor 1) da estrutura é a simulação de uma caixa d'água e o isopor na parte inferior (isopor 2) simula um reservatório para a água aquecida. No isopor 1, foi colocada uma saída de água conectada diretamente ao registro 1. Através de uma pequena

tubulação canalizou-se a água para dentro da luminária. O registro 2 foi utilizado para controlar a vazão de saída ou a de entrada em diferentes experimentos.

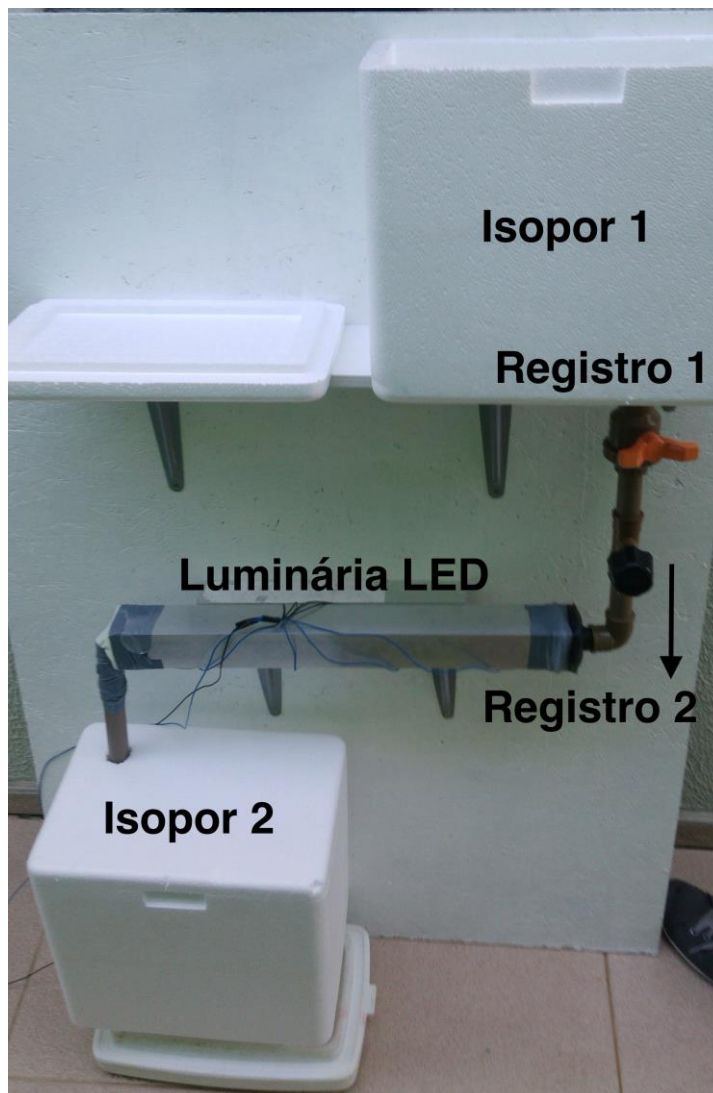


Figura 41 – Protótipo de luminária para simulações

Fonte: Própria (2015)

Para a montagem do protótipo foram necessários os seguintes materiais:

- 2 isopores de 12 litros;
- 1 metro de cano de PVC $\frac{3}{4}$ ”;
- 2 registros;
- 4 mãos francesas;
- 1 chapa de madeira 1,20 x 0,80 m;
- 2 dissipadores de alumínio de 0,5x0,23x0,15 m;
- 1 tubo retangular de alumínio de 0,5x0,05x0,05 m;

- 4 Módulos LED Acrich SMJE-3V12W1P3;
- 2 fios de 3m (azul e preto);
- Fitas adesivas térmicas.

Equipamentos necessários para obtenção dos resultados:

- 2 termômetros digitais tipo espeto (Incoterm 9791);
- 3 multímetros digitais (icel MD-6110);
- 1 cronômetro.

3.1.1 Experimento 1

Com o objetivo de verificar a variação da temperatura da água após percorrer a luminária a uma vazão de 0,67 l/m, utilizou-se o registro 2 para controlar a vazão de entrada conforme a Figura 42. Dessa forma apenas um pequeno filete de água percorreu o interior da luminária, entrando em contato apenas com o dissipador conforme a Figura 43. Foi ligada a luminária e após 5 minutos de funcionamento abri-se o registro 1 iniciando o fluxo de água. Mediu-se a temperatura de entrada (no interior do isopor 1), temperatura de saída (no interior do isopor 2) e monitorou-se a temperatura dos LEDs a cada minuto.

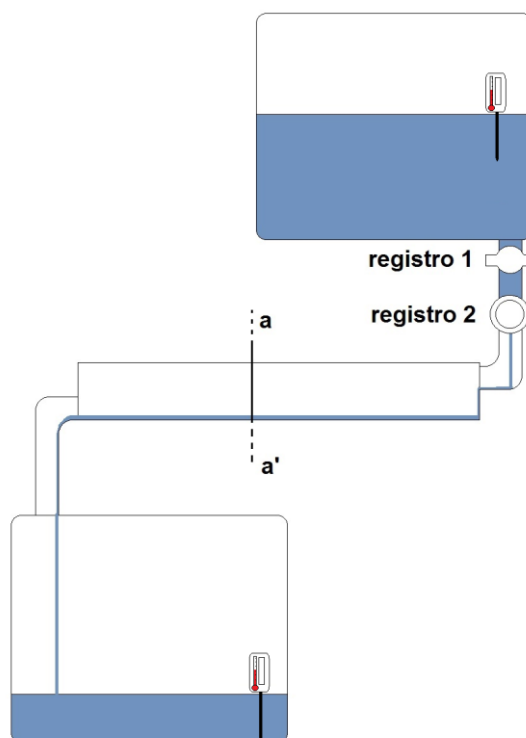


Figura 42 - Experimento 1

Fonte: Própria (2015)

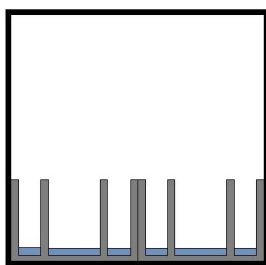


Figura 43 - Corte aa' – Interior da luminária – Experimento 1

Fonte: Própria (2015)

O experimento foi repetido cinco vezes, sendo passados 10 l de água a cada medição. Obteve-se os resultados conforme a Tabela 9 e a Figura 44.

Tabela 9 – Variação de Temperatura – Experimento 1

Ensaio	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)
1	22	23
2	22	23
3	23	25
4	23	24
5	23	24

Fonte: Própria (2015)

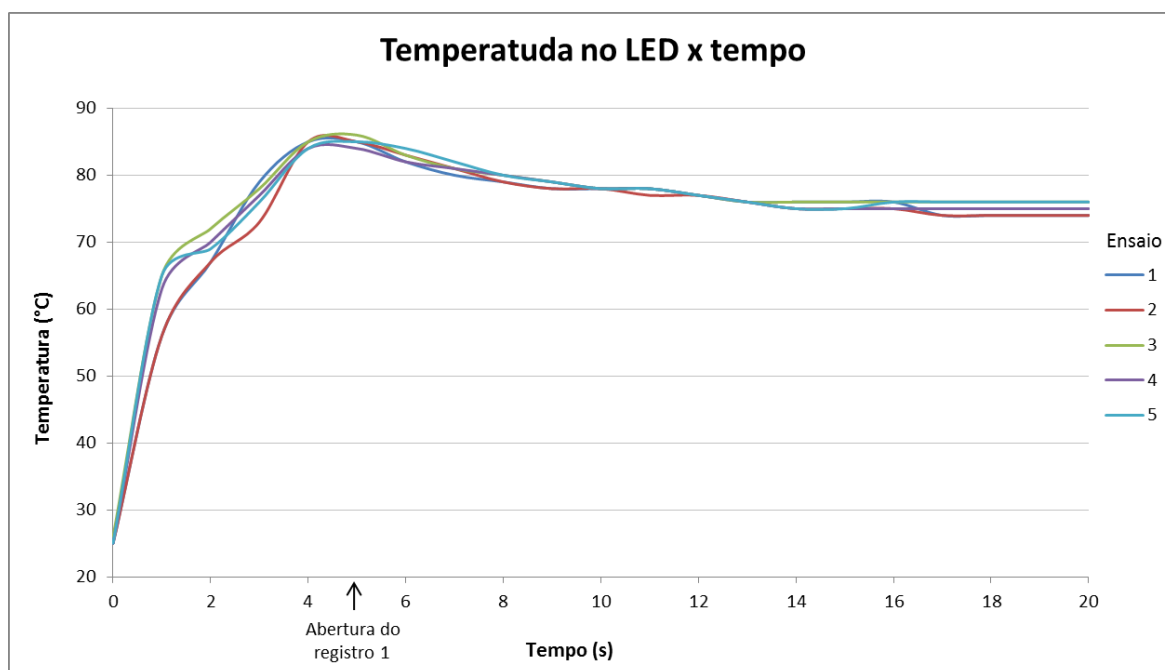


Figura 44 – Temperatura no LED x tempo

Fonte: Própria (2015)

3.1.2 Experimento 2

Com o objetivo de verificar a variação de temperatura da água de entrada e a temperatura de saída após percorrer a luminária, a uma vazão de 0,67 l/m, utilizou-se o registro 2 para controlar a vazão de saída, conforme a Figura 45. Dessa forma a luminária permaneceu com o seu volume interno preenchido com água conforme a Figura 46. Foi ligada a luminária e após 5 minutos de funcionamento foi aberto o registro 1 iniciando o fluxo de água. A temperatura de entrada e de saída foram medidas no início e no final do experimento e a temperatura dos LEDs foi monitorada a cada minuto.



Figura 45 – Experimento 2 – controle de vazão de saída

Fonte: Própria (2015)

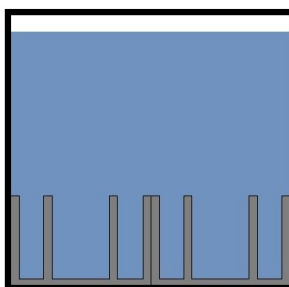


Figura 46 – Corte aa' - Interior da Luminária - Experimento 2

Fonte: Própria (2015)

O experimento foi repetido cinco vezes, sendo passados 10 l de água a cada medição. Obteve-se os resultados conforme a Tabela 10 e Figura 47.

Tabela 10 – Variação de Temperatura – Experimento 2

Ensaio	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)
1	23	27
2	23	27
3	22	26
4	23	26
5	24	27

Fonte: Própria (2015)

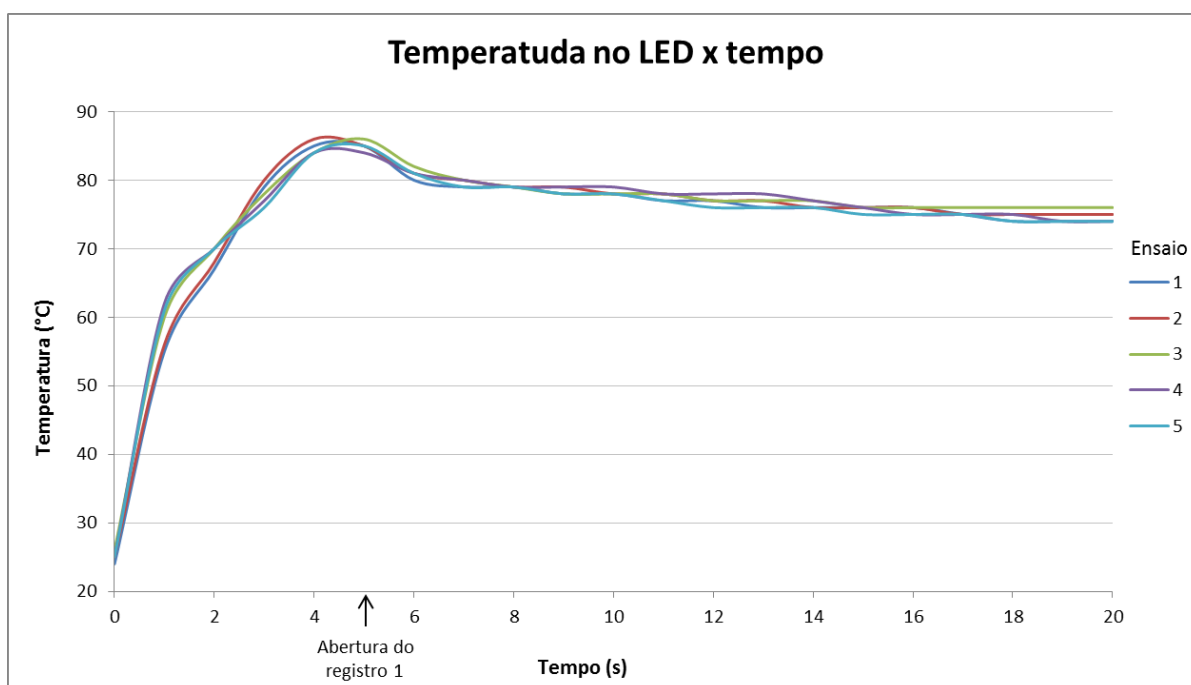


Figura 47 – Temperatura no LED x tempo

Fonte: Própria (2015)

3.1.3 Experimento 3

O experimento 3 teve como objetivo analisar o comportamento do sistema em caso de mau funcionamento do circuito hidráulico, com a possível não abertura do registro. Esta simulação foi realizada com o registro 2 fechado na saída da luminária e aberto após 30 min, conforme Figura 48 e Figura 49.

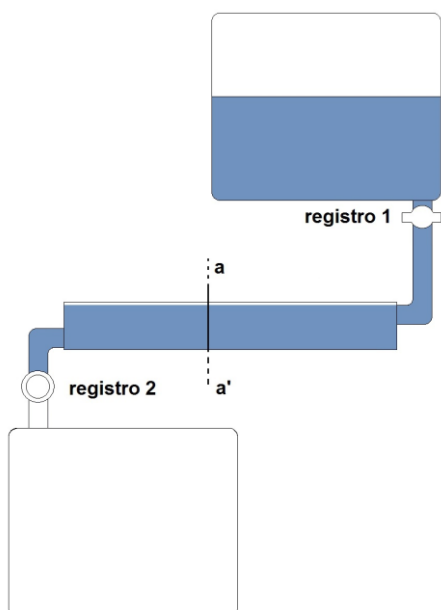


Figura 48 - Experimento 3
Fonte: Própria (2015)

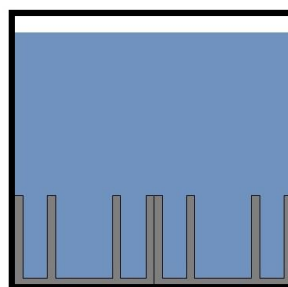


Figura 49 – Corte aa’- experimento 3
Fonte: Própria (2015)

Durante o ensaio foram registradas as temperaturas no encapsulamento do LED, na chapa de alumínio do circuito impresso e no tubo, conforme a Figura 50.



Figura 50 - Valores iniciais do experimento 3
Fonte: Própria (2015)

Foram coletadas as temperaturas a cada cinco minutos. A água estava a uma temperatura inicial de 26°C e ao final do experimento, após 30 minutos, estava a 37°C. Não foi possível medir a temperatura da água durante o procedimento, pois esta estava enclausurada dentro do tubo. A temperatura da água ser maior que a do tubo se deve ao fato de se medir a temperatura do tubo próximo as chapas de LED, pois na região da chapa a temperatura é maior e a troca de calor também é maior. Na Tabela 11 e na Figura 51 é possível visualizar os demais resultados obtidos.

Tabela 11 – Resultados – Experimento 3

Tempo	Temperatura no LED	Temperatura na chapa do LED	Temperatura no tubo	Temperatura na água
Inicial	82 °C	42 °C	29 °C	26 °C
5 Minutos	84 °C	44 °C	30 °C	-
10 Minutos	85 °C	46 °C	32 °C	-
15 Minutos	86 °C	47 °C	33 °C	-
20 Minutos	86 °C	47 °C	36°C	-
25 Minutos	87 °C	47 °C	36 °C	-
30 Minutos	87 °C	49 °C	36 °C	37 °C

Fonte: Própria (2015)



Figura 51 - Valores finais do experimento 3

Fonte: Própria (2015)

3.1.4 Medições

Para medir a temperatura no encapsulamento do LED nos experimentos, foram utilizados sensores de temperatura dos multímetros Icel MD-6110. O multímetro utilizado possui uma escala de -40 a 1000°C e uma resolução de 1°C . O mesmo método foi utilizado para as medições de temperatura na superfície da luminária e nas bases de alumínio dos módulos. Posicionou-se o sensor termopar conforme as Figuras 52 e 53.

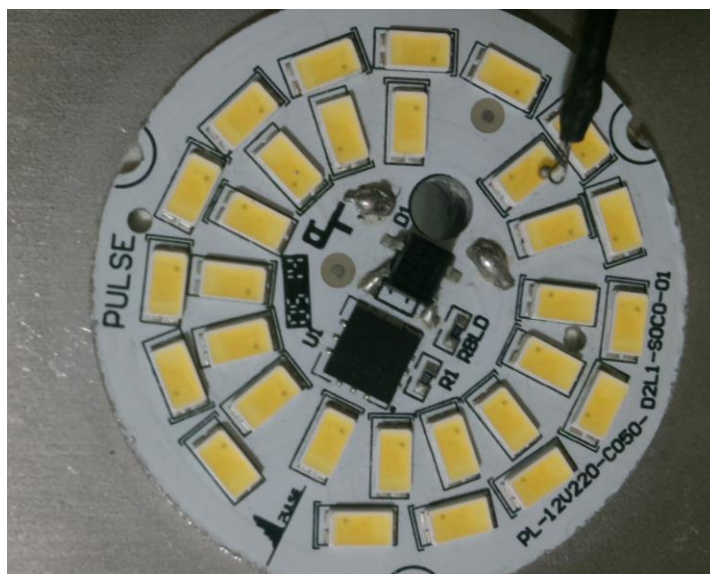


Figura 52 - Medição de temperatura no encapsulamento do LED (1)
Fonte: Própria (2015)

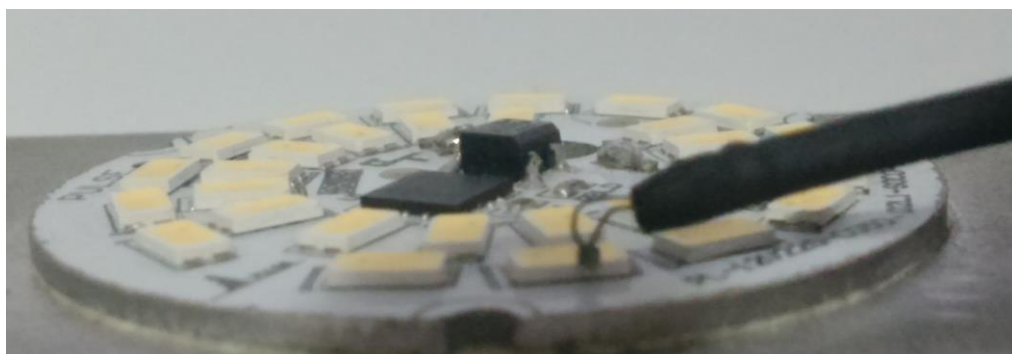


Figura 53 - Medição de temperatura no encapsulamento do LED (2)
Fonte: Própria (2015)

Para medir a temperatura na água foram utilizados termômetros de imersão modelo Incoterm 9791, este modelo possui uma escala de -50 a 300°C e uma resolução de 1°C .

3.1.5 Resultados

Para melhor comparar alguns resultados dos experimentos, calculou-se a média entre os diferentes ensaios dos principais valores a serem analisados.

3.1.5.1 Variação de Temperatura

Calculando a média da variação de temperatura dos dois experimentos tem-se:

$$\bar{x}_{\Delta t} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5}{n} \quad \text{Eq. 37}$$

Onde:

$\bar{x}_{\Delta t}$: média da variação de temperatura

Δt_n : variação de temperatura no ensaio n

n : quantidade de ensaios

Para o experimento 1:

$$\bar{x}_{\Delta t_1} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5}{n} = \frac{(23 - 22) + (23 - 22) + (25 - 23) + (24 - 23) + (24 - 23)}{5}$$

$$\bar{x}_{\Delta t_1} = 1,2^\circ C \quad \text{Eq. 38}$$

Para o experimento 2:

$$\bar{x}_{\Delta t_2} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5}{n} = \frac{(27 - 23) + (27 - 23) + (26 - 22) + (26 - 23) + (27 - 24)}{5}$$

$$\bar{x}_{\Delta t_2} = 3,7^\circ C \quad \text{Eq. 39}$$

.

3.1.5.2 Temperatura Final

A Tabela 12 apresenta a temperatura do encapsulamento do LED ao final de cada ensaio.

Tabela 12 – Temperatura final do LED

Ensaio	Temperatura final do LED no Experimento 1	Temperatura final do LED no Experimento 2
1	75	74
2	76	74
3	77	75
4	76	75
5	78	76

Fonte: Própria (2015)

Calculando a média da temperatura final dos dois ensaios tem-se:

$$\bar{x}_{t_{f_{led}}} = \frac{t_{f_1} + t_{f_2} + t_{f_3} + t_{f_4} + t_{f_5}}{n} \quad \text{Eq. 40}$$

Onde:

$\bar{x}_{t_{f_{led}}}$: média da temperatura final do LED

t_{f_1} : temperatura final do LED no ensaio n

n : quantidade de ensaios

Para o experimento 1:

$$\bar{x}_{t_{f_{led}}} = \frac{75+76+77+76+78}{5} = 76,4^{\circ}C \quad \text{Eq. 41}$$

Para o experimento 2:

$$\bar{x}_{t_{f_{led}}} = \frac{74+74+75+75+76}{5} = 74,8^{\circ}C \quad \text{Eq. 42}$$

3.2 CÁLCULOS TÉRMICOS

3.2.1 Experimento 1

Para o experimento 1 e 2 utilizou-se a temperatura de estabilidade no LED durante as práticas, que foi de aproximadamente 76°C, para determinar a temperatura no dissipador por meio de condução, desconsiderando as perdas para o ambiente, foi utilizada a Equação 16:

$$T = \frac{1}{2}(T_f - e^{-\frac{2t}{R\rho A d c}}) \text{ onde:}$$

$$T_f = 76 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t = 900 \text{ s} - 15 \text{ min}$$

$$\rho_{\text{água}} = 997,5 \text{ Kg/m}^3$$

$$A = 2,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ (área da superfície inferior do dissipador)}$$

$$d = 0,085 \text{ m (espessura do material condutor entre a fonte de calor e a água)}$$

$$c = 0,215 \text{ Ws/kg}^\circ\text{C}$$

E a resistência térmica é calculada pela aplicação da equação:

$$R = \frac{L}{A \cdot k}$$

Sendo que para paredes compostas:

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 \dots R_f \quad \text{Eq. 43}$$

$$L_{\text{alumínio}} = 0,0025 \text{ m}$$

$$L_{\text{fita termica}} = 0,0005 \text{ m}$$

$$A_{\text{chapa}} = \pi \cdot 0,025^2 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{tubo}} = 0,5 \cdot 0,05 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{dissipador}} = 0,5 \cdot 0,046 \text{ m}^2$$

$$K_{\text{alumínio}} = 237 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$K_{\text{fita termica}} = 73 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$R_t = \frac{0,0025}{237} \left(\frac{1}{0,5 \cdot 0,046} + \frac{1}{0,5 \cdot 0,05} + \frac{1}{\pi(0,025)^2} \right) + \frac{0,0005}{73} \left(\frac{1}{0,5 \cdot 0,05} + \frac{1}{\pi(0,025)^2} \right) \text{Eq. 44}$$

$$R_t = 36,6 \times 10^{-3} \text{ W/}^\circ\text{C} \quad \text{Eq. 45}$$

$$T = \frac{1}{2} \left(76 - e^{-\frac{2 \cdot 900}{36,6 \cdot 10^{-3} \cdot 997,5 \cdot 0,05 \cdot 0,5 \cdot 0,085 \cdot 0,215}} \right) = 37,5^\circ\text{C} \quad \text{Eq. 46}$$

Para determinar a temperatura que deve ser encontrada na água deve-se primeiramente fazer a correta análise do tipo de convecção, para isso utilizou-se a Equação 31, conhecida como número de Reynolds:

$$N_{Re} = \frac{VD\rho}{\mu}$$

Onde:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{11,18x \cdot m^3/s}{\pi \cdot 0,0095^2 m^2} \quad \text{Eq. 47}$$

$$V = 39,44 \cdot 10^{-3} m/s$$

$$D = 0,05 m$$

$$\mu = 979,72 \cdot 10^{-6} kg/ms$$

$$\rho = 997,5 Kg/m^3$$

$$N_{Re} = 2007,9 \quad \text{Eq. 48}$$

Como o número de Reynolds, para esses experimentos é inferior a 2300, a convecção é considerada como livre e é possível calcular a variação a temperatura da água pela Equação 4, considerando a temperatura inicial da água 23°C:

$$(mc\Delta T)_{aluminio} = (mc\Delta T)_{\acute{a}gua} \quad \text{Eq. 49}$$

$$T_{\acute{a}gua} = \frac{0,9 \cdot 0,215 \cdot (76-37,5)}{5 \cdot 1} + 23 = 24,49 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Eq. 50}$$

3.2.2 Experimento 2

Como a vazão desse experimento é a mesma do 1 pode-se constatar que também se trata de uma convecção livre, no entanto essa prática teve a peculiaridade de manter a água enclausurada, controlando a vazão de saída e não de entrada, então para se calcular a temperatura final da água é necessário considerar a troca de calor do volume interno ao tubo, que é $1,25 \times 10^{-3} m^3$, para isso foi usada também a Equação 4:

$$(mc\Delta T)_{aluminio} = (mc\Delta T)_{\acute{a}gua \text{ enclausurada}} \quad \text{Eq. 51}$$

$$T_{\acute{a}gua} = \frac{0,9 \cdot 0,215 \cdot (76-37,5)}{1,25 \cdot 1} + 23 = 28,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Eq. 52}$$

3.2.3 Experimento 3

Para determinar a temperatura no dissipador (desconsiderando as perdas) foi utilizada a Equação 16 e considerada a temperatura do LED a 87°C, como foi obtido na prática após 30 minutos, quando foi atingido o equilíbrio do sistema:

$$T = \frac{1}{2}(T_f - e^{-\frac{2t}{R\rho A d c}}) \text{ onde:}$$

$$T_f = 87 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t = 1800 \text{ s}$$

$$\rho = 997,5 \text{ Kg/m}^3$$

$$A = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ (área da superfície interna da luminária)}$$

$$d = 0,085 \text{ m (espessura do material condutor entre a fonte de calor e a água)}$$

$$c = 0,215 \text{ Ws/kg}^\circ\text{C}$$

$$R_t = 36,6 \cdot 10^{-3} \text{ W/}^\circ\text{C} \quad \text{Eq. 53}$$

$$T = \frac{1}{2}(87 - e^{-\frac{2 \cdot 1800}{36,6 \cdot 10^{-3} \cdot 997,5 \cdot 0,05 \cdot 0,5 \cdot 0,085 \cdot 0,215}}) = 43^\circ\text{C} \quad \text{Eq. 54}$$

Já para se obter a temperatura da água é utilizada a Equação 4 do calor sensível.

$$(mc\Delta T)_{\text{aluminio}} = (mc\Delta T)_{\text{água}} \quad \text{Eq. 55}$$

$$T_{\text{água}} = 43 - \frac{0,9 \cdot 0,215 \cdot (87-43)}{1,25 \cdot 1} = 36,19^\circ\text{C} \quad \text{Eq. 56}$$

4 CONCLUSÃO

Com os resultados dos experimentos foi possível observar-se qual é o real comportamento do sistema proposto. Os três modelos de ensaios foram definidos para observar determinados aspectos previamente definidos.

O primeiro ponto a ser observado foi a possibilidade ou não de se criar um degrau de temperatura em um determinado volume de água, esta possibilidade foi verificada nos 3 experimentos. O segundo aspecto foi identificar qual modelo de funcionamento tem o melhor desempenho. O terceiro aspecto, e talvez o mais importante para definir a viabilidade desse sistema, foi a verificação da temperatura do LED em todas as condições de operação. Dessa forma pode-se provar se essa aplicação ocasiona alguma redução da sua vida útil. E finalmente fazer algumas projeções sobre a capacidade de aplicação desses sistemas em instalações de grande porte como em indústrias.

Confrontando os resultados práticos com os teóricos, observamos no primeiro experimento que de acordo com os cálculos o acréscimo de temperatura deveria ser de $1,49^{\circ}\text{C}$ e de acordo com a Equação 38 o acréscimo de temperatura médio obtido no experimento foi de $1,2^{\circ}\text{C}$. Essa diferença pode ser atribuída a perdas de temperatura do sistema para o ambiente e baixa precisão nas medições, pois a resolução dos termômetros usados eram de 1°C .

No experimento 2, a variação de temperatura obtida nos cálculos foi de $5,9^{\circ}\text{C}$ e o acréscimo médio encontrado na prática foi de $3,7^{\circ}\text{C}$. Essa diferença no acréscimo de temperatura deve-se aos mesmos motivos do experimento 1.

No experimento 3, a variação de temperatura obtida nos cálculos foi de $10,19^{\circ}\text{C}$, e na prática observou-se uma variação de 10°C . Nesse experimento não houve perdas significativas devido ao tempo de duração do ensaio ser de trinta minutos, e não havia um fluxo contínuo de água, dessa forma o sistema atingiu o equilíbrio.

Comparando os resultados dos experimentos 1 e 2, observa-se um melhor aproveitamento no experimento 2. Consegue-se um degrau de temperatura maior entre o fluido de entrada e o fluido de saída, conforme é apresentado na resolução da Equação 39. Esse melhor aproveitamento deve-se ao fato de que a superfície de contato entre o fluido e a luminária ser maior. No primeiro experimento o fluido entra em contato apenas com a base dos dissipadores, e no segundo experimento o fluido entra em contato com toda a área dos dissipadores internos e as faces laterais internas da luminária.

Outro resultado que é importante ressaltar é a temperatura do LED ao final dos dois primeiros experimentos. O encapsulamento do LED atinge uma temperatura ligeiramente maior no experimento 1, como se pode observar com o auxílio da Equação 50 e com os dados da Tabela 12. O que ressalta ainda mais o melhor aproveitamento do experimento 2, pois isso confirma uma maior capacidade de retirada de calor dos módulos.

Outro ponto observado, um dado muito importante e favorável à implantação do sistema desenvolvido, é que em nenhum ensaio de nenhum experimento o LED ultrapassou a sua temperatura máxima de trabalho. Nem mesmo no experimento mais crítico, o experimento 3 em que não existe um fluxo contínuo de água. Nesse experimento o sistema atingiu o equilíbrio após 20 minutos, apresentando uma variação de apenas 1°C após esse período, sendo que a temperatura final do LED foi de 87°C, como é possível ver na Figura 42.

De acordo com o *datasheet* do módulo, a temperatura máxima de cápsula do LED é de 109,34°C, como foi calculado previamente na Equação 36, para uma temperatura de junção de 125°C. Neste caso, mesmo que ocorra a ausência do funcionamento do sistema hidráulico a temperatura do LED estaria garantindo a manutenção da vida útil do LED. O que nos mostra que um sistema semelhante a esse protótipo não é dependente do fluxo de água para manter uma temperatura de trabalho dentro dos limites nominais.

Com base em todos esses dados e constatações percebe-se que do ponto de vista funcional, é possível criar um degrau de temperatura em um fluxo de água contínuo. No experimento que demonstrou maior aproveitamento obteve-se um degrau de temperatura médio de 3,7°C, valor que pode não ser representativo se considerarmos um sistema pequeno igual ao protótipo montado, apenas uma luminária de 52 W com a vazão de 0,67 l/m. Porém em uma instalação de grande porte com uma quantidade significativa de luminárias de alta potência, a capacidade de aquecimento seria mais expressiva.

Exemplificando essa capacidade, em um sistema pequeno com dez luminárias LED de 130 W (potência equivalente a algumas luminárias industriais convencionais), um sistema equivalente a um chuveiro convencional, com uma vazão de aproximadamente 3 l/min e um degrau de temperatura de aproximadamente 15°C, a partir da temperatura inicial de 23°C.

Não se verificou a viabilidade econômica do projeto contemplando valores como custos de implantação e de manutenção, redução de custos no consumo de energia para aquecimento de água e iluminação e o cálculo do retorno financeiro de todo o investimento. Itens que podem ser contemplados em um trabalho futuro. Observou-se também que é possível fazer algumas melhorias no protótipo para se atingir um aproveitamento maior, itens ficam de sugestão para trabalhos futuros nesse mesmo tema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABESCO. Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia. **O que é Eficiência Energética?** Disponível em <www.abesco.com.br> Acessado em 08/04/2014.

AQUADEEN. **Temperatura de Cor**. Disponível em:
<www.aquadeen-shop.net/conceitos_5.htm>. Acessado em 20 de abril de 2014.

ARAUJO, CELSO. **Transmissão de Calor**. 2ª Edição – Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS A. **NBR 5413**: Iluminância de interiores. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/sheyqueiroz/nbr-541392-iluminacao-de-interiores>> Acessado em 10 de abril de 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS B. **NBR 5461** - Iluminação – Terminologia. Disponível em: < <http://www.casoe.com.br/wp-content/uploads/2012/11/c-NBR-5461-Ilumina%C3%A7%C3%A3o-Terminologia.pdf>> Acessado em 10 de abril de 2014.

BARROSA, MARCELO ROSÁRIO DA. **Princípios Fundamentais da Transferência de Calor**. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/p/jesse.rebello/termo/Trabalho_Transcal.pdf> Acessado em 10 de maio de 2014.

CONEXLED - **Vantagens do LED**. Disponível em: <<http://www.conexled.com.br/led/>> Acessado em 29 de janeiro de 2014.

COSTA, G.J.C. **Iluminação econômica – Cálculo e avaliação**. 4ª Edição – Porto Alegre: EDIPUCRS, 2006 .

CREDER, H. **Instalações elétricas**. 14. Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

DINO, DANIELLE L.; CHAPULLA NETO, PAULO; GIRALDELO, ROBSON F.. **Desenvolvimento de um Conjunto de Iluminação Industrial com base na tecnologia LED CA**. 2010. 99f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Industrial Elétrica - Ênfase em Eletrotécnica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba, 2010.

ELÉTROBRAS, **Avaliação dos Resultados do PROCEL 2005**, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, Eletrobrás, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

FAIRCHILD – < <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/MB/MB6S.pdf> >. Acessado em 25 de julho de 2014.

FREITAS, L.. **Avanço a velocidade da luz**, Revista Lumière nº 183, ano 15, p. 48-54, Julho 2013.

GOEKING W.; MIRANDA P.; NEGRÃO P.. **À esperada era do LED**. Revista Lumière, nº 109, ano 09, p. 38 -44, maio 2007.

HART D. **Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuito**. 2012, Ed. McGraw-Hill Brasi.

INCROPERA, FRANK P.. **Fundamentos de Transmissão de Calor e de Massa**. 6ª Edição – Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2008.

INEE. Instituto Nacional de Eficiência Energética. **O que é Eficiência Energética**. Disponível em <<http://www.inee.org.br/>> Acessado em 07/04/2014 .

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Tipos de Lampadas**. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/>> Acessado em 10/04/2014 .

ITAIM ILUMINAÇÃO - **Catálogo Geral de Produtos 2008** - Embu das Artes (SP): Itaim, 2008.

JORNAL NACIONAL - **Governo proíbe a comercialização de lâmpadas comuns de 150 watts.** Disponível em <<http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2013/07/governo-proibe-comercializacao-de-lampadas-comuns-de-150-watts.html>> Acessado em 26/03/2014

KREITH, F. E BOHN, MS. **Princípios de Transferência de Calor**, 1977, Editora Edgard Blücher, São Paulo.

MAMEDE FILHO, J.. **Instalações Elétricas Industriais**. 7 Edição Rio de Janeiro: LTC, 2007.

MARTELETO, Douglas C., **Avaliação do Diodo Emissor de Luz (LED) Para Iluminação de Interiores**. 2011. 86f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, 2011.

MELLO, HILTON ANDRADE, **Dispositivos semicondutores: diodos, transistores, fotossensíveis, circuitos integrados** 3. Edição – Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1980.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília, 2007. Disponível em <http://www.epe.gov.br/pne/forms/empreendimento.aspx>. Acessado em 29 de Abril de 2014.

PHILIPS-Philips **MASTERLED shows superior performance in independent study**. Disponível em <http://www.newscenter.philips.com/main/standard/about/news/press/20090507_master_led.wpd>. Acessado em 29 de janeiro de 2014.

PIMENTA, José Luiz. **Poderão os LEDs Substituir as lâmpadas convencionais?** Revista LA_PRO, São Paulo , edição especial, novembro 2004.

REVISTA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA A. **O Desafio da Integração**, Revista Eficiência Energética 1ª Edição – p. 12-17, Julho 2013.

REVISTA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA B. **Uma Questão de Foco**, Revista Eficiência Energética 1ª Edição – p. 18-25, Julho 2013.

SALES, Roberto P. **LED, O Novo Paradigma da Iluminação Pública**. 2011. 173f, Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia)-Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, 2011.

SANADA F.; SILVA J.; CARVALHO G.; SOUZAL.. **Tecnologia LED: uma nova tendência**, Revista Lumière nº 183, ano 15, p. 98-100, Julho 2013.

SALOMÃO. Thais M.. **Eficiência Energética: Projetos Luminotécnicos em Plantas Industriais**. 2010. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

SANTOS, Afonso H. M. et al.. **Eficiência Energética, Teoria e Prática**. 1ª edição - Itajuba, 2007.

SEOUL SEMICONDUCTOR A – **LED Technoly**. Disponível em: <<http://www.seoulsemicon.com/en/html/technical/ledtech01.asp>>. Acessado em 28 de novembro de 2013.

SEOUL SEMICONDUCTOR B – **Product Data Sheet DT3001A**. Disponível em: <http://www.seoulsemicon.com/_upload/Goods_Spec/Acrich2-Applicationnote.pdf>. Acessado em 25 de julho de 2014.

SEOUL SEMICONDUCTOR C – **Product Data Sheet SAW8KG0B**. Disponível em: <http://www.seoulsemicon.com/_upload/Goods_Spec/SAW8KG0B_Specification.pdf>. Acessado em 25 de julho de 2014.

SEOUL SEMICONDUCTOR D – **Product Data Sheet SMJE-3V12W1P3**. Disponível em: < http://www.seoulsemicon.com/_upload/Goods_Spec/SMJE-3V12W1P3%280%29.pdf>. Acessado em 25 de julho de 2014.

SOPACAZA, V.. **Introdução a tecnologia de LED**. Revista LA_PRO, São Paulo, 1ª Edição – p.5-10, novembro 2008.

UTILUZ – **Conheça o LED**. Disponível em: <<http://www.utiluz.com/pt/oled>>. Acessado em 10 de novembro de 2013.