



ANÁLISE TÉRMICA POR MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS EM DISSIPADORES DE ALUMÍNIO UTILIZADOS EM LUMINÁRIAS LED

Prof.Me. Bani Valério Alves Pereira¹ (orientador) – Senai Roberto Simonsen

Pós-graduando Rodrigo de Moraes² -Senai Roberto Simonsen

RESUMO

Os diodos emissores de luz figuram como uma revolução no segmento de iluminação pública, comercial e residencial após a descoberta da tecnologia para a emissão da luz branca, bem como o aumento de seu fluxo luminoso (SILVA, AMAURI LUIS DA, 2004).

Com a passagem de corrente elétrica pelo LED, tem-se, a geração de luz e calor, onde, este último, precisa ser conduzido para a atmosfera evitando-se prejudicar o funcionamento de componentes eletrônicos necessários à operação normal da luminária como fontes, supressores de surto e do próprio componente semicondutor.

Dessa forma, a análise térmica em dissipadores pelo método dos elementos finitos (MEF) na fase de projeto em luminárias LED bem como a comparação dos resultados modelados em software com o protótipo, cujos valores térmicos foram obtidos com o auxílio de termopares instalados em regiões próximas ao LED, além de uma verificação da temperatura do LED e do dissipador por câmera termográfica, permitiu a validação do projeto térmico ainda na fase de protótipo.

Os resultados, pelo método dos elementos finitos, ficaram próximos às condições medidas à temperatura ambiente e para uma situação real e esperada de funcionamento da luminária considerando-se os limites de temperatura de cada componente eletrônico montado.

Palavras chave: semicondutor, LED, termografia, termopares, luminária, elementos finitos.

¹Mestrado em engenharia Mecânica UNITAU – Universidade de Taubaté . E-mail: banipereira@hotmail.com

² Pós-graduando em Projetos Mecânicos Industrial Senai Roberto Simonsen E-mail: rdmoraes@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

Definir o projeto de um dissipador de calor adequado à potência térmica projetada para a luminária LED com a utilização de um software de simulação por elementos finitos comparando-se os resultados obtidos em software com a medição térmica no protótipo da luminária, ou seja, comparação entre modelo virtual e o modelo físico. Sabe-se que o calor gerado pelo LED é o elemento mais indesejado deste revolucionário sistema de iluminação elétrica e que corrobora para a diminuição da vida útil do componente. Portanto identificar a melhor forma de retirar o calor gerado através da dissipação térmica reflete a importância deste estudo.

O objetivo deste trabalho é verificar se a análise térmica processada no software Solidworks Simulation® pelo método dos elementos finitos (MEF) se equipara aos testes executados por termopares no protótipo físico. Para a luminária LED em estudo definiu-se a potência de projeto em 40W, o coeficiente de convecção (h) de 8 W/m²K, temperatura de projeto (tp) de 298,15 °C e temperatura ambiente (ta) de 25°C. O material do dissipador é o alumínio 6063-T5.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 – Transferência de calor

Transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço. Sempre que existir uma diferença de temperaturas em um meio ou entre meios, haverá, necessariamente, transferência de calor (INCROPERA, 2014). Existem três processos de transferência de calor: a condução, a convecção e a radiação.

Na condução (ver figura 1) ocorre a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido às interações entre partículas.

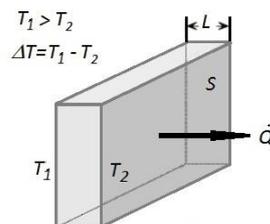


Figura 1 - Modo condução - Fonte: https://it.wikipedia.org/wiki/Conduzione_termica (2018).

Na convecção (ver figura 2) ocorrerá transferência de calor entre uma superfície e um fluido em movimento quando tiverem diferentes temperaturas.

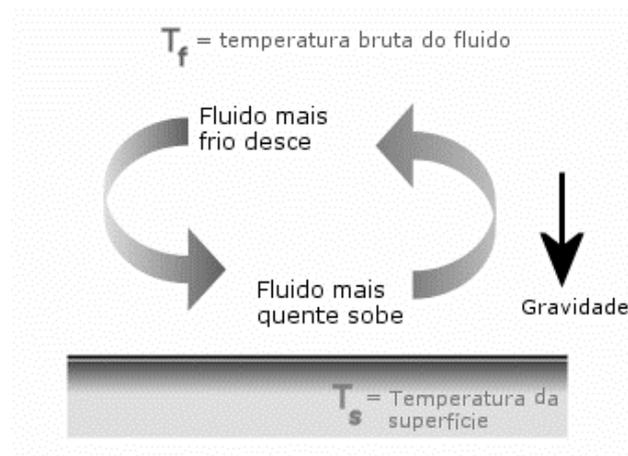


Figura 2 - Modo convecção - Fonte: Ajuda do Solidworks (2018).

Já a radiação térmica (ver figura 3) 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; é a troca de líquida de calor por radiação entre duas superfícies.

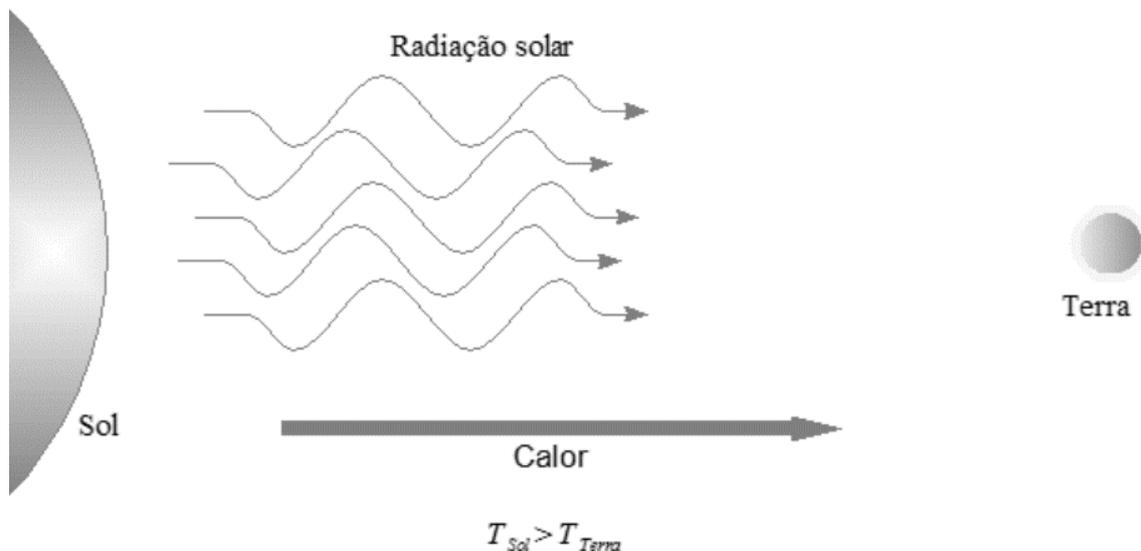


Figura 3 - Modo radiação -

Fonte: <http://fisicafabionet.blogspot.com.br/2010/05/propagacao-de-calor.html> (2018).



2.2 – Condução

A extremidade exposta de uma colher de metal subitamente imersa em uma xícara de leite quente é aquecida devido à condução de energia através da colher; outro exemplo, em um dia de inverno ocorre perda significativa de energia de um quarto aquecido para o ar externo, perda esta justificada pela transferência de calor por condução através da parede que separa o ar do interior do quarto do ar externo.

Existindo um gradiente de temperatura em um meio sólido, o calor fluirá da região de temperatura mais alta para a de temperatura mais baixa. A taxa na qual o calor é transferido por condução, q_k , é proporcional ao gradiente de temperatura dT/dx multiplicado pela área A através da qual o calor é transferido:

$$q_k \propto A \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

Dessa forma, para a condução por um meio homogêneo a taxa de transferência é, então:

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1.2)$$

O sinal negativo é empregado na equação (1.2) em decorrência da segunda lei da termodinâmica, o calor deve fluir na direção da temperatura mais alta para a temperatura mais baixa.

2.2.1 – Condutividade térmica

A condutividade térmica (k) na equação (1.2) é uma propriedade material que indica a quantidade de calor que fluirá por unidade de tempo através de uma unidade de área quando o gradiente de temperatura for unitário, sendo expressa em unidades de Watts por metro por Kelvin – W/mK (KREITH, 2003). Abaixo, a Tabela 1 apresenta a condutividade térmica de alguns materiais:



Tabela 1 - Condutividade térmica de alguns metais, sólidos não-metálicos, líquidos e gases.

Material	W/mK
Cobre	399
Alumínio	237
Aço carbono, 1%C	43
Vidro	0,81
Plástico	0,2-0,3
Água	0,6
Etilenoglicol	0,26
Óleo de motor	0,15
Freon (líquido)	0,07
Hidrogênio	0,18
Ar	0,026

. 2.3 – Convecção

A convecção descreve a transferência de energia entre uma superfície e um fluido em movimento sobre essa superfície; inclui transferência de energia pelo movimento global do fluido (advecção) e pelo movimento aleatório das moléculas do fluido (condução ou difusão) (INCROPERA, 2014). A equação apropriada para a taxa de transferência possui a forma como visto em (1.3) e (1.4):

$$q^n = h(T_s - T_\infty) \text{ para } (T_s > T_\infty) \text{ ou} \quad (1.3)$$

$$q^n = h(T_\infty - T_s) \text{ para } (T_\infty > T_s) \quad (1.4)$$

A expressão representada pela equação (1.3) e (1.4) é conhecida como a lei do resfriamento de Newton.

O coeficiente de convecção h depende das condições na camada-limite que são influenciadas pela geometria da superfície, natureza do escoamento do fluido e por uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte de fluido.



Tabela 2 – Valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção

Processo	h ($W/m^2 \cdot K$)
Convecção natural	
Gases	2-25
Líquidos	50-1000
Convecção forçada	
Gases	25-250
Líquidos	100-20.000
Convecção com mudança de fase	
Ebulição ou condensação	2500-100.000

A convecção forçada é causada por meios externos; com o uso de um ventilador, bomba ou ventos atmosféricos.

Por outro lado, na convecção natural ou livre, o escoamento do fluido ocorre por forças de empuxo, iniciadas pelas diferenças de densidades (massas específicas) originadas por variações de temperaturas no fluido.

2.4 – Radiação

Radiação térmica é a energia emitida pela matéria que encontra a uma temperatura diferente de zero.

A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas (ou fótons). Enquanto a transferência de energia por condução ou convecção requer a presença de um meio material, a radiação dispensa este meio. Na radiação a transferência de calor ocorre mais eficientemente no vácuo.

A troca líquida de calor na radiação é expressa na equação (1.5), abaixo:

$$q_{rad} = h_r A (T_S - T_{viz}) \quad (1.5)$$

O coeficiente de transferência de calor por radiação h_r é visto na equação (1.6), abaixo:

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_S + T_{viz}) (T_S^2 + T_{viz}^2) \quad (1.6)$$



2.5 – Obtenção e processamento do alumínio

A bauxita é o minério do alumínio, presente em abundância na face da Terra, representando cerca de 8% da crosta terrestre. O processo Bayer, o mais usual para a obtenção do óxido de alumínio da bauxita, é um método de extração do hidróxido de alumínio da bauxita com uma solução de soda a temperaturas elevadas, separação dos resíduos sólidos, após o resfriamento da suspensão, retirada do hidróxido de alumínio da solução de soda, com a separação do hidróxido cristalizado. O hidróxido obtido é transformado termicamente para óxido, isto é, (Al_2O_3).

O processo Hall-Heroult é responsável pela redução deste óxido para o metal através de sua eletrólise em temperaturas de 950 à 980°C. A alumina é dissolvida em criolita fundida e através do anodo do sistema dá-se a decomposição eletroquímica do óxido de alumínio, obtendo-se alumínio líquido em temperatura elevada. Dessa forma, para bauxita com teores da ordem de 40% de Al_2O_3 , 4 kg de bauxita produzem 2 kg de alumina que originam 1 kg de alumínio.

Nesta etapa do processo, a adição de sucatas é muito importante para resfriar este material, adequando a temperatura de vazamento, bem como a adição dos elementos de liga, em função da composição química desejada, seja na forma de tarugos para a extrusão, placas para laminação, barras Properzi para trefilação ou lingotes para a fundição de peças ou quaisquer outras finalidades. A figura 4 mostra o fluxograma de obtenção do alumínio (ABAL, 2014).

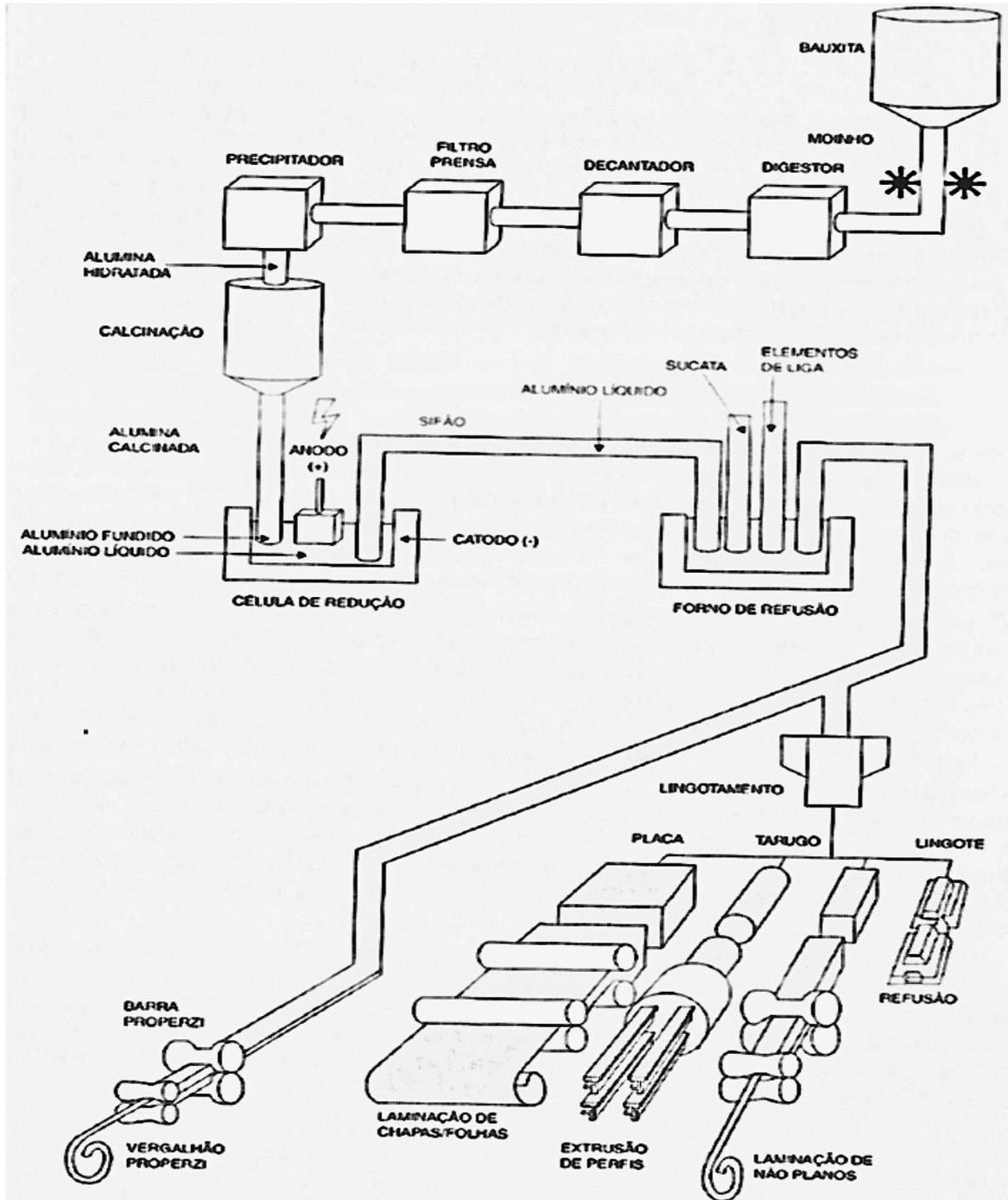


Figura 4 - Fluxograma de obtenção do alumínio e de produtos semiacabados



2.5.1 – Características gerais do alumínio

A leveza é uma das principais características do alumínio. Seu peso específico é de cerca de 2,7 g/cm³. Sua massa é, aproximadamente, 35% da massa do aço e 30% da massa do cobre. O alumínio comercialmente puro tem uma resistência à tração aproximada de 90 MPa. Com isso seu uso estrutural fica prejudicado, mas sua resistência mecânica é melhorada quando elementos de liga como o magnésio, silício, zinco, cromo, cobre, ferro, entre outros, são adicionados. Obtêm-se uma vasta variação de características mecânicas ou têmperas em ligas de alumínio, combinando-se o trabalho a frio e o tratamento térmico. O alumínio apresenta uma elevada resistência à corrosão, pois, quando exposto à atmosfera, forma-se, em sua superfície uma fina e invisível camada de óxido. Outra importante característica do alumínio é a alta condutibilidade elétrica e elevada condutibilidade térmica, sendo notório seu emprego na transferência de energia térmica, tanto no aquecimento quanto no resfriamento. Portanto os dissipadores de calor são comuns na fabricação de luminárias LED. Destaca-se que o alumínio é um metal não magnético sendo empregado também na proteção de equipamentos eletrônicos. Citações longas, notas de rodapé, paginação, legendas das ilustrações e tabelas, usar tamanho menor. Componentes típicos de um documento desta natureza. Espera-se que as informações aqui expostas possam contribuir para a elaboração da parte técnica de um artigo científico.

2.5.2 – Composição química da liga 6063-T5

Verifica-se na tabela 3 a composição química da liga 6063-T5:

Designação	Dens. g/cm ³	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6063	2,70	0,20-06	0,35	0,10	0,10	0,45-0,9	0,10	0,10	0,10	Restante

Tabela 3 - Composição química da liga 6063.

A classificação das têmperas é composta da letra T e da numeração de 1 a 10. Assim, T5 refere-se à classificação da têmpera deste material, isto é, o material é resfriado bruscamente após um processo de conformação a uma temperatura elevada e depois envelhecida artificialmente.

2.5.3 – Propriedades mecânicas da liga 6063-T5

A tabela 4 demonstra as principais propriedades mecânicas da liga 6063-T5:

Tabela 4 – Propriedades mecânicas da liga 6063-T5.

Liga e têmpera	Diâmetro ou esp. nominal (mm)		Área (mm ²)		Limite de resistência à tração (MPa)		Limite convencional de esc. (MPa)		Along. mínimo (%)	
	Acim a de	Até	Acima de	Até	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	50 mm	5D $5,65\sqrt{A}$
6063-T5	-	12,5	Qualquer		150	-	110	-	8	7
	12,5	25	Qualquer		145	-	105	-	-	7

2.6 – LED (Diodo emissor de luz)

São componentes semicondutores que convertem corrente elétrica em luz. Com o tamanho bastante reduzido, o LED oferece várias vantagens tecnológicas como:

- Longa durabilidade
- Alta eficiência luminosa
- Variedade de cores
- Volumes reduzidos
- Alta resistência a choques e vibrações
- Luz dirigida
- Sem radiação infravermelha e violeta
- Baixo consumo de energia



Figura 5 – LED (diodo emissor de luz da empresa REFOND® modelo 5050) - Fonte:

<http://www.refond.com/> (2018).

3- MATERIAL E MÉTODOS

3.1 – Materiais

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais:

- Câmara térmica e de umidade, ver figura 6:



Figura 6 - Câmara térmica e de umidade - Fonte: Unicoba (2018).

- Medidor de temperatura Multiplex da empresa INVENTFINE[®], ver figura 7:



Figura 7 – Medidor de temperatura multiplex da empresa INVENTFINE ® - Fonte: Unicoba (2018).

- 6 termopares tipo K, ver figura 8:



Figura 8 – Termopares tipo K - Fonte – Unicoba (2018).

- Luminária LED linear 40W com 10 LEDs montados e fonte, ver figura 9:



Figura 9 - Luminária LED linear 40W com 10 LEDs montados e fonte

- Termovisor – câmera termográfica modelo - HTI-3000 – HIKARI ®, ver figura 10:



Figura 10 - Termovisor - câmera termográfica modelo HTI 3000 - HIKARI ® Fonte – Unicoba (2018).

- Adesivo instantâneo multiuso TEK BOND 793, para a fixação dos termopares nos locais de medição da temperatura, ver figura 11:



Figura 11 - Adesivo instantâneo multiuso TEK BOND 793 - Fonte: Unicoba (2018).

- Software de simulação Solidworks Simulation®, ver figura 12:

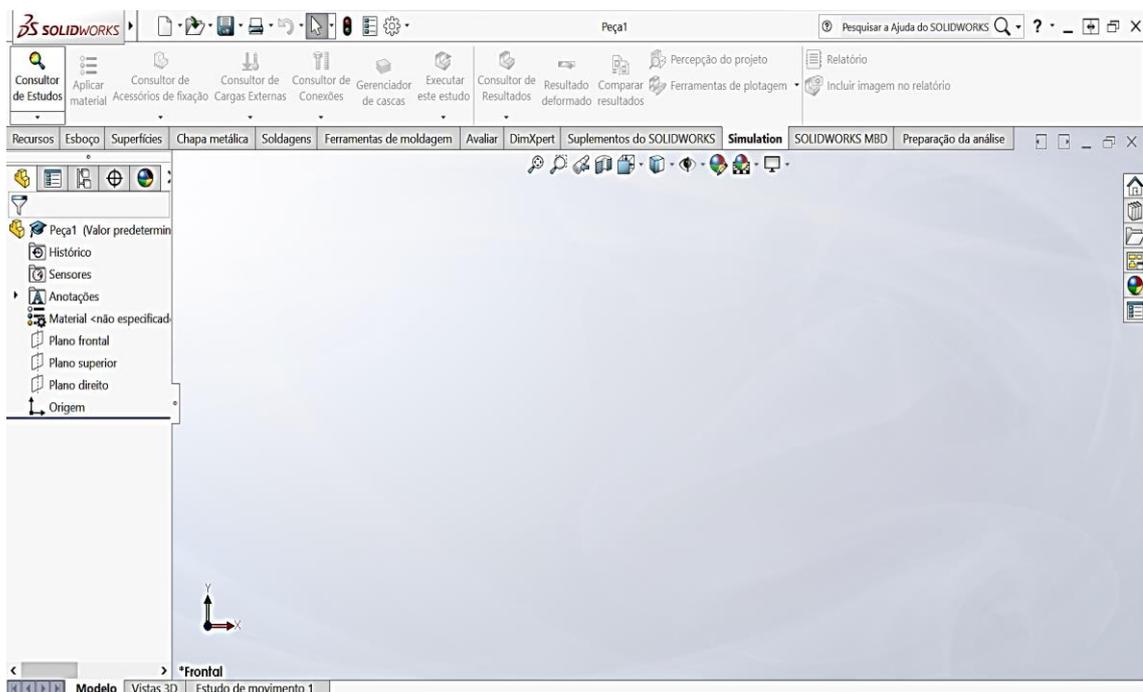


Figura 12 - Software de simulação Solidworks Simulation® - Fonte: Solidworks (2018).

3.2 – Método

Primeiramente desenvolveu-se o projeto 3D do dissipador térmico da luminária linear de 40W, seguindo-se as diretrizes de desenvolvimento e bases conceituais provenientes da experiência no modelamento de dissipadores da empresa Unicoba, ver figura 13 abaixo:



Figura 13 – Dissipador para luminária linear com potência de 40W- Fonte: Solidworks (2018).

Adotaram-se os valores de coeficiente de convecção e temperatura ambiente que são vistos na tabela 5 abaixo e identificados na figura 14:

Tabela 5 – Valores do coeficiente de convecção e temperatura ambiente da mistura

Coeficiente de convecção	8	W /m ² K
Temperatura ambiente da mistura	298,15	K

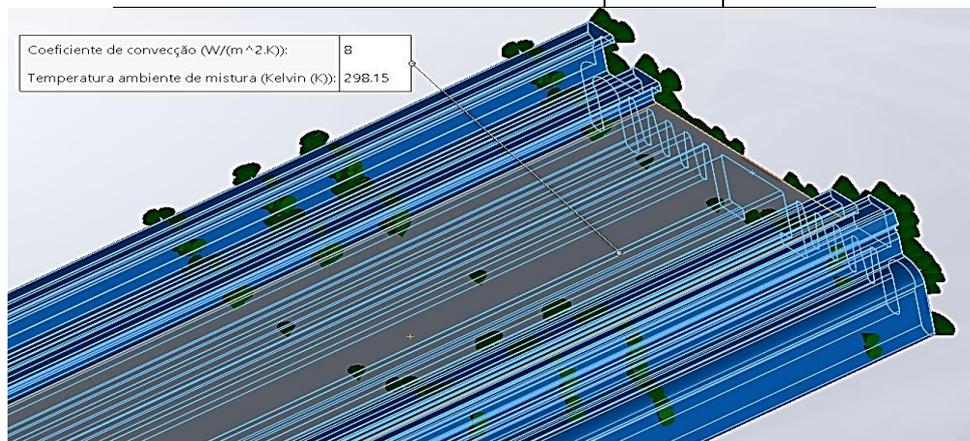


Figura 14 – Coeficiente de convecção e temperatura ambiente - Fonte: Solidworks (2018).

A potência térmica foi determinada como sendo o valor de projeto de 40W da luminária linear; foi distribuída selecionando-se a superfície (destaque azul), como é visto na figura 15 abaixo.

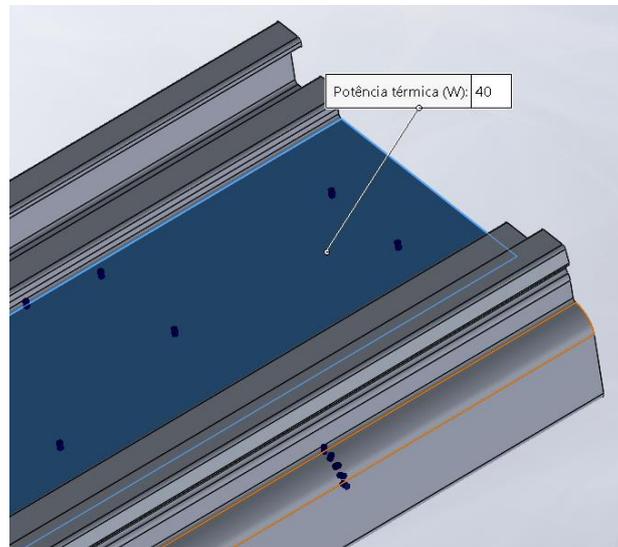


Figura 15 – Potência térmica – 40W - Fonte: Solidworks (2018).

Escolheu-se esta região para a distribuição da potência térmica, pois é a principal área de transferência de calor entre a placa que contém os LEDs e o dissipador de alumínio.

A próxima etapa foi à definição e geração da malha, ver figura 16 abaixo:



Figura 16 – Definição da malha para a realização da análise térmica - Fonte: Solidworks (2018).

Selecionou-se a malha com base em curvatura mais fina com a finalidade de melhorar a precisão do resultado.

As principais características da malha foram definidas conforme a tabela 6:

Tabela 6 – Definição das principais características da malha para o estudo térmico no Solidworks

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado	Malha com base em curvatura
Pontos Jacobianos	4 pontos
Tamanho máximo do elemento	6.02824 mm
Tamanho mínimo do elemento	1.20565 mm
Qualidade da malha	Alta
Total de nós	732522
Total de elementos	417760
Proporção máxima	53.614
Porcentagem de elementos com Proporção < 3	61.2
Porcentagem de elementos com Proporção > 10	1.93
% de elementos distorcidos (Jacobiana)	0

A metodologia física consistiu da instalação de termopares conforme visualizados nas figuras de 17 a 21. Todos os termopares tiveram as suas pontas coladas próximas aos pontos de aferição para o estudo da temperatura nestas regiões. Antes da colagem realizou-se uma limpeza nas superfícies do dissipador para a remoção de possíveis sujeiras com um pano limpo e seco. Em seguida, foi utilizado o adesivo instantâneo multiuso TEK BOND 793 umedecendo com esta cola a região plástica anterior do termopar certificando-se que a ponta metálica não fosse colada.

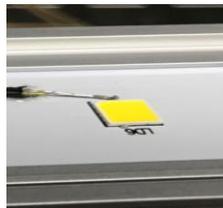


Figura 17 – posição do termopar número 1 próximo ao LED denominado LD6 -0 -

Fonte: Unicoba (2018).



Figura 18 – posição do termopar número 16 na fonte de 40W - Fonte: Unicoba (2018).



Figura 19 – Posição do termopar 5 próximo ao LED denominado LD10 - Fonte: Unicoba (2018).



Figura 20 – Posição do termopar 14 no dissipador - Fonte: Unicoba (2018).

O termopar número 8 foi utilizado na medição da temperatura ambiente da mistura. O termopar número 13 foi utilizado na medição da temperatura no interior da câmara. Na sequência, fixou-se a luminária passando-se presilhas plásticas pelo suporte de fixação mecânico deixando-a na parte interior da câmara térmica. O próximo passo, antes de iniciar a medição térmica, foi identificar, via software, o nome de cada termopar com a finalidade de se obter um relatório preciso conforme visto na figura 21. A partir daí, iniciou-se o teste térmico físico. Utilizou-se o termovisor para averiguar as principais temperaturas encontradas nas superfícies do dissipador, LED e ambiente. Destaca-se que o instrumento auxiliou na visualização das partes quentes da luminária antes da finalização do ensaio realizado com os termopares servindo apenas como um destaque térmico de funcionamento da luminária e para uma medição aproximada dos valores de temperatura alcançados durante o ensaio.

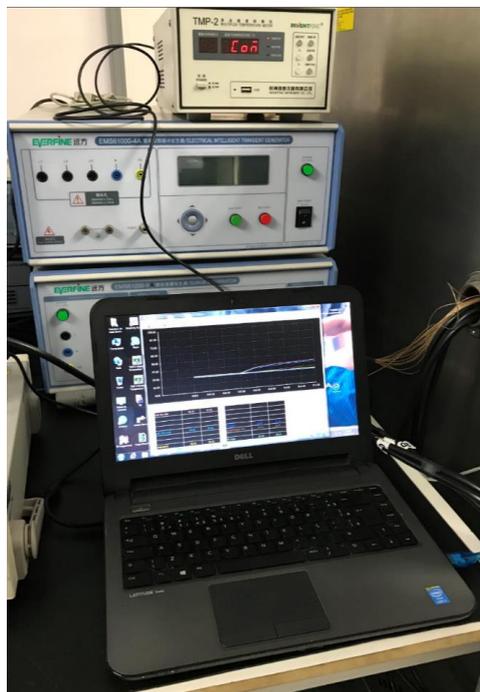


Figura 21 – computador DELL ® e software TMP2 da INVENTIVE FINE ®, utilizados na geração das curvas de temperatura de cada termopar- Fonte: Unicoba (2018).

4 – RESULTADOS

Através dos métodos dos elementos finitos identificou-se o seguinte resultado para uma potência térmica de 40W, coeficiente de convecção de 8 W/m² K e temperatura ambiente da mistura em 298,15 K, ver figura 22:

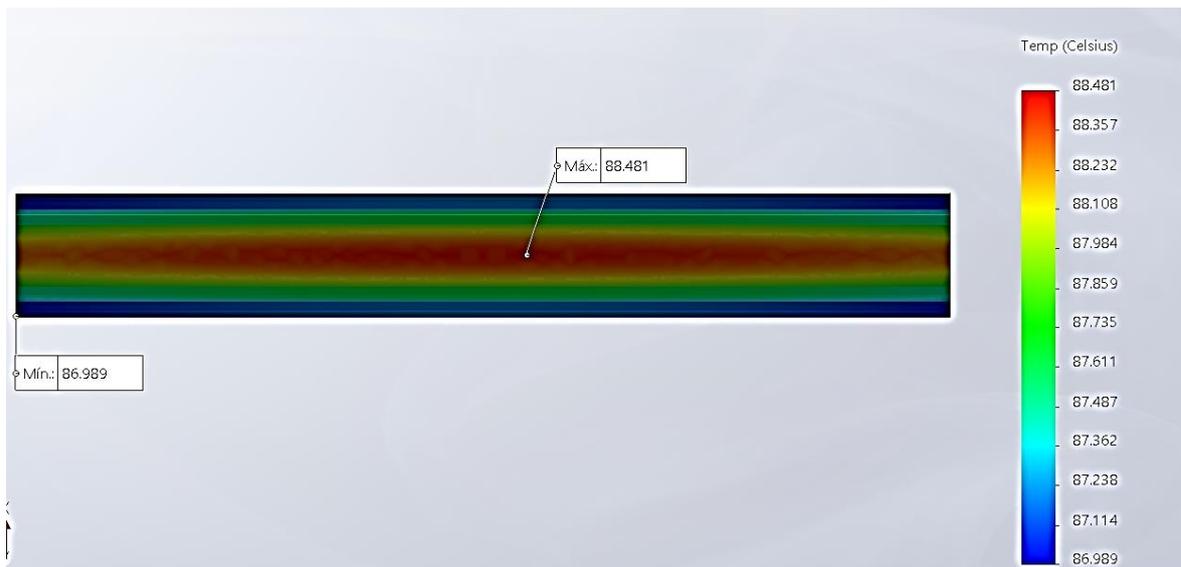


Figura 22 – Resultado da análise térmica por elementos finitos com o software Solidworks Simulation® - Fonte: Solidworks (2018).

O resultado obtido foi a temperatura máxima de 88,481°C no centro do dissipador e valor mínimo de 86,989°C na extremidade do dissipador sendo esta energia térmica transferida pelo dissipador da placa com 10 LEDs para a atmosfera de forma convectiva.

Após a estabilização das curvas de temperatura ocorrida num intervalo de tempo de 2 horas e com a utilização dos termopares previamente instalados nas proximidades dos LEDs, no corpo do dissipador e sobre a fonte no ponto TC (ponto mais quente previsto pelo fabricante da fonte), além da câmara e do ambiente, foram obtidos os seguintes resultados, conforme visto na figura 23 e disposição de dois termopares na figura 24:

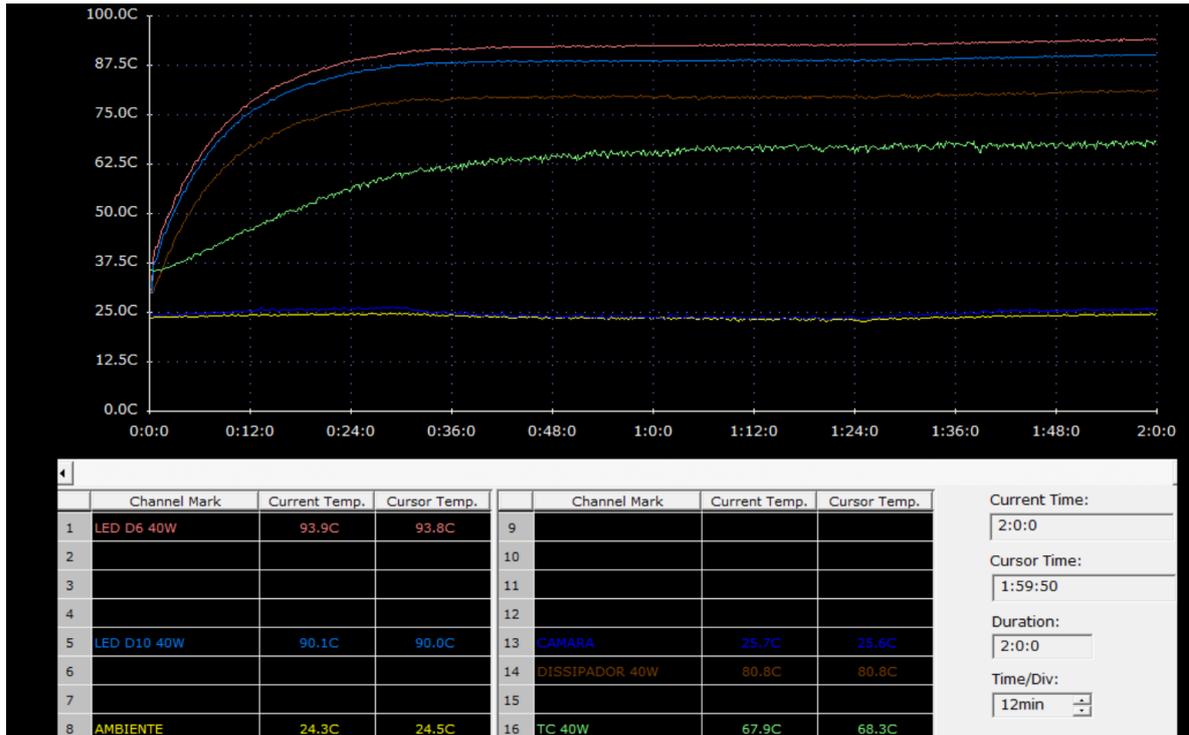


Figura 23 – Resultados obtidos com os termopares instalados - Fonte: Unicoba (2018).



Figura 24 – Termopares instalados nos LEDs 6 e 10 - Fonte: Unicoba (2018).

Com a utilização da câmera termográfica modelo HTI 3000 - HIKARI®, foram obtidos os seguintes resultados conforme verificado na figura 25 e tabela 7 abaixo:

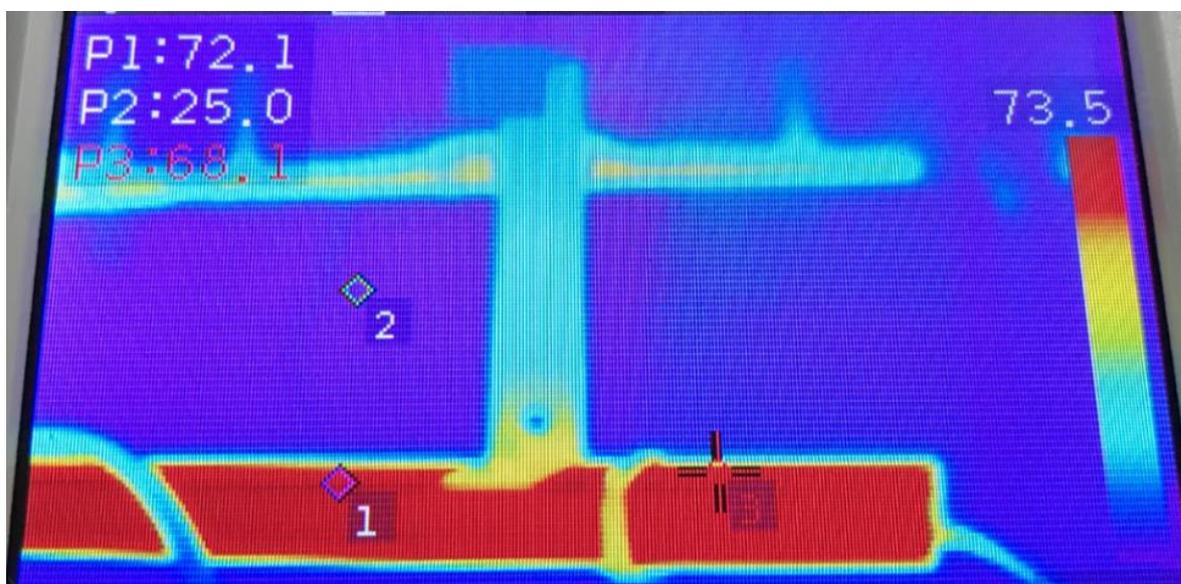


Figura 25 – Resultado da temperatura no dissipador medida com o termovisor HIKARI® após uma hora e trinta minutos de ensaios - Fonte: Unicoba (2018).

Tabela 7 - Valores de temperatura medidos através de termovisor

Pontos de medição	Temperaturas
P1	72,1°C
P2	25°C
P3	68,1°C

CONCLUSÕES

Com este trabalho foi possível verificar que as temperaturas obtidas através do software de simulação Solidworks Simulation® quando comparadas aos valores dos transdutores de temperatura (termopares) instalados no corpo do dissipador ficaram muito próximas como visto na tabela 8 abaixo:

Tabela 8 – Temperaturas do SolidWorks Simulation ® versus termopares

Temperaturas do Solidworks Simulation ®					
Temperatura máxima (centro do dissipador)			Temperatura mínima (extremidade do dissipador)		
88,481°C			86,989°C		
Termopares					
LED D6	LED D10	Ambiente	Câmara	Dissipador	TC (fonte)
93,8°C	90,0°C	24,5°C	25,6°C	80,8°C	68,3°C

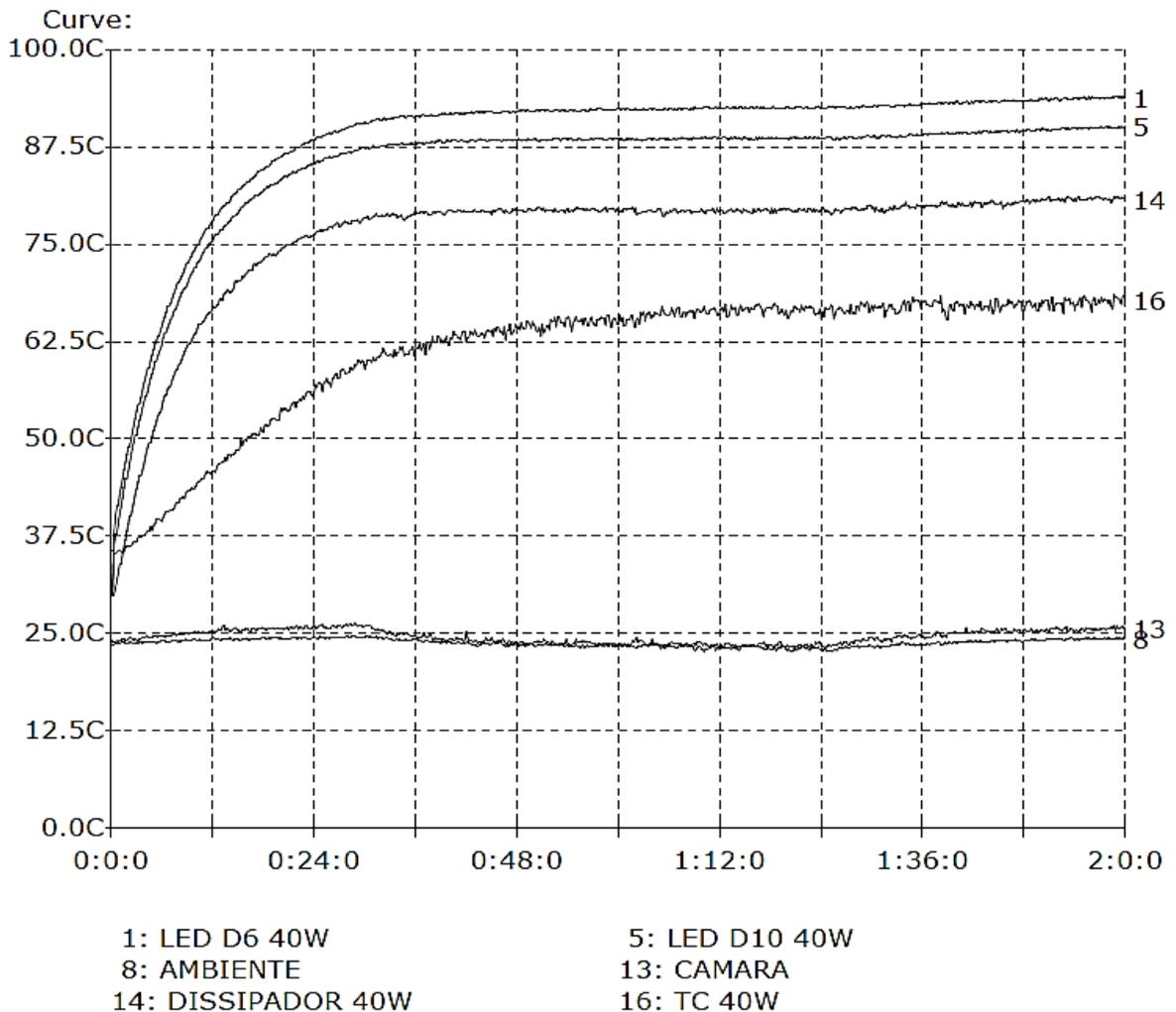


Figura 26 – Gráfico de temperaturas gerado pelos termopares Fonte: Unicoba (2018).

Verificou-se, também, que o projeto geométrico do dissipador está adequado às condições de potência elétrica (40W) e da quantidade de LEDs (10 LEDs por placa), bem como a sua distribuição física ao longo da placa de LEDs.



REFERÊNCIAS

- CREDER, HÉLIO, **Instalações elétricas**. 14^a Edição, Editora LTC, Brasil, 2004.
- HOLMAN, J. P., **Heat transfer**. 10th Edition, McGraw-Hill, New York, 2010.
- INCROPERA, Frank. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7^a Edição, Editora LTC, Brasil, 2014.
- KREITH, FRANK, BOHN, MARK S., **Princípios de transferência de calor**. 6^a Edição, Editora Thomson, Brasil, 2003.
- MCADAMS, W. H., **Heat transmission**. 3^a Edição, Editora McGraw-Hill, New York, 1954.
- MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N., **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 5th Edition, John Wiley & Sons, U.S., 2004.
- MCADAMS, W. H., **Heat transmission**. 3^a Edição, Editora McGraw-Hill, New York, 1954.
- SILVA, MAURI LUIZ DA, **Luz, Lâmpadas e Iluminação**. 3^a Edição, Editora Ciência Moderna, Brasil, 2004.
- WYLEN, GORDON VAN., SONNTAG, RICHARD., BORGNAKKE, CLAUS., **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 3^a Edição, Editora Edgard Blücher Ltda., Brasil, 2001.
- Guia Técnico do Alumínio: extrusão: vol 1**. 5^a Edição, ABAL – Associação Brasileira do Alumínio, São Paulo, 2014.
- CREE – Disponível em <http://www.creeled.com.br/led-o-que-e-e-como-funciona.html> – acesso em 13/02/2018.



LUMILEDS – Disponível em <https://www.lumileds.com/> - acesso em 13/02/2018.

LED Planet – Disponível em <http://www.ledplanet.com.br/led> – acesso em 13/02/2018.

ABAL - Disponível em <http://abal.org.br/> - acesso em 13/02/2018.