EDUARDO REGINATO MARTINS

**COMPARAÇÃO ENTRE OS DESEMPENHOS DE FARÓIS
AUTOMOTIVOS CONVENCIONAIS E AQUELES QUE
EMPREGAM DIODOS EMISSORES DE LUZ**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Automotiva.

São Paulo

2005

EDUARDO REGINATO MARTINS

**COMPARAÇÃO ENTRE OS DESEMPENHOS DE FARÓIS
AUTOMOTIVOS CONVENCIONAIS E AQUELES QUE
EMPREGAM DIODOS EMISSORES DE LUZ**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Automotiva

Área de Concentração: Engenharia Automotiva

Orientador:
Prof. Dr. Tarcisio Antonio Hess Coelho

São Paulo

2005

FICHA CATALOGRÁFICA

Martins, Eduardo Reginato

Comparação entre os desempenhos de faróis automotivos convencionais e aqueles que empregam diodos emissores de luz / E.R. Martins. -- São Paulo, 2005.

87 p.

Trabalho de curso (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

1.Faróis automotivos – História; Desenvolvimento 2.Diodos 3.Emissão da luz I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Tarcísio H. Coelho, que me conduziu de maneira a tornar este trabalho ainda mais interessante e motivador.

Aos amigos que tornaram este trabalho possível: Edgar Alves, Carlos Takata, Carlos de Luca, Vicente A Scopacasa da Lumileds Lighting U.S.; Mário S. Matins e Cláudio Borghi da GDE – Gênesis Devices & Equipments Ltda.

Agradeço também a paciência e incentivos recebidos da minha esposa Cristina durante todo o período de aulas e de elaboração deste trabalho.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo comparativo entre as principais tecnologias utilizadas como fonte de luz para faróis automotivos. Inicialmente, esta dissertação apresenta uma breve introdução sobre a história dos faróis automotivos, desde os primeiros modelos até os protótipos em desenvolvimento que utilizam diodos emissores de luz (LEDs). Estes últimos surgem como uma possível alternativa às tradicionais lâmpadas incandescentes ou àquelas que funcionam por descarga de gás. A tecnologia dos faróis a LED é baseada nos semicondutores emissores de luz “branca” de alto desempenho. Porém, apenas recentemente, esta tecnologia apresentou os primeiros sinais de viabilidade para aplicações automotivas devido ao crescente incremento na intensidade da luz emitida por estes semicondutores.

Para desenvolver o estudo comparativo proposto, foram selecionados três faróis, sendo dois deles representantes das tecnologias atuais e o outro um farol a LED. Foram também estabelecidos critérios para comparação entre os seus desempenhos e realizados ensaios experimentais.

Por fim, este trabalho fornece, sinteticamente, os principais resultados dos ensaios, enumerando as vantagens e desvantagens dos faróis com LEDs frente aos convencionais, além das barreiras existentes para aplicação desta nova tecnologia.

ABSTRACT

This work aims to present a comparative study among main technologies used as light sources for automotive headlamps. Initially, this thesis presents a brief introduction on the history of automotive headlamps, since the first models until the prototypes under development employing Light Emitting Diodes (LEDs). These last ones appear as a possible alternative to either traditional incandescent light or even to gas discharge bulbs. The technology of the LED-headlamps is based on high performance white light emitting semiconductors. In fact, recently this technology presented the first signals of feasibility for automotive applications due to the growing increment in the intensity of the light emitted by these semiconductors.

To develop the proposed comparative study, three headlamps were selected, being two of them representatives of the current technologies and the other one is a LED-headlamp. Some criteria for comparison among their performances had been established and experimental tests were also performed.

Finally, this work supplies, synthetically, the main results of the tests, enumerating the advantages and disadvantages of LED-headlamps in comparison with conventional ones. In addition to, it comments the existing barriers for application of this new technology as well.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Sobre a divisão deste trabalho	3
2. REVISÃO LITERÁRIA	4
2.1 Iluminação automotiva do século XIX ao século XX	4
2.2 Conceitos básicos e resolução normativa – CONTRAN	10
2.3 Características e limitações das tecnologias atuais	13
2.3.1 Faróis convencionais a lâmpadas incandescentes	14
2.3.2 Faróis a lâmpadas de Descarga de gás – HID (High Intensity Discharge)	19
2.4 Ganhos potenciais a partir do uso de LEDs – Lighting Emitting Diodes	26
2.4.1 Princípio de funcionamento do semi-condutor emissor de luz	27
2.4.2 Principais métodos para obtenção de LEDs emissor de luz branca	32
2.4.3 Características dos LED Brancos de alta intensidade	35
2.4.4. Considerações sobre o efeito térmico nos LEDs	40
2.4.5 Principais benefícios e barreiras quanto ao uso de LEDs em faróis automotivos	46
2.5 Comentários e conclusões a respeito da revisão bibliográfica apresentada	51
3. MATERIAL E MÉTODOS	53
3.1 Materiais	53
3.2 Critérios de avaliação entre as tecnologias apresentadas	57
3.2.1 Métodos de ensaios	58

4. RESULTADOS	60
5. DISCUSSÃO	64
5.1 Resumo comparativo dos ensaios realizados em laboratório	64
5.2 Resumo comparativo teórico entre os faróis em estudo	67
5.2.1 Desempenho	67
5.2.2 Aspectos térmicos	68
5.2.3 Resistência mecânica	68
5.2.4 Aspectos ligados ao Estilo/Design do produto final	68
5.2.5 Solução ótica	69
5.2.6 Impacto ambiental e componentes UV e IR	69
5.2.7 Evolução da tecnologia	70
6. CONCLUSÕES	71
6.1 Contribuições deste trabalho	71
6.2 Desvantagens/barreiras a serem desenvolvidas	73
6.3 Estimativa da evolução da eficácia luminosa e custos do LEDs	74
6.4 Propostas para continuidade deste trabalho	75
7. ANEXOS	76
8. REFERÊNCIAS	82
9. APÊNDICES	87
9.1 Definições e relações básicas de fotometria	87

LISTA DE FIGURAS

2.1	Exemplo de lanterna à vela e veículo onde era utilizada	4
2.2	Exemplo de farol à acetileno e veículo onde era utilizado	5
2.3	Selead Beam. Também conhecido no Brasil como “silibim”	7
2.4	Selead Beam e veículo onde era utilizado	7
2.5	Bloco elíptico à lâmpada de descarga de gás	9
2.6	Pontos de medição fotométrica (CONTRAN)	11
2.7	Alcance típico de fecho baixo convencional em “metros”	13
2.8	Módulo básico refletor e lâmpada incandescente	15
2.9	Principais lâmpadas incandescentes utilizadas em faróis automotivos e seus respectivos fluxos luminosos [Lm]	16
2.10	Espectro de luz de uma lâmpada halógena tipo H7	18
2.11	Módulos básicos de um farol à lâmpada de descarga de gás	19
2.12	Espectro de luz típico emitido por uma lâmpada de descarga de gás	21
2.13	Curva característica do diodo	30
2.14	LED tipo sinalizador	31
2.15	Princípios de funcionamento do método “RGB”	32
2.16	Princípios de funcionamento do método “Blue LED + Yellow phosphor”	33
2.17	Princípios de funcionamento do método “UV LED + RGB phosphor”	34
2.18	LED modelo “Luxeon emitter” (fabricante: Lumileds)	35
2.19	Distribuição “Lambertiana” – Intensidade relativa [%] X Abertura [graus]	36
2.20	Distribuição “Side Emitter” - Intensidade relativa [%] X Abertura [graus]	37
2.21	Espectro típico de luz branca emitido por um LED.	38
2.22	Comprimento de ondas para determinadas cores	38
2.23	Sensibilidade média do olho humano em função da cor emitida	39
2.24	Tipos de condução de calor pelo ar sobre um componente eletrônico	40
2.25	Fluxo luminoso [%] X Temperatura de Junção [°C]	43
2.26	Diagrama esquemático de um LED sobre um dissipador de calor	44

LISTA DE FIGURAS (continuação)

3.1	Localização dos termopares na Lente dos faróis avaliados em laboratório	59
4.1	Comparativo Isolux: (a) Halógeno; (b) Xenon e (c) LED – vista horizontal	62
4.2	Comparativo Isolux: (a) Halógeno; (b) Xenon e (c) LED – vista superior	63
5.1	Gráfico comparativo entre as potências	64
5.2	Gráfico comparativo entre as temperaturas na superfície da Lente.	66
5.3	Gráfico: “Eficácia/Custo X Tempo” – Fonte: Bergh et al (2001)	70
7.1	Lente tipo “calota-esférica”	76
7.2	LED com dissipador de calor utilizado no protótipo ensaiado	76
7.3	Farol Protótipo com 6 LEDs na função fecho baixo	77
7.4	Farol Protótipo finalizado	77
7.5	Farol com lâmpada H7 (em produção)	78
7.6	Farol com lâmpada de descarga de gás tipo Xenon (em produção)	78
7.7	Especificação técnica – Philips. Lâmpada tipo H7. (Technical Data Sheet, versão 5.0, 2003 – 1 CD-ROM)	79
7.8	Especificação técnica – Philips. Lâmpada de descarga de gás. (Technical Data Sheet, versão 5.0, 2003 – 1 CD-ROM.)	80
7.9	Especificação técnica – LumiLeds. Luxeon V Star, pag. 4. (Technical Data Sheet, 2004.)	81

LISTA DE TABELAS

2.1 – Principais pontos fotométricos	12
3.1 - Parâmetros utilizados para o cálculo do dissipador	54
3.2 - Valores utilizados e resultado do cálculo da Resistência Térmica “ $R_{\theta_{C-A}}$ ”	55
3.3 - Valores utilizados e resultado do cálculo da área do Dissipador "A"	56
3.4 - Equipamentos utilizados para medição de Potência	58
3.5 - Equipamentos utilizados para medição de Peso	58
3.6 - Equipamentos utilizados para medição da temperatura na Lente	58
3.7 - Equipamentos utilizados para medição fotométrica e Curvas Isolux	59
4.1 - Resultados obtidos nas medições de laboratório	60
4.2 - Resultados obtidos nos ensaios fotométricos	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONTRAN:	Conselho nacional de Trânsito
LED:	Lighting Emitting Diode
HID:	High Intensity Discharge
GDL:	Gas Discharge Lamp
SAE:	Society of Automotive Engineers
UV:	Ultra Violeta
IR:	Infra-Red / Infra Vermelho

1. INTRODUÇÃO

A visão é com certeza o sentido mais importante para orientação das pessoas que se propõem a dirigir um automóvel. Entretanto esta tarefa torna-se impossível de ser realizada durante a noite sem a ajuda dos faróis dianteiros dos veículos, cuja função principal é justamente iluminar a via em que o mesmo se encontra, permitindo ao seu condutor visualizar e avaliar as condições do caminho a percorrer e, sempre que necessário, desviar de obstáculos em tempo hábil, nesta situação os mesmos podem ser considerados como itens de segurança. Além disso, os faróis também têm como função tornar o automóvel visível a outros condutores e iluminar as laterais das vias em que o automóvel trafega, permitindo a identificação e a leitura das sinalizações de trânsito pelo condutor.

Logo após os primeiros automóveis serem apresentados ao mundo, no final do século XIX, surgiu a necessidade de utilização dos mesmos durante a noite. Neste momento inicial foram utilizados os mesmos dispositivos usados nas carruagens, estes na verdade eram lanternas a óleo ou a querosene que em seguida ganharam um espelho ou anteparo de metal polido, atrás da chama, para melhorar a eficiência, concentrando a luz na direção desejada e, para evitar que a chama se apagasse usava-se um vidro transparente como proteção. Isto bastou para permitir passeios noturnos com os primeiros veículos automotores. Mas foi com a invenção da lâmpada incandescente que os faróis automotivos deram um grande salto no seu desempenho e facilidade de uso, ainda no início do século XX. Os próximos saltos significativos em termos tecnológicos vieram a acontecer com o advento do farol selado, vulgarmente conhecido por “silibim”, na década de 20 e depois, já nos anos 90, as lâmpadas de descarga de gás ganharam destaque.

A partir da revisão bibliográfica, dos resultados das avaliações práticas realizadas em laboratório entre faróis com as tecnologias atualmente disponíveis e das informações obtidas juntos aos principais fabricantes de Faróis automotivos e de LEDs - Light Emitting Diodes, (termo em Inglês equivalente em português a “diodo emissor de luz – DEL”), entendemos que uma nova tecnologia de iluminação está neste momento

saindo da fase de ensaios e iniciando o processo de produção em escala. Esta nova tecnologia está baseada na emissão de luz a partir de uma pastilha semi-condutora de alta eficiência que combina a emissão de luzes de várias cores mas principalmente a azul que permite, após uma combinação adequada, uma luz totalmente branca aos olhos humanos, perfeita para qualquer aplicação cujo objetivo final seja iluminar . De fato, o uso de LEDs em lanternas traseiras já é conhecido, a grande novidade no mundo da iluminação automotiva no século XXI é o surgimento dos primeiros faróis dianteiros a LED.

Esta nova tecnologia promete trazer algumas vantagens significativas em relação às anteriores. Dentre elas podemos citar: menor potência para uma mesma iluminação, menor volume ocupado, maior durabilidade, luz sem a componente “infra-vermelho” e uma maior flexibilidade no de “design” proporcionada aos projetistas de veículos. Logicamente tudo isso ainda esbarra em algumas limitações técnicas como “dissipação de calor” e “grandes variações do tom de branco” que os fabricantes dos LEDs e de faróis prometem solucionar nos próximos anos. Além disso, como toda nova tecnologia, os LEDs alta potência ainda apresentam um custo muito elevado para uso em massa nas linhas de montagem atuais.

As informações mais relevantes atualmente sobre o mundo da iluminação veicular serão apresentadas, comparadas e discutidas no decorrer deste trabalho. Ao final deste o leitor será capaz de compreender o cenário atual, formar opinião e discutir sobre aspectos das tecnologias disponíveis, suas limitações e as respectivas soluções propostas atualmente pelos fabricantes e pesquisadores de vários países, ligados pelo tema “iluminação automotiva”.

1.1 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo comparar os desempenhos e limitações das principais tecnologias, atualmente disponíveis para projeto e construção de faróis automotivos, sob o ponto de vista do cliente primário, isto é, da “montadora de veículos” e como cliente final, o usuário do veículo propriamente dito. Desta forma podemos destacar como objetivos centrais deste trabalho:

- Comparar as vantagens e desvantagens das tecnologias existentes atualmente como fontes de luz para os faróis automotivos atuais;
- Mostrar dados obtido a partir de um protótipo real de um farol construído com LEDs Brancos de alta desempenho;
- Comparar os resultados obtidos entre faróis montados com lâmpadas convencionais, lâmpadas de descarga de gás e o nosso protótipo a LED.

1.2 Sobre a divisão deste trabalho

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos, após a introdução feita neste capítulo teremos no segundo capítulo uma revisão bibliográfica sobre os conceitos básicos, legislação, tecnologias disponíveis e um breve relato dos principais problemas de qualidade e limitações dos faróis automotivos atuais. No capítulo 3 serão apresentados as amostras ensaiadas e os meios de medição utilizados em laboratório. O capítulo 4 trará os resultados obtidos nos ensaios de cada amostra e uma discussão sobre os mesmos será feita no capítulo 5. Para finalizar apresentaremos no capítulo 6 as conclusões e considerações finais.

2. REVISÃO LITERÁRIA

Este capítulo apresenta as principais tecnologias utilizadas na construção de faróis automotivos desde o início da história do automóvel. O presente material não tem por objetivo apresentar cálculos óticos ou parâmetros específicos de projeto mas sim descrever alguns aspectos técnicos e as principais limitações das tecnologias atualmente disponíveis. Após esta primeira parte serão apresentadas as informações mais recentes sobre o desenvolvimento de faróis a LED e, por fim, teremos uma breve conclusão a respeito desta revisão bibliográfica que nos facilitará a análise e a discussão final.

2.1 A Iluminação automotiva do século XIX ao século XX.

Os primeiros veículos atingiam velocidades de aproximadamente 15 Km/h, desta forma os faróis não precisavam ter um grande desempenho pois o condutor tinha tempo para reagir ante um obstáculo. Nesta época bastavam lanternas a vela para atender este requisito. Na figura 2.1 é mostrado um exemplo deste tipo de lanterna.

Figura 2.1 – Exemplo de lanterna a vela e veículo onde era utilizada.

Alguns anos depois, no início do século XX, os automóveis já atingiam velocidades maiores e, para viagens noturnas, se fazia necessário uma boa iluminação para que fosse possível antecipar qualquer obstáculo ou outro veículo na estrada. Com a primeira evolução das lanternas a óleo e querosene usadas em automóveis, surgiram os faróis a gás (acetileno) , imitando as conhecidas lanternas usadas pelos mineiros. A figura 2.2 mostra um exemplo deste tipo de farol. Nesta época já considerava-se tais acessórios para iluminação como uma necessidade fundamental para os automóveis da época, o que mais tarde ganharia o status de “item de segurança”. Entretanto, conforme registrado na obra “Faróis de todos os tempos” de Perracini, (1990), o reinado do acetileno foi curto, cerca de 10 anos apenas. Neste período os progressos na arte de concentrar e multiplicar a luz com o uso de refletores foram grandes. Contudo havia um grande fator limitante nesta tecnologia: a distância da chama em relação ao ponto focal do refletor poderia provocar a queima do mesmo.

Figura 2.2 – Exemplo de farol a acetileno e veículo onde era utilizado.

Este problema só foi resolvido com o advento da lâmpada elétrica para automóveis no ano de 1.905 que veio a substituir a chama três anos mais tarde. Este tipo de

lâmpada pode ser milimetricamente posicionada sobre o ponto focal de um refletor parabólico para obter a máxima reflexão. Além disso, esta tecnologia possibilitou projetar a luz de forma mais abrangente ou mais concentrada, dependendo do que fosse mais adequada para cada situação, estrada ou cidade. Nesta fase os novos refletores passaram a ser repuxados ou estampados, em seguida passavam por um processo de prateamento e polimento da superfície refletora, tudo contribuindo para aumentar ainda mais a eficiência dos faróis. Com este aumento da capacidade de iluminar, os faróis passaram a criar um novo problema: o “ofuscamento” dos condutores que vinham no sentido contrário. Como isto afetava diretamente a segurança dos ocupantes dos veículos, logo surgiram leis regulamentando o uso destes dispositivos. Como solução imediata, passou-se a regular o fecho dos faróis para baixo, porém isso diminuía muito o alcance dos mesmos em estrada, tornando a condução do veículo muito perigosa principalmente em locais totalmente sem iluminação.

A solução definitiva veio por volta de 1924 com surgimento das lâmpadas automotivas de dois filamentos. Um dos filamentos era ajustado para projetar a luz para frente permitindo um maior alcance, denominado fecho alto, e o outro possuía um escudo defletor, assim a luz produzida por este podia ser refletida somente para baixo, clareando a estrada sem causar ofuscamento aos demais condutores.

Em nossa pesquisa bibliográfica encontramos registrado por Perracini (1990) o ano de 1.939 como sendo o ano de lançamento dos primeiros faróis “Sealed Beam”, fabricado pela empresa “General Electric” nos Estados Unidos e vulgarmente conhecido no Brasil como “silibim”. (vide exemplo mostrado na figura 2.3, fabricado pela GE). Entretanto, em uma publicação da ARTEB (2004) apresenta um veículo Marmon, modelo 1928, que já utilizava um farol selado, conforme mostrado na figura 2.4. Na verdade este tipo de farol pode ser interpretado como uma grande lâmpada de vidro, cuja parte frontal formava uma lente prismada e a parte traseira era constituída por um refletor parabólico espelhado por uma camada de alumínio brilhante. O segredo desta tecnologia estava no interior do conjunto, totalmente selado, que era cheio de gás inerte.

Figura 2.3 – Sealed Beam. Também conhecido no Brasil como “Silibim”.

Marmon 1928

Figura 2.4 – Sealed Beam e veículo onde era utilizado

NOTA: A luz emitida pelo fecho baixo, se projetada contra uma parede, concentra seu foco entre a linha horizontal formada pelos faróis e o solo. Esta linha passou a ser denominada de “linha de corte”, usada justamente para se definir um limite para não

causar o ofuscamento. Problema este que para o facho alto não é considerado pois, é de bom senso que o condutor só fará uso do mesmo quando não existirem outros veículo a sua frente.

Em termos quantitativos, encontramos registros de que o alcance do facho alto deste tipo de farol ultrapassava facilmente os 100m, já o facho baixo ficava abaixo dos 50m. Essa visibilidade reduzida do facho baixo significa na prática que a uma velocidade de 50 Km/h, o condutor teria apenas de 2 a 3 segundos para reagir ante a um obstáculo, um pedestre, ou mesmo um outro veículo. Ainda segundo Perracini (1990), em 1.931 René Renaud sugeriu que parte do facho de luz baixa fosse dirigido para a direita num ângulo de 15 a 20 graus. Assim, parte da estrada continuaria sendo parcialmente iluminada sem ofuscar o condutor que viesse no sentido contrário. Princípio este que passou a integrar a regulamentação européia para veículos automotivos.

Alguns anos depois, entre 1.948 e 1957, surgiu o conceito dos faróis assimétricos que vieram a apresentar a melhor solução para o problema de ofuscamento, conforme descrito por Perracini (1990) e também no registro da ARTEB (2004) sobre a história da iluminação automotiva. No capítulo 2.3.1 detalharemos os componentes básicos deste tipo de farol.

Em meados do século XX, foram projetados com o auxílio do computador, refletores nos quais cada ponto da sua superfície podia refletir luz numa determinada direção. Estes faróis também são conhecidos atualmente como de “superfície complexa”. Como consequência deste novo conceito foi possível eliminar o “escudo defletor” que chegava a anular até 45% do fluxo luminoso da luz baixa. Esta luz que até então era perdida passou a ser aproveitada no fluxo luminoso do farol e como consequência, com luz adicional, atualmente é possível projetar faróis menores sem prejudicar significativamente sua eficiência.

Ainda dentro da tecnologia de faróis com lâmpada incandescentes, surgiram no final do século XX os primeiros automóveis produzidos em série com faróis projetados

com os chamados “blocos elípticos”, cujo desempenho e alcance são ligeiramente superiores aos faróis parabólicos descritos anteriormente.

Mais tarde, ainda no final do século XX, surgiram os primeiros faróis dotados de “lâmpadas de descarga de gás”, também conhecidos como faróis Xenon ou Litronic, conforme descrito no “Automotive Handbook” da BOSCH (2000).

Na figura 2.5 temos a ilustração de um dispositivo formado por uma lâmpada de descarga de gás montado num bloco elíptico. Na subseção 2.3.2 detalharemos os componentes básicos deste tipo de farol.

Figura 2.5 – Bloco elíptico com lâmpada de descarga de gás.

2.2 Conceitos básicos e resolução normativa - CONTRAN

Conforme evidenciado nos automóveis atuais e descrito no manual BOSCH (2000), os faróis são compostos basicamente por um conjunto de funções, incluindo:

- Farol baixo e Alto
- Farol auxiliar ou de neblina
- Indicador de direção, também conhecido popularmente como “pisca”
- Luzes de posição
- Iluminação diurna (“Daytime Running” - função que torna o veículo mais visível mesmo durante o dia), item restrito a legislação de alguns países europeus

A regulamentação veicular de cada país estabelece normas sob as quais os faróis automotivos devem ser testados e aprovados, antes mesmo de cada modelo ser comercializado. Além disso, esta regulamentação também estabelece vários parâmetros que o veículo como um todo deve atender. Apenas como exemplos desses parâmetros podemos citar: a altura de regulagem do fecho baixo e as distâncias mínimas e máximas que os faróis devem estar posicionados tanto do solo como entre si. No Brasil esta regulamentação é estabelecida pela Resolução 692/88 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Esta resolução foi totalmente baseada na legislação européia ECE. Já nos Estados Unidos a norma equivalente em vigor é a FMVSS 108, esta última difere consideravelmente das duas primeiras e portanto, os faróis concebidos para atenderem a norma européia (ECE) estarão automaticamente aprovados para uso no Brasil, em contra partida, os faróis concebidos para atender a norma americana (FMVSS 108) não estão autorizados para uso no território nacional. Afirmação esta que pode ser corroborada através da apresentação conjunta feita à ANFAVEA por Guiguer; Takata (1.999).

Neste trabalho limitaremos nossos estudos à faróis concebidos para as especificações ECE e CONTRAN e focaremos as funções do fecho baixo e alto para efeito comparativo entre as tecnologias estudadas.

Figura 2.6 – Pontos de medição fotométrica (CONTRAN).

A principal diferença entre as normas, segundo Guiguer; Takata (1999), está na exigência de uma “Linha de Corte” para a função “facho baixo” para as normas ECE e CONTRAN. A figura 2.6 mostra a localização dos pontos de medição sobre um plano vertical posicionado a 25 metros da fonte luminosa projetada.

A descrição dos pontos fotométricos principais para das Normas ECE e CONTRAN estão descritos na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Principais pontos fotométricos

Pontos	Facho baixo	Especificação [lux]
H	Trajectoria do condutor que vem no sentido contrário	0,7 (máx.)
50L	Idem a 50 metros de distância	0,4 (máx.)
75R	Ponto de iluminação a 75 m à direita ao nível do solo	12,0 (mín.)
50R	Idem a 50 metros de distância	12,0 (mín.)
50V	Ponto de iluminação a 50m na trajetória ao nível do solo	6,0 (mín.)
25R	Ponto de iluminação a 25m à direita ao nível do solo	2,0 (mín.)
25L	Ponto de iluminação a 25m à esquerda ao nível do solo	2,0 (mín.)
Z4R	Área de iluminação intermediária	3,0 (mín.)
Pontos	Facho alto	Especificação [lux]
H	Iluminação ao centro da trajetória do veículo	48,0 (mín.)
L1	Largura – 1,125m a esquerda a partir de H	24,0 (mín.)
R1	Largura – 1,125m a direita a partir de H	24,0 (mín.)
R2	Largura – 2,25m a direita a partir de H	6,0 (mín.)
L2	Largura – 2,25m a esquerda a partir de H	6,0 (mín.)

A Linha de Corte define duas regiões a frente do veículo, uma escura e uma iluminada, ambas delimitadas por uma linha próxima a linha do horizonte. Esta configuração permite iluminar a rodovia e minimizar o desconforto causado ao condutor que vem no sentido oposto, através do correto posicionamento desta linha. Ao desconforto causado pelo efeito da luz incidindo diretamente no olho do condutor que vem no sentido contrário dá-se o nome de ofuscamento ou “glare”, termo usado nas literaturas internacionais.

A figura 2.7 mostra uma vista longitudinal superior exemplificando o efeito do facho baixo sobre uma rodovia.

Figura 2.7 – Alcance típico de um feixe baixo convencional em “metros”.

O projeto ótico do farol deve primeiramente proporcionar simultaneamente a melhor distribuição de luz a frente do veículo e o menor ofuscamento possíveis. Além disso, também de fundamental importância é a necessidade de projetar luz suficiente para iluminar as laterais da rodovia, bem como a sinalização da mesma.

Desta forma já podemos perceber que a iluminação automotiva é alvo de constantes pesquisas de desenvolvimento, visto que os requisitos óticos de projetos são concorrentes entre si.

2.3 Características e limitações das tecnologias atuais

Para obter a iluminação necessária ao atendimento às normas mencionadas na seção anterior existem hoje duas tecnologias principais, ambas usadas em escala de produção para prover a fonte de luz necessária ao funcionamento dos faróis automotivos atuais. A primeira delas, a base de lâmpadas incandescentes, vem a várias décadas sendo praticamente a única tecnologia usada em escala de produção por apresentar o melhor custo benefício, no entanto, no início desta década a mesma começou a perder espaço para uma segunda tecnologia, a base de lâmpadas de descarga de gás, porém ainda serão necessários muitos anos, para que a primeira perca o primeiro lugar em termos de unidades produzidas mundialmente. Quanto à segunda tecnologia, apesar de apresentar melhor eficácia, termos usado para a relação “lumens/watt”, só é encontrada atualmente em alguns modelos de

automóveis produzidos na Europa, América do Norte e Japão devido ao alto custo dos seus componentes eletrônicos.

A seguir destacamos os componentes básicos de cada uma dessas duas tecnologias , segundo a sua ordem de evolução:

2.3.1 Faróis convencionais a lâmpadas incandescentes

A partir de lâmpadas incandescentes foram concebidos os faróis automotivos mais utilizados e conhecidos da história do automobilismo, conforme já relatado no primeiro capítulo deste trabalho. Este tipo de farol tem como característica principal a qualidade e o desempenho que estão diretamente relacionadas com o tamanho do seu refletor, isto é, inicialmente quanto maior a superfície refletora melhor será sua capacidade de transformar a luz proveniente da lâmpada em iluminação útil para o condutor do veículo. A figura 2.8 mostra um padrão básico desta configuração de lâmpada e refletor. Por outro lado, a geometria do refletor é comumente restringida por outros fatores importantes para um veículo, como a “aerodinâmica” e o próprio “design” do automóvel, este último fator tende a tornar os faróis modernos cada vez mais em itens decorativo, com um forte apelo visual, e não mais num item simplesmente funcional e/ou de segurança, como foram inicialmente concebidos.

Figura 2.8 – Módulo básico Refletor e Lâmpada incandescente.

Conforme mencionado no início deste capítulo, a eficácia atual da função principal do farol que é “iluminar” dada pela relação “lumens/watts” e, conforme descrito no manual BOSCH (2000) e catálogo eletrônico do fabricante de Lâmpadas incandescentes PHILIPS Automotive Lighting (2003), varia entre 10 e 18 Lumens/watts para lâmpadas com bulbo a vácuo e entre 20 a 25 lumens/watt para lâmpadas do tipo halógenas, cujo filamento de tungstênio pode trabalhar a temperaturas mais altas. Podemos dizer que esta última encontram-se hoje em praticamente todos os faróis convencionais fabricados atualmente. Na figura 2.9 encontramos as lâmpadas incandescentes mais comumente usadas nos faróis atuais.

No decorrer deste trabalharemos trataremos este tipo de farol como simplesmente “halógenos”, como são atualmente conhecidos

Figura 2.9 – Principais Lâmpadas incandescentes utilizadas em faróis automotivos e seus respectivos fluxos luminosos em lumem [Lm] (*)

* TAKATA, C. (Valeo Iluminação) Concepção fotométrica de faróis. (Seminário, São Paulo , 2000)

Principais pontos negativos do sistema a lâmpada incandescente:

- Alta temperatura

A luz deste tipo de lâmpada é gerada pelo aquecimento de um filamento de tungstênio que atinge temperaturas muito altas, geralmente acima de 2.400°C , que por sua vez isso faz com que a temperatura na superfície do bulbo de vidro da lâmpada atinja aproximadamente 600°C , conforme apresentado em boletins técnicos da Philips (2003). Todo este calor é transmitido para ambiente interno do farol sob a forma de irradiação e para resistir a essas altas temperaturas se faz necessário o uso de materiais mais nobres, com altíssima resistência térmica, na construção dos componentes principais dos faróis como: a lente, a moldura e o refletor.

- Manutenção devido a queima da lâmpada

Motivadas por falhas de processo, impactos mecânicos, vibração e principalmente a alta temperatura de trabalho, este tipo de lâmpada tem uma expectativa de vida menor do que as lâmpadas de descarga de gás que serão discutidas a seguir.

- Condensação de água devido a troca de ar pelos inevitáveis sistemas de ventilação:

É comum encontrarmos faróis embaçados, principalmente em dias de chuva. Este problema na verdade é um fenômeno físico que ocorre devido a constante troca de ar que ocorre no interior dos faróis convencionais. Ao ser ligado o ar no interior do farol expande e sai pelo sistema de ventilação devido a alta temperatura gerada pela lâmpada, ao ser desligado o processo se inverte e o ar é trazido para o interior do farol, com uma dada umidade, pelo mesmo caminho. Esta dada umidade tende a se condensar e a se concentrar nas chamadas “regiões frias” dos faróis, que normalmente encontram-se próximas a função indicadora

de direção, mais conhecida como função “pisca”, e nas demais extremidades do farol.

- Infiltração de água :

Devido ao problema térmico e a necessidade de manutenção das lâmpadas, já mencionados nos itens anteriores, este tipo de farol não pode ser totalmente vedado. Assim sendo, existem pontos de vulnerabilidade ao ingresso de água, inerentes aos faróis que adotam este tipo de tecnologia.

- Componentes UV e IR:

As componentes de luz UV (ultra violeta) e IR (infra vermelho) que compõem o espectro de luz de uma lâmpada, similar à mostrada na figura 2.10 e fabricada pela OSRAM (2004), não são visíveis ao olho humano. Portanto, a energia gasta para gerar estas componentes, além de não ser útil a função principal do farol (iluminar) também produz efeitos secundários indesejados como a degradação de materiais como os alguns polímeros usados na construção dos faróis automotivos e o aquecimento por radiação, muitas vezes danos à nossa aplicação;

Figura 2.10: Espectro de luz de uma lâmpada halógena tipo H7.

2.3.2 Faróis a lâmpadas de Descarga de gás – HID (High Intensity Discharge)

No início da década de 90 uma nova tecnologia de lâmpadas automotivas foi apresentada como fonte de luz alternativa para os faróis dianteiros. Em substituição às lâmpadas incandescente foram disponibilizadas pelos principais fabricantes as “Lâmpadas de Descarga de Gás” ou “Gas Discharge Headlamp” – (GDL). Conforme citado em várias bibliografias disponíveis, por exemplo o Manual BOSCH (2000), o farol GDL é constituído por 3 sub-sistemas básicos: a lâmpada de descarga de gás, o “Ballast System” e os componentes restante similares a um farol halógeno convencional. A figura 2.11 mostra os módulos básicos de um farol a lâmpadas de descarga de gás.

1. *Lente do Farol*
2. *Lâmpada de descarga de gás*
3. *Módulo de ignição (Ballast System)*
4. *Módulo de Controle (Ballast System)*

Figura 2.11 – Módulos básicos de um farol a lâmpada de descarga de gás.

Esta tecnologia agrega ao farol, através do chamado “Ballast Ssystem” mais dois componentes eletrônicos: a unidade de ignição (STARTER) e a unidade de controle eletrônico que permitem ao gás no interior do bulbo da lâmpada trabalhar num regime contínuo. Este sistema permite que uma lâmpada cujo interior contenha determinado tipo de gás, Xenon por exemplo, emita um fluxo luminoso superior a duas vezes ao produzido por uma lâmpada convencional tipo “H1”, conforme catálogo do fabricante PHILIPS. Com estas e outras características este sistema permite produzir faróis de maior desempenho e confiabilidade, podendo ser encontrados atualmente em alguns veículos de alto padrão, fabricados principalmente na Europa e América do Norte. Abaixo detalhamos os componentes principais e princípio de funcionamento dos faróis baseados nesta tecnologia.

Lâmpada de descarga de gás:

No lugar de um filamento de tungstênio incandescente esta lâmpada irradia luz através da ionização do gás, geralmente Xenon, contido no interior do bulbo de vidro. Desta forma a energia elétrica é convertida diretamente em radiação luminosa, grande parte dela na frequência visível ao olho humano, cujo comprimento de onda varia entre 380 nm a 780 nm. Isto melhora consideravelmente a eficácia luminosa para índices em torno de 90 lumens/watt. Apenas para uma noção comparativa, este índice é de aproximadamente 25 lumens/watt para as lâmpadas halógenas, conforme já mencionado 2.2.1.

Além disso, e de modo similar às halógenas, as lâmpadas de descarga de gás também possuem em seu espectro as mesmas componentes UV e IR, indesejadas para a nossa aplicação. Um exemplo deste espectro de luz é mostrado na figura 2.12, onde é apresentado o espectro de luz de uma lâmpada deste tipo fabricada pela OSRAM (2004).

Figura 2.12: Espectro de luz típico emitido por uma lâmpada de descarga de gás.

Ballast System :

Este subsistema tem como função principal limitar a corrente fornecida à lâmpada e comandar o processo de “start” (inicialização) do farol. Para atender os requisitos de início de funcionamento da lâmpada de descarga, este conjunto eletrônico eleva a tensão imposta a lâmpada ao redor de 25.000 volts, além de limitar a corrente elétrica de forma que a potência da lâmpada fique em torno de 75 watts no início do ciclo. Após este ciclo inicial a lâmpada entra no regime contínuo de operação, a partir deste momento este sistema reajusta sua corrente para valores abaixo de 0,5 Ampére, conforme descrito no manual BOSCH (2000), deste modo a lâmpada passa a operar numa faixa de potência mais baixa, da ordem de 35 watts. Comparando com a potência de uma lâmpada incandescente, 55 watts, temos uma economia bastante significativa no consumo de energia. Esta economia torna-se mais evidente quando somamos os dois faróis do veículo, isto é, o lado esquerdo mais o lado direito.

Farol:

De modo análogo aos faróis a base de lâmpadas incandescentes, este tipo de farol possui um sistema ótico composto por: refletor, lente e mecanismos de regulação de feixe, para guiar a luz emitida pelo mesmo e ao mesmo tempo manter os índices de ofuscamento dentro dos níveis permitidos por norma.

Nota: A segunda geração de lâmpadas de descarga de gás, conhecida com Bi-Xenon, disponível no mercado a partir do final da década de 90, permite gerar os feixes alto e baixo do farol simultaneamente, de modo análogo a lâmpada incandescente tipo “H4” mas com uma maior eficácia, conforme descrito no manual BOSCH (2000) e confirmado através do catálogo do fabricante de lâmpadas PHILIPS (2003).

Principais pontos positivos do sistema a lâmpada de descarga de gás:

Sem dúvida o fato positivo mais relevante do sistema a lâmpada de descarga de gás é a superioridade do fluxo luminoso com um menor consumo de potência, permitindo a ótica do farol projete mais luz sobre a rodovia e sobre os campos de visão laterais à mesma. Isto conduz automaticamente a um aumento da segurança proporcionada ao condutor e aos ocupantes do veículo, conforme já publicado por Derlofske et al. (2002) do “Lighting Research Center” de Michigan, USA.

Uma segunda característica positiva deste tipo de luz emitida pelas lâmpadas de descarga de gás está relacionada a segurança e encontra-se bem detalhada em pelo menos dois estudos sobre a influência do espectro da luz por este tipo de lâmpada no desempenho visual dos seres humanos, também realizado pelos autores e pesquisadores do “Lighting Research Center”, Derlofske et al (2003). Neste artigo os autores relatam suas experiências, realizadas com várias pessoas de idade entre 23 e 42 anos, onde foram medidos os “tempos de reação” e a “porcentagem de sinais perdidos” por estas pessoas, ao conduzirem veículos sob condições de baixa luminosidade que simulavam situações noturnas fora de áreas urbanas, isto é,

somente com a iluminação natural. O mesmo tipo de experimento foi repetido com faróis a lâmpadas de descarga de gás, lâmpadas incandescentes e respectivamente os dois extremos do espectro da luz branca, “tons de luz fria tendendo ao azulado” (ligeiramente superior a luz emitida pelas lâmpadas de descarga de gás) e uma “luz quente tendendo ao amarelado” (ligeiramente superior a luz das lâmpadas incandescentes). Os resultados destes estudos não deixam dúvidas de que “as lâmpadas de descargas de gás propiciam uma melhoria pequena mas mensurável”, no desempenho visual das pessoas, favorecendo a segurança e principalmente permitindo aos condutores antecipar determinadas situações de perigo ao dirigirem durante a noite. Os números ficam ainda mais evidentes quando comparamos os resultados obtidos pelas 10 pessoas quando submetidas aos extremos do espectro da luz branca, o azul (luz fria) e o amarelo (luz quente).

Este fato foi explicado pelos autores através da existência de dois tipos de células foto-sensoras no olho humano, a primeira chamada de “cones”, usadas quando a luz ambiente é abundante como acontece durante o dia, e a segunda chamada de “hastes” que entram em ação quando a luz ambiente é muito baixa, até $0,3 \text{ cd/m}^2$. Porém é preciso mencionar que além dessa característica do olho humano, existem mais dois fatores que também influenciam o resultado, o “tamanho” e o “contraste” dos sinais a que as pessoas foram submetidas durante os experimentos.

Uma terceira característica positiva deste sistema de farol é a maior facilidade de adapta-los a “designs” mais aerodinâmicos para os automóveis, isto porque com uma maior eficiência luminosa não são mais necessários grandes refletores, permitindo aos engenheiros projetar faróis com perfis mais baixos.

Principais pontos negativos do sistema a lâmpada de descarga de gás:

Podemos citar como principal ponto negativo deste tipo de tecnologia “a existência de componentes eletrônicos adicionais”. Esta é sem dúvida uma desvantagem em relação aos faróis a lâmpada incandescente, não só pelo custo mas também pela complexidade deste sistema.

Em segundo lugar o peso deste tipo de farol, em média 1Kg a mais do que os faróis halógenos devido aos componentes adicionais, vai contra a meta da indústria automotiva que é justamente “diminuir o peso total do veículo”, proporcionando economia de combustível e redução de custo ao mesmo.

Pelas características acima descritas explica-se o custo adicional deste tipo de farol quando comparado aos tradicionais à lâmpada incandescente. Porém, o farol a lâmpada de descarga de gás, ou Xenon como ficou conhecido no mercado, traz um apelo de marketing que pode justificar este custo adicional em veículos de categorias superiores.

Uma outra desvantagem deste tipo de farol à lâmpada de descarga de gás, segundo apresentado nos estudos já citados de Derlofske et al. (2003 e 2003) e por Stoult (2004) relacionados ao ofuscamento, é justamente o aumento do desconforto causado ao condutor do veículo que vem no sentido contrário, devido ao fato de que a sua luz apresenta um tom mais azulado, características das cores classificadas como “frias”. Por outro lado, a luz produzida por lâmpadas incandescentes tem um amarelado, característica das cores classificadas como “quentes”, diminui este desconforto relatado nos estudos.

OBS: Embora a conclusão destes trabalhos não deixe claro se este ofuscamento adicional, causado por luzes tendendo a cores “frias”, efetivamente deteriore o desempenho do condutor ao dirigir em vias de mão dupla, é consenso entre os pesquisadores do meio que a luz branca com um tom “amarelado” causa uma sensação de maior conforto na maioria das pessoas.

Desempenho e Penetração de Mercados dos faróis com Lâmpadas de Descarga de Gás:

Atualmente os faróis a lâmpada de descarga de gás, como já mencionado neste trabalho, são encontrados principalmente em veículos de alto padrão produzidos na Europa e América do Norte. O artigo escrito por Hamm (2004) e publicado pela SAE no início de 2005, apresenta entre outras informações a penetração deste tipo de farol nos três principais mercados automobilísticos mundiais (Europa, Estados Unidos e Japão/Ásia). Como algumas das conclusões deste estudo podemos destacar que atualmente existem diferentes níveis de penetração deste tipo de farol nos três mercados analisados. Além disso, a questão de estilo e aceitação em cada mercado exerce um grande impacto sobre estes resultados e não há uma tendência de que estes números tornem-se equivalentes nos três mercados citados pois a idéia inicial de que um modelo de carro atenda todos os mercados mundiais não tem se mostrado verdadeira.

2.4 Ganhos potenciais a partir do uso de LEDs – Lighting Emitting Diodes

Como dissemos na introdução deste trabalho, uma nova tecnologia na área de iluminação vem ganhando destaque nos últimos anos graças ao crescente desenvolvimento do desempenho dos “diodos emissores de luz branca”. Esta afirmação também foi feita por Tabolt (2003) em matéria para a revista “Technology Review”. Na verdade, este dispositivo semicondutor foi desenvolvido no início dos anos 60, porém até poucos anos estes eram usados somente como sinalizadores devido sua baixa potência até então.

Diferença entre sinalização e iluminação: Sinalizadores são fontes de luz cujo nível de emissão permite que os mesmos sejam vistos diretamente pelas pessoas, como exemplo desta aplicação podemos citar desde indicadores de painéis eletrônicos até semáforos para controle de tráfego. Já o termo “iluminação” refere-se a fonte de luz cuja emissão é suficiente para tornar um outro objeto visível através da reflexão dessa luz emitida.

Contundo, segundo artigo de Talbolt (2003), foi no final da década de 90 que Nakamura publicou estudos bem sucedidos a respeito de LEDs de alta potência na cor branca como fonte de iluminação, conforme artigo do “Rensselaer Polytechnic Institute” de Nova York, EUA. De fato a aplicação de LEDs de alta potência promete ser uma verdadeira revolução no mundo da iluminação em geral e não somente no meio automotivo. Segundo artigo da Thechnology Review (2000), um estudo do departamento de Energia dos Estados Unidos estima que o uso de LEDs de alto desempenho em iluminação geral poderá significar uma redução de 10% no consumo de energia elétrica daquele país, isto por volta do ano de 2.025 quando a produção em escala deverá estar consolidada.

Principais vantagens do LED sobre as fontes de luz convencionais

Dentre as vantagens citadas pelos artigos consultados podemos destacar como principais: Maior durabilidade e conseqüente menor custo de manutenção; Ausência

de luz Infra-vermelho responsável pelo aquecimento direto por radiação; Menor tempo de acionamento; Tendência de rápido aumento na sua eficácia, podendo ultrapassar “50 lumens/watt” nos próximos anos; Maior “robustez” quanto a solicitações mecânicas como impacto e vibração. Ausência de materiais pesados como o mercúrio e o chumbo ainda encontrados em algumas lâmpadas. Além de possibilitar inúmeras inovações em termos de “design” e estilo devido as suas dimensões reduzidas e grande flexibilidade quanto a sua aplicação.

Principais desvantagens dos LEDs sobre as fontes de luz convencionais

No momento, além das barreiras de custos que deverão diminuir ao longo dos anos, temos o problema térmico. Apesar da luz emitida pelo LED não gerar calor, parte da energia elétrica é transformada em calor na junção do semi-condutor. Este problema será discutido no decorrer deste capítulo.

2.4.1 Princípio do “Diodo” semicondutor e do “Diodo Emissor de Luz – LED”

Um diodo é um dispositivo eletrônico semicondutor que permite a passagem de corrente elétrica num único sentido. Para tornar possível este efeito usa-se um material com baixa capacidade de conduzir corrente, geralmente o silício. Para a grande maioria das aplicações, nesta condição não há elétrons livres para produzir corrente. Para torná-lo passível de várias aplicações utiliza-se um processo conhecido por “dopagem”. Neste processo são inseridas “impurezas” no cristal de silício, através da adição de átomos de outros elementos para que surjam tanto “elétrons livres” quanto “lacunas” (falta de elétron), o que os caracterizarão respectivamente como um semicondutor “tipo-n” ou “tipo-p”. Após este processo o semicondutor passa a ser chamado de extrínseco, conforme descrito por Malvino (1984).

Semicondutor tipo-n

Para se conseguir mais elétrons livres, podemos acrescentar átomos pentavalentes, estes átomos têm cinco elétrons na sua órbita de valência. Depois disso um cristal de silício puro passa a ter em sua estrutura alguns átomos pentavalente, ligados através de ligação covalente à quatro átomos vizinhos de silício, este átomo central fica com um elétron sobrando que acaba se deslocando para a chamada banda de condução. Desta forma, este “excesso” de elétrons os caracteriza como um semicondutor tipo-p.

Semicondutor tipo-p

De modo análogo ao tipo-n que se caracteriza como negativo, o semicondutor tipo-p tem “lacunas” sobrando o que consequentemente o caracteriza como positivo. Para se chegar a esta condição insere-se átomos trivalentes ao cristal intrínseco de silício. Nesta condição cada átomo inserido também terá quatro átomos de silício como vizinhos. Porém, agora sobrá uma “lacuna” no átomo trivalente. Da mesma forma que o anterior, esta falta de elétrons os caracteriza como um semicondutor tipo-n.

Controlando-se a quantidade de impurezas adicionadas controla-se o número de lacunas e de elétrons livres no cristal “dopado”.

Princípio construtivo do Diodo

O diodo é formado através da construção de um semicondutor metade tipo-n e metade tipo-p. A região onde os dois tipos de cristais encontram-se é conhecida como “**junção**”. Este cristal “pn” passa a ser conhecido como diodo. Ao redor da junção forma-se a chamada camada de “depleção” onde os elétrons livres do material tipo-n, mais próximos ao material do tipo-p, preencheram as lacunas das proximidades da junção. Esta camada de depleção se estenderá até que se forme uma barreira, sem elétrons livre e sem lacunas, suficiente para que se interrompa o caminho dos elétrons.

Polarização direta da junção

Ao se aplicar uma fonte de corrente contínua através de um diodo, cujo terminal positivo esteja ligado ao material tipo-p e o material tipo-n ao terminal negativo, ocorre a polarização direta que pode permitir a passagem de corrente, desde de que a tensão de polarização ultrapasse a tensão mínima de condução do diodo, aproximadamente 0,7 volts para os diodos de silício. Isto ocorre porque o terminal negativo da fonte ligado ao material tipo-n repele os elétrons livres em direção a junção. Estes elétrons com energia adicional podem atravessar a camada de depleção e encontrar lacunas do lado “p”. À medida que isso ocorre, eles se tornam elétrons de valência, então continuam a se deslocar através das lacunas do material “p” até atingirem a extremidade do cristal, neste momento eles abandonam o semiconductor e escoam para o terminal positivo da fonte, formando um caminho direto para a circulação de corrente.

Polarização reversa da junção

Neste caso o terminal positivo da fonte está conectado ao lado tipo-n e nesta situação seus elétrons livres se afastam da junção em direção ao terminal positivo da fonte. As lacunas do lado tipo-p também se deslocam para o terminal negativo. Portanto, nesta situação a camada de depleção aumenta até que seu potencial seja igual ao da fonte. Desta maneira não existe circulação de corrente pelo diodo.

A figura 2.13 mostra a curva característica de “Tensão x Corrente” do diodo.

Figura 2.13. Curva característica do diodo.

O “LED” (*Diodo Emissor de Luz*)

Num diodo com polarização direta, os elétrons livres atravessam a junção e combinam-se com as lacunas, como já descrito anteriormente. À medida que esses elétrons caem de um nível mais alto de energia para um nível mais baixo, eles irradiam energia. Nos diodos comuns essa energia é dissipada somente na forma de calor. Porém, no LED a energia é irradiada sob a forma de luz (fótons).

Os diodos comuns são feitos de cristais de silício, como dito anteriormente. Este material é opaco que bloqueia a passagem de luz, para fabricação dos leds utiliza-se materiais como o gálio, o arsênio e o fósforo que poderão emitir luz na cor vermelha, verde, amarelo, laranja, azul ou infra-vermelho. O brilho do LED dependerá diretamente da intensidade de corrente que o atravessa. Na figura 2.14 encontra-se um diodo do sinalizador.

Figura 2.14. LED tipo sinalizador.

Os LEDs têm uma série de vantagens quando comparados com lâmpadas incandescentes, por exemplo: por não terem que trabalhar com um filamento em temperaturas elevadas têm uma vida útil muitas vezes maior; além disso são menores e mais leve que as lâmpadas em geral.

Princípios de funcionamento do LED emissor de luz branca

Como já afirmamos na seção anterior, o material usado para construir o semicondutor determina a cor emitida pelo LED. Desta forma, a combinação de certos materiais também permite a combinação de certas cores que nas proporções corretas torna possível a obtenção da luz branca como resultante.

2.4.2 Principais métodos para obtenção de LED emissor de luz branca:

De acordo com as informações obtidas nos sites dos principais fabricantes de LEDs e nos artigos dos pesquisadores Sazuka (2004) e Kern (2004) que descrevem em suas introduções os métodos atualmente conhecidos para obtenção de LEDs de luz branca, apresentamos a seguir uma síntese dos respectivos artigos sobre os princípios de funcionamento atualmente conhecidos:

1º. Método “RGB”:

Figura 2.15: Princípios de funcionamento do método “RGB”

Este primeiro método é o mesmo enunciado por Isaac Newton no século dezessete, onde através do princípio da mistura de luzes de todo o espectro de cores obtêm-se a luz Branca novamente. Este é o método onde tem-se a máxima eficácia pois não há perdas devido a absorção de energia via materiais fosforosos, como será descrito nos dois próximos métodos. Além disto, este método oferece a mais ampla capacidade de ajuste de cor, processo similar ao ajuste dos tubos dos televisores coloridos, onde o controle é feito através do ajuste individual de 3 LEDs emissores: “R” (Vermelho), “G” (Verde) e “B” (Azul), conforme mostrado no esquema “RGB” da figura 2.15.

Entretanto este método apresenta duas características indesejadas em maior proporção quando comparado com os dois próximos métodos. A primeira é a alta dissipação térmica proveniente dos 3 semicondutores emissores de luz num mesmo encapsulamento. E a segunda é a grande dificuldade de se manter o padrão da cor “branca” numa produção em escala, devido a variações individuais de cada LED

vermelho, verde e azul em função do tempo e da temperatura. Isto resultará numa variação do tom de branco gerado pelos LEDs construídos através deste método.

2º. Método “Blue LED + Yellow phosphor”:

Figura 2.16: Princípios de funcionamento do método “Blue LED + Yellow phosphor”

O segundo método combina a luz “azul” emitida por LEDs desta cor com materiais fosforosos amarelados que resultam na obtenção da luz branca. Neste método é dada ênfase a obtenção inicialmente da luz azul e uma posterior combinação com amarelo, obtido através de materiais fosforosos e o elemento químico Cério (Ce). Uma melhoria do desempenho deste tipo de LED pode ser obtida através da otimização da geometria do substrato, bem como com a utilização de um material transparente para a confecção do mesmo. Vide figura 2.16

Entretanto, conforme descrito por Kern (2004) em seu artigo sobre os desafios da Engenharia de materiais para solucionar as questões relacionadas à LEDs brancos, este método é menos eficiente que o anterior pois uma parte da energia luminosa que é absorvida pelo material fosforoso não se transforma em luz visível. Além disso, conforme relatório da “National Lighting Product Information Programs” (NLPIP) 2003, existe atualmente uma dificuldade no controle do processo de deposição de fósforo que também pode acarretar uma variação indesejada do tom de branco.

3º. Método “UV LED + RGB phosphor”:

Figura 2.17: Princípios de funcionamento do método “UV LED + RGB phosphor”

O terceiro método parte do uso de LEDs emissores de luz “ultra-violeta” combinados com o efeito de materiais fosforosos dos tipos “R, G e B” depositados sobre o LED emissor de UV que resultarão na emissão de luz branca. Vide esquema na figura 2.17.

Este método apresenta uma boa capacidade de definição de cor porém, além da menor eficácia se comparado ao “RGB”, ainda traz a desvantagem de causar a degradação da cor da maioria dos materiais plásticos usados tanto no encapsulamento do LED como na aplicação final dos sistema de iluminação em que se queira utilizá-lo.

Nota: A princípio o “2º método” está sendo o mais utilizado pelos fabricantes de LEDs brancos devido a sua maior facilidade de manufatura, porém como o desenvolvimento da tecnologia de produção de semicondutores é muito dinâmico, é possível que num breve futuro este cenário seja alterado.

2.4.3 Características dos LED Brancos de alta intensidade

Eficácia luminosa [lumens/watt]

Nos últimos anos a eficácia dos LEDs emissores de luz de alta potência tem evoluído rapidamente. Conforme literatura técnica disponibilizada pelos fabricantes deste tipo de LED, seu fluxo luminoso atual está em torno de “20 lumens/watt” e portanto, já é praticamente equivalente as lâmpadas incandescentes do tipo halógenas que também têm seus fluxos luminosos em torno de 20 lumens/watt”, dependendo do modelo. Porém, atualmente ainda estão muito longe de atingir a eficácia das lâmpadas de descarga de gás que após o período de inicialização, atingem aproximadamente “80 lumens/watt”. A figura 2.18 mostra um exemplo com a ilustração de um LED do tipo Luxeon do fabricante Lumileds.

Figura 2.18: LED modelo “Luxeon emitter” (fabricante: Lumileds)

Nota: Para a maioria das aplicações se faz necessário o uso de dispositivos para redirecionar e melhorar o aproveitamento da luz emitida pelos LEDs. Este tipo de dispositivo será comentado no decorrer deste trabalho.

Padrões de radiação de luz “Lambertian” e “Side Emitter”

A fim de otimizar a utilização da luz emitida pelo LED em aplicações específicas, existem hoje basicamente dois tipos de padrões de radiação de luz. O primeiro deles e mais comum é o padrão “Lambertiano”, cuja distribuição é mostrada na figura 2.19 e apresenta como característica principal a concentração de luz em torno do seu eixo central.

O segundo padrão é conhecido como “side emitter”, termo em Inglês para “emissão lateral”. A distribuição de luz para este tipo de LED, cuja concentração de luz se dá nas regiões laterais, é mostrada na figura 2.20.

Figura 2.19: Distribuição “Lambertiana” - Intensidade Relativa (%) X Abertura (graus)

Figura 2.20: Distribuição “Side Emitter” - Intensidade Relativa (%) X Abertura (graus)

Especificamente sobre este segundo padrão podemos encontrar no artigo de Stout, (2004), um exemplo de como uma solução ótica para este tipo de distribuição pode ser desenvolvida sem muita dificuldade..

Faixas de onda sem radiação U.V. e I.R.

Também conforme literatura técnica disponibilizada pelos seus fabricantes; o comprimento das ondas de luz emitida pelos LED Brancos de alta potência está entre 430 e 600 nm, conforme mostrado na figura 2.21.

Obs: Para efeito informativo adicionamos a figura 2.22 onde podemos observar o comprimento de onda de determinadas cores.

Figura 2.21: Espectro típico da luz branca emitida pelo LED.

Como neste espectro não existem ondas inferiores a 380 nm e superiores a 780 nm, também não existem respectivamente na luz emitida por este tipo de LED, os componentes Ultravioleta (U.V.) e Infravermelho (I.R.). Fato este que colabora para o melhor rendimento deste dispositivos semicondutores quando comparados às lâmpadas incandescentes.

Figura 2.22: Comprimento de onda para determinadas cores visíveis.

Figura 2.23: Sensibilidade média do olho humano em função da cor recebida.

Na figura 2.23 podemos observar a curva de sensibilidade média do olho humano com escala relativa de 0 a 1,0. Através deste gráfico podemos verificar que a percepção humana identifica ondas cujo comprimento está entre aproximadamente 400 nm e 720 nm.

Desta forma podemos afirmar, através da análise dos gráficos das figuras 2.21 e 2.23, que o espectro de luz branca emitida pelo LED é perfeitamente compatível com a sensibilidade média do olho humano.

2.4.4.Considerações sobre o efeito térmico nos LEDs

Princípio da transferência de calor por Convecção:

Conforme descrito por Shapiro (2004) na obra sobre Fundamentos de Engenharia Termodinâmica, a transferência de calor por convecção ocorre entre uma superfície sólida a uma temperatura “T1” e um gás ou um líquido em movimento a uma temperatura “T2”. Esta troca de calor é altamente responsável pelo desempenho de vários tipos de dispositivos eletro-eletrônicos. A figura 2.24 abaixo mostra o efeito da combinação entre a condução e a convecção de calor pelo movimento de um dado volume de ar.

Figura 2.24: Condução de calor pelo ar sobre um componente eletrônico

A taxa de transferência de energia da superfície do corpo para o ar pode ser quantificada pela equação (1), obtida de forma empírica.

$$Q_c = h \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (1)$$

Onde:

- A = área de contato com o fluxo de Ar

- T_1, T_2 = temperaturas do Ar e do corpo em estudo respectivamente e
- “ h ” = coeficiente de transferência de calor .

Este coeficiente “ h ” é obtido de forma empírica e incorpora características da geometria da região, das propriedades do fluido e do padrão do fluxo de movimento do fluido. Quando um ventilador é adicionado ao sistema, o valor do coeficiente de transferência aumenta consideravelmente e é conhecido por “ventilação forçada”, enquanto que o sistema sem ventilador é conhecido como “ventilação livre”.

No capítulo 3 apresentaremos um exemplo de cálculo para de dimensionamento do “dissipador de calor” necessário para garantir o funcionamento dos dispositivos semicondutores que serão utilizados na construção do farol protótipo com LEDs.

Transferência de Calor nos Diodos emissores de Luz (LED's)

Durante o processo de transformação da energia elétrica em luz os semicondutores convertem a maior parte da energia em calor. Na verdade aproximadamente apenas 15% da energia é convertida em luz pelos LEDs. Somente para comparação, uma lâmpada incandescente converte ainda menos, somente 5% da energia em luz visível. Este calor gerado no processo de conversão tem necessariamente que ser transferido para o ambiente para evitar danos na pastilha semicondutora. A temperatura máxima em que o LED pode operar é definida pela temperatura de trabalho da junção do semicondutor, conhecida como “ T_j ”, na verdade esta temperatura não pode ser excedida sob pena de danificarmos o componente.

A temperatura de junção “ T_j ” é um dos parâmetros que obrigatoriamente são especificados pelos fabricantes de semicondutores. Este parâmetro também é um dos responsáveis direto pela definição tanto da “Confiabilidade” quanto do “Desempenho” dos Semicondutores em geral.

Conforme estudos de Confiabilidade realizados por Mansuelli; Neumann (1999), para um determinado tipo LED que opere a $T_j = 104^{\circ}\text{C}$ teríamos um valor de MTBF (Tempo médio entre falhas) médio de 586.000 horas, caso esta temperatura passe para 114°C teríamos um novo MTBF de 417.000 horas, isto é, um decréscimo de aproximadamente 170.000 horas para um acréscimo de temperatura de apenas 10°C . A situação ficaria totalmente fora de controle caso a temperatura de junção “ T_j ” aumente mais 10°C e ultrapasse os 124°C , nesta situação, para este tipo específico LED, o MTBF seria reduzido drasticamente para apenas 300 horas, o que comprometeria a sua vida útil e consequentemente a sua aplicação.

Com relação ao efeito da temperatura de junção “ T_j ” e o desempenho dos LEDs encontramos um estudo no site da Lumiled (2004), onde a emissão de luz relativa diminui cerca de 75% quando a temperatura de junção de “ T_j ” vai de 25°C para 100°C .

Na figura 2.25 é apresentada a relação típica entre o fluxo luminoso e a temperatura de junção para algumas cores de LED.

Figura 2.25: Fluxo luminoso [%] X Temperatura de Junção [°C]

Um resultado similar a este é apresentado por Shih (2004) no seu artigo publicado pela SAE sobre as consequências do efeito da temperatura de junção em aplicação na área de iluminação automotiva .

Cálculo da Potência Dissipada pelo LED:

Para determinarmos a quantidade de calor que será gerada pelo LED e que consequentemente terá que ser dissipada para o ambiente, utilizamos a equação (2) para o cálculo da potência “ P_d ”:

$$P_d = V_f \cdot I_f \quad (2)$$

Onde:

V_f = Tensão direta aplicada sobre o LED

I_f = Corrente direta através do LED

A transferência de calor da pastilha semicondutora para o ambiente não se dá diretamente. O Calor é transferido inicialmente por “condução” do semicondutor para a base de “epóxi” e depois para a “placa”. Por fim a transferência se dá por “convecção” para o ambiente através do fluxo de ar. Nos casos em que a temperatura é muito alta utilizamos um dissipador de calor metálico, acoplado a “placa”, para aumentar a capacidade de troca de calor para o ambiente, conforme exemplo ilustrativo mostrado na figura 2.26.

Figura 2.26: Diagrama esquemático de um LED sobre um dissipador de calor

Conceito de Resistência Térmica - $R\theta$

Conforme descrito no modulo II da apostila sobre “Thermal Design” da Lumiled (2001), para o modelamento térmico das transferências de calor mencionadas na seção anterior utiliza-se o conceito de resistência térmica. Este parâmetro, usualmente informado pelo fabricante dos semicondutores, correlaciona a variação da temperatura entre duas superfícies em função da potência dissipada. ($R\theta = [^\circ\text{C}/\text{watts}]$)

Desta forma “ $R\theta$ ” será calculado através divisão da diferença entre as temperaturas do encapsulamento e do ar ambiente ($T_d - T_a$), em graus Célcus $[^\circ\text{C}]$, pela potência dissipada (P_d), conforme mostrado na equação (3).

$$R\theta = (T_d - T_a) / P_d \quad (3)$$

Logo a temperatura final “ T_d ” de uma superfície sob a influência direta da dissipação da Potência “ P_d ” pode ser calculada conforme mostrado na equação (4).

$$T_d = T_a + P_d \cdot R\theta_{1-2} \quad (4)$$

Onde “ T_a ” é a temperatura inicial do ar, sem a influência da potência P_d .

Equacionamento das Transferências de Calor no LED:

Com base nos conceitos acima e nos detalhes construtivos do “LED” mostrado na figura 2.26, podemos dizer que a “Resistência Térmica Total” entre a pastilha semicondutora e o ar ambiente pode ser descrita como a somatória das resistências térmicas individuais, conforme mostrado através da equação (5):

$$R\theta_{\text{total}} = R\theta_{J-A} = R\theta_{J-E} + R\theta_{E-P} + R\theta_{P-A} \quad (5)$$

Onde:

J-A = Junção – Ambiente

J-E = Junção – Epóxi

E-P = Epóxi – Placa

P-A = Placa – Ambiente

Porém, a resistência térmica encontrada nas especificações dos fabricantes de semicondutores é identificada como “ $R\theta_{J-C}$ ”, onde as letras “J” e “C” representam respectivamente “junction” e “case”, termos em Inglês. Desta forma podemos considerar que o valor de $R\theta_{J-C}$ é equivalente ao nosso $R\theta_{J-A}$, mostrado na eq.(5).

2.4.5 Principais benefícios e barreiras quanto ao uso de LEDs em Faróis automotivos:

Conforme relatado por Ackermann (2003); Albout (2003); Bogner (2003); Jennato; Mckee (2001); Raggio (2003), Reill; Schwenkschuster (2003); Siktberg (2003); Walking (2003) e Wang (2004) em seus respectivos artigos sobre os primeiros faróis a LED, existe hoje uma certeza de que sua construção é viável tecnicamente porém, para se viabilizar a sua produção em escala, ainda é necessário otimizar soluções para alguns problemas críticos. A seguir são descritos resumidamente os principais benefícios proporcionados pela nova tecnologia bem como as barreiras e questões que ainda necessitam ser melhor trabalhadas para que a confiabilidade de todas as funções do farol seja satisfatória, inclusive as funções de “facho baixo” e “facho alto” que requerem um alto fluxo luminoso.

Tendências e benefícios proporcionados pelo uso dos LEDs:

Com base na pesquisa bibliográfica realizada entre meados de 2003 e 2004, apresentaremos nesta subseção um resumo dos principais benefícios esperados com a utilização dos LEDs em substituição às lâmpadas como fonte de luz dos faróis automotivos.

Segurança: Devido ao maior tempo de vida, a maioria dos semicondutores tem uma vida útil maior que a do próprio veículo, e a “redundância” fornecida pelo fato de se utilizar obrigatoriamente um arranjo com vários LEDs para se atingir a intensidade luminosa necessária, podemos afirmar que esta nova tecnologia aumentará a

confiabilidade dos faróis automotivos, no que se refere a sua função principal “iluminar”. Esta afirmação é corroborada pelo artigo de Masuelli; Neumann (1999), em seu artigo publicado pela SAE.

Menor volume: Pela própria característica construtiva dos dispositivos semicondutores, os LEDs ocupam um volume significativamente menor do que as lâmpadas, tanto as incandescente quanto as de descarga de gás mencionadas anteriormente.

Menor consumo de energia: Conforme dados sobre a evolução da tecnologia dos LEDs, existe hoje uma tendência bastante fundamentada (vide subseção 5.2.7) de que num breve futuro, para emitir a mesma quantidade de luz útil, os LEDs consumirão menos energia. Pois diferentemente das lâmpadas incandescentes cuja tecnologia já remonta há décadas, os LEDs de alta potência ainda estão em fase de desenvolvimento e, entre outras melhorias, espera-se que a eficácia luminosa hoje em torno de 20 lumens/watt seja em breve superada. Fato este que contribuiria ainda mais para a diminuição do consumo de energia e consequentemente de combustível para os automóveis.

Possibilidade de se eliminar o problema de infiltração de água visível: Devido ao fato do LED emitir ondas sem as faixas Infra-Vermelho, a luz emitida pelo mesmo não transmite calor. Desta forma, a parte posterior do LED e a lente do farol poderão ser totalmente vedados, impedindo a infiltração de água. Embora o calor gerado na Junção do semicondutor tenha que ser transferido para o meio ambiente, porém isto é feito pela parte anterior do farol que não será visível para o cliente final do veículo.

Ajuste do tom da luz branca emitida pelo LED: Considerado inicialmente exclusivamente como um problema, o fato da luz branca ser composta por outras cores pode se tornar uma atrativo para os usuários finais pois, através de controles adequados no processo produtivo desse tipo de LED, conforme relatado na subseção 2.4.2, será possível produzir faróis cuja luz possua um tom mais quente (amarelado) ou mais frio (azulado), dependendo da solicitação do cliente.

Maior estabilidade a solicitações mecânicas: Também pelas suas características construtivas os LEDs são muito menos susceptíveis a impactos e vibração do que qualquer a lâmpada, fato este que se justifica pela ausência de componentes frágeis com os filamentos e bulbos de vidro. Sobre este assunto encontramos um artigo de Steiner;Clark (2003), contendo um estudo comparativo entre lâmpadas e LEDs onde os resultados obtidos não deixam dúvidas sobre esta vantagem.

Menor tempo de acionamento: Devido não haver a necessidade de aquecer qualquer componente, como nas lâmpadas incandescentes, ou passar por qualquer processo de inicialização, como nas lâmpadas de descarga de gás, o tempo para que o farol inicie o seu funcionamento é consideravelmente menor. Isto poderá ser bastante útil em sistemas automáticos de iluminação, como apresentado por Takata (2000) sobre faróis adaptados a curvas, cujo fecho luminoso seria automaticamente ajustado ao se iniciar uma alteração de direção.

Maior flexibilidade de design: Devido a possibilidade de se montar os LEDs em diversos tipos de arranjos, os designers terão maiores possibilidades de criar faróis de diferentes formas e tamanhos. Fato extremamente relevante num mercado em que o estilo e o apelo inovador dos automóveis são sempre valorizados.

Impacto ambiental: Num mundo em que a busca por materiais que não agredam a natureza é cada vez mais importante, o uso de componentes isentos de mercúrio e chumbo é extremamente bem vindo.

Riscos e barreiras a vencer até a viabilização dos LEDs em todas as funções regulamentadas pelo CONTRAN para a iluminação dianteira dos veículos:

De modo análogo às vantagens apresentadas na seção anterior, apresentaremos a seguir as principais barreiras encontradas atualmente para o desenvolvimento de aplicações com LEDs em substituição às lâmpadas convencionais.

Aumentar o fluxo luminoso de cada LED: Certamente a primeira barreira a resolver é a quantidade de luz necessária para se substituir as lâmpadas convencionais pelos LEDs. Conforme relatado pelos fabricantes deste tipo de LED e discutido por Schwenkschuster (2003), Ackermann (2003) e Wang (2004); ainda não é possível atender as funções de fecho baixo e fecho alto dos faróis automotivos, regulamentadas pelo CONTRAN (1988), utilizando apenas um único LED em cada função. Como já mencionado neste trabalho, atualmente a eficácia dos LEDs está em torno de 20 lumens/watt e a maior potência que poderia ser dissipada nestes dispositivos atualmente comercializados é de “3 watts”. Mesmo considerando a próxima geração que poderá dissipar entre 5 e 6 watts, utilizados no farol protótipo cujos resultados dos ensaios serão apresentados no capítulo 4 deste trabalho, ainda é necessário a construção de arranjos específicos com vários LEDs para que sejam atendidos os requisitos mínimos de fotometria.

Supondo-se que o objetivo fosse substituir as lâmpadas de descarga de gás, cujo fluxo luminoso é o maior atualmente, essa quantidade de LEDs utilizada no nosso “arranjo” para o farol protótipo deveria ser multiplicada por três ou quatro aproximadamente, corroborando as afirmações de autores já citados neste trabalho.

Otimizar a ótica dos faróis para utilizar LEDs: A fim de solucionar o problema acima, existem atualmente vários pesquisadores e grandes fabricantes mundiais de faróis trabalhando em soluções óticas que otimizem a distribuição do fluxo luminoso gerado pelos LED. Dois exemplos desses estudos podem ser encontrados nos artigos publicados para SAE pelos autores Siktberg (2003) da Guide Corporation dos EUA e Albout (2003) da VALEO Lighting System.

Otimizar e adequar o processo produtivo às dimensões e tolerâncias reduzidas dos LEDs: Um outro obstáculo a ser vencido para que se viabilize a produção em escala de faróis a LED é a atual falta de recurso e expertise dos fabricantes de faróis para trabalhar com dispositivos semicondutores que requerem cuidados especiais devido ao seu tamanho e tolerâncias reduzidas.

Uma solução indicada para este problema seria dedicar a sub-fornecedores a montagem dos arranjos de LEDs para que posteriormente sejam incorporados ao conjunto principal (farol completo).

Otimizar a dissipação de calor da junção do semicondutor: Tão importante quanto a limitação do fluxo luminoso e otimização da ótica é o problema de dissipação do calor gerado na junção do semicondutor. Com já mencionado anteriormente na seção 2.4.3 deste trabalho, uma deficiência da dissipação desse calor certamente comprometerá o funcionamento e a confiabilidade dos LEDs, o que consequentemente poderá causar problemas de segurança para veículo. O problema se torna mais grave pois a temperatura dentro do compartimento do motor, onde alojam-se os faróis, pode ultrapassar facilmente os 65°C, o que dificulta a ação do dissipador de calor.

Adequar o processo produtivo para classificar os diferentes tons de branco emitidos pelos LED: Conforme mencionado na seção anterior é necessário classificar os LEDs, durante o seu processo produtivo, quanto ao tom da luz emitida pelo mesmo para que os veículos mantenham um padrão de qualidade durante sua produção. Para que isso seja possível e passe a ser um diferencial entre os fabricantes de automóveis, é necessário que os fabricantes de LEDs os separem e os codifiquem de acordo com padrões pré-estabelecidos. Este tema certamente deverá ser tratado pelos órgãos regulamentadores de cada região/país nas próximas revisões de suas respectivas Normas.

Baixar os custos dos LEDs para viabilizar o seu uso em todas as faixas de mercado de veículos: Como toda tecnologia em início de produção, atualmente o uso dos

LEDs em faróis é praticamente proibitivo pelo seu alto custo. Contudo, de acordo com previsões de várias entidades envolvidas no setor, entre os anos de 2006 e 2010 já teremos veículos de produção rodando com faróis a LEDs. Logicamente este início de produção se dará nos veículos de alto padrão, onde o apelo por “inovação” é bastante forte, principalmente nos grandes mercados mundiais como nos EUA, Europa e Japão.

2.5 Comentários e conclusões a respeito da revisão bibliográfica apresentada

Dentro da bibliografia pesquisada no período compreendido entre meados de 2003 e fim de 2004 pudemos constatar também nas tecnologias atuais alguns itens críticos que poderiam ser melhorados com a viabilização dos LEDs como fonte de luz alternativa às lâmpadas utilizadas nos faróis automotivos atuais. Além das características já apresentadas neste trabalho os LEDs apresentam-se como alternativa de melhor desempenho para as seguintes características:

Durabilidade (Life Time): Conforme dados dos fabricantes Lumileds e Osram, a durabilidade de um LED pode ultrapassar a 10.000 horas. Na prática isto seria equivalente a dizer que a durabilidade destes dispositivos é equivalente ao tempo de vida útil dos próprios veículos.

Resistência Mecânica: Os fatores que mais contribuem para a falha de uma lâmpada são: o impacto e a vibração a qual é submetido o seu filamento. Portanto, ao eliminarmos o filamento da fonte luminosa, estamos automaticamente eliminando o seu modo de falha mais sensível.

Componentes U.V.: As ondas eletromagnéticas encontradas na luz natural emitida pelo sol possuem componentes denominados como “luz ultra-violeta”, responsável pela degradação de alguns materiais, dentre eles alguns polímeros utilizados pela

indústria em geral, A ação desse tipo de radiação quebra a cadeia desses polímeros e, por consequência, altera suas propriedades mecânicas e físicas, conforme escrito por Camilli (1991) em seu artigo “Princípios de estabilização térmica e à luz de U.V. de materiais poliméricos”. Neste mesmo artigo o autor descreve que ao atravessar a atmosfera, parte desta radiação é absorvida pela camada de ozônio, pelo vapor de água e pelo CO₂. Além disso, a radiação responsável pelo aspecto envelhecido dos plásticos é composta pela luz UV cujo comprimento de onda está entre 290 e 400 nm.

Da mesma forma também encontramos componentes UV na luz emitida pelas lâmpadas atuais. E, analogamente ao observado na luz solar, este tipo de radiação produz os efeitos colaterais indesejados já mencionados, o que não ocorre com a luz emitida pelos LEDs, isentas tanto de UV como de IR.;

Atualmente, para se contornar tanto o problema da radiação UV quanto da IR, deve-se usar materiais mais nobres na construção de determinados tipo de produtos, como por exemplo as lentes dos faróis automotivos, atualmente feitas de policarbonato que suportam altas temperaturas e ainda necessitam receber uma camada de verniz como proteção contra os raios U.V. Consequentemente ocasionando um custo relativamente elevado deste componente para se atingir o desempenho final que este tipo de produto exige.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios práticos foram realizados com um farol representativo de cada tecnologia: Halógeno, Descarga de Gás e LEDs. Sendo os dois primeiros obtidos diretamente junto a um fabricante de farol nacional e o terceiro, um protótipo construído pelo autor desta Dissertação com amostras de LEDs brancos de alta potência, disponibilizados pelo fabricante Lumiled.

Para efeito de ensaio foi considerada somente a função “facho baixo”, permanecendo as demais funções com suas configurações originais, comuns aos três modelos de faróis testados, isto é, lâmpadas incandescentes para as funções: facho alto, posição e indicadora de direção (pisca).

3.1 Materiais:

Como objeto dos ensaios comparativos realizados utilizamos três faróis do mesmo modelo e praticamente iguais, exceto pela sua fonte luminosa na função facho baixo (*).

1 Farol lado esquerdo com lâmpada halógena do tipo H7

Origem: VALEO Divisão Iluminação do Brasil. Ano: 2004

1 Farol lado esquerdo com lâmpada de descarga de gás (HID)

Origem: VALEO Divisão Iluminação – França. Ano: 2004

1 Farol esquerdo com 6 LEDs tipo Luxeon V, modelo Star da Lumileds (2004)

Origem: Protótipo construído para fins acadêmicos. Ano: 2004

(*): Para melhor entendimento vide fotos ilustrativas no capítulo 7 deste trabalho.

Obs 1.: Para que o funcionamento do protótipo fosse possível foi necessário o uso lentes tipo “calota-esférica”, conforme mostrado na figura 7.1 para o redirecionamento da luz emitida por cada um dos “6” LEDs utilizados no protótipo, bem como o uso de dissipadores de calor para manter a temperatura de junção dos semicondutores dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante dos LEDs.

Obs 2: Os parâmetros térmicos adotados e os parâmetros elétricos dos LEDs utilizados na construção do protótipo são apresentados nas tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1: Parâmetros utilizados para o cálculo um dissipador típico:

Dados dos LEDs utilizados (*)	Temperatura de junção máx. = 135°C Corrente direta If = 700 mA; Tensão direta Vf = 6,8V; Resistência $R\theta_{\text{Junction-Case}} = 11^{\circ}\text{C/W}$
Coefficiente de transf. de calor para o “Ar” (**)	$h = 2 \text{ a } 25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

(*) Lumileds Lightng, US – Technical Data Sheet “Luxeon V Star”, 2004.

(**) Moram M. and H. Shapiro, pag. 50, 2004.

A seguir apresentaremos um exemplo da sequência de cálculo necessária para o dimensionamento dos dissipadores de calor, baseado no artigo “How to Select a Heat Sink” escrito por Lee (2004) e nas apostila e notas de aula do Profº Dr. Oliveira (2004) do curso de Mestrado em Engenharia Automotiva da USP.

A partir das equações apresentadas na subseção 2.4.4 e dos parâmetros da tabela 3.1 descreveremos a seguir um exemplo de cálculo para dimensionamento de um dissipador de calor típico necessário a cada um dos LEDs utilizados para montagem do farol protótipo.

- Cálculo da Resistência térmica:

Simplificando a eq.(5), considerando as temperaturas da “junção” do semicondutor “J”, do encapsulamento “C” e a do ambiente “A” (adotada), temos:

$$R\theta_{J-A \text{ (total)}} = R\theta_{J-C} + R\theta_{C-A} \quad \rightarrow \quad R\theta_{C-A} = R\theta_{J-A \text{ (total)}} - R\theta_{J-C}$$

Através da eq.(2) e da eq.(3) apresentadas na subseção 2.4.4 e com os parâmetros apresentados na tabela 3.2 calculamos o valor da resistência térmica “ $R\theta_{J-A}$ ”, necessária para o cálculo da resistência térmica entre o encapsulamento e o ar ambiente “ $R\theta_{C-A}$ ”.

Tabela 3.2: Valores utilizados e resultado do cálculo da Resistência Térmica “ $R\theta_{C-A}$ ”:

Parâmetro :	Valor:
Pd - Potência dissipada pelo LED [watt]	4,76
Tj - Temperatura de junção máx. [°C]	135
Ta - Temperatura ambiente (adotada) [°C]	45
$R\theta_{J-A}$ [°C/W]	18,9
$R\theta_{C-A}$ [°C/W]	7,9

- Dimensionamento da área do Dissipador:

Através da eq.(1) e da eq.(4) apresentadas, também na subseção 2.4.4, e com a adoção de um coeficiente de transferência de calor médio “h”, mostrado na tabela 3.3, calculamos o valor da “área” do dissipador necessário para cada LED.

Tabela 3.3: Valores utilizados e resultado do cálculo da Área do Dissipador “A”:

Parâmetro :	Valor:
Td - Temperatura do dissipador [°C]	97,4
Ta - Temperatura ambiente (adotada) [°C]	45
Qc (*) - Energia dissipada em forma de calor [watt]	4,76
h – Coeficiente de transf. de calor [watt/ m ² .K] (adotado)	14
A [mm²]	6.489

Considerações a respeito do dissipador:

Como pudemos constatar através do estudo acima, a área necessária para a dissipação do calor gerado na junção de um dos LEDs é bastante dependente da temperatura ambiente e do coeficiente “h” considerados.

Na prática, a temperatura ambiente no compartimento do motor de um automóvel geralmente não é inferior a **65°C**, podendo até ultrapassar este valor. Consequentemente a área final do dissipador deveria ser ainda maior para uma aplicação real.

Já o coeficiente de transferência de calor “h” pode variar entre 2 a 25 [w/m².K]. O valor adotado para o exemplo de cálculo (14 w/m².K) aparentemente apresentou um resultado coerente. Porém, para garantir uma maior confiabilidade do produto, ensaios devem ser realizados para confirmar se os parâmetros adotados são os mais adequados.

(*) Nota sobre o cálculo de “Qc”

Como sabemos através da 1ª Lei da Termodinâmica: **Q = ΔE + W**

Nesta caso, $\Delta E = E_p + E_c = 0$ (zero) e $W = \text{Pot.} = 6,8 * 0,7 = 4,76$ watts,
e como “ $Q_c = 0 + W = 0 + P_d = 0 + 4,76$ ” logo: $Q_c = P_d = 4,76$ watts

3.2 Critérios de avaliação entre as tecnologias apresentadas

Apresentamos nesta seção os critérios, as justificativas e considerações sob os quais as tecnologias serão avaliadas nos próximos capítulos. Algumas delas puderam ser confirmadas na prática através de ensaios laboratoriais em amostras de produção ou num protótipo, no caso de faróis com LEDs. Os resultados desses ensaios serão apresentados no capítulo 4. Outras características porém serão comparadas através dos dados teóricos obtidos durante a revisão bibliográfica realizada entre meados de 2003 e fim de 2004.

Consumo de Potência [watts]: A redução do consumo de energia é sem dúvida um dos objetivos mais intensamente buscados pela indústria automotiva. Esta redução implica diretamente na diminuição do consumo de combustível e consequentemente na redução da emissão de poluentes na atmosfera.

Peso [kg]: De modo análogo aa seção anterior, a diminuição do peso implica também na diminuição do consumo de combustível e na emissão de poluentes.

Temperatura na superfície da Lente [°C]: A temperatura a qual a superfície da lente atinge é um dos fatores fundamentais para a definição do material a ser utilizado na sua construção. Portanto, a fim de viabilizar o uso de materiais de menor custo, é importante que esta temperatura seja a menor possível para a aplicação em questão.

Fotometria e Curvas Isolux: Além da confirmação ao atendimento à resolução CONTRAN nº 692/88, também serão traçadas curvas para demonstrar graficamente a distribuição da luz gerada pelos faróis. Essas curvas, conhecidas por “isolux” também são uma ferramenta de grande ajuda para a avaliação do desempenho dos faróis.

No capítulo 4 serão apresentadas as curvas isolux representativas dos três faróis avaliados.

3.2.1 Métodos de ensaios:

Consumo de Potência: Medição indireta através da leitura da corrente e tensão elétrica sobre cada LED, com os equipamentos descritos na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Equipamentos utilizados para medição de Potência.

Tipo:	Equipamentos:	Fundo de escala:
Medição	Multímetro digital	100 V / 10 A
Alimentação	Fonte programável	30 V

Peso: Medição direta através de Balança descrita na tabela 3.5.

Tabela 3.5: Equipamentos utilizados para medição de Peso.

Tipo:	Equipamentos:	Fundo de escala:
Medição	Balança digital	10 kg

Temperatura na superfície da Lente: Medição direta através dos equipamentos descritos na tabela 3.6, com o objetivo de avaliar a temperatura na superfície da lente dos três tipos de faróis em avaliação, após o acendimento das funções facho alto e baixo simultaneamente durante 1 hora de ensaio ininterrupto.

Tabela 3.6: Equipamentos utilizados para medição da temperatura na Lente .

Tipo:	Equipamentos:	Fundo de escala:
Alimentação (13,5 V)	Fonte programável	30 V
Transdutor	5 termopares tipo “K”	-----
Medição	Termômetro digital	300°C

Obs: Foram instalados 5 termopares afim de registrar a temperatura em cada ponto do Farol, conforme foto mostrada na figura 3.1

Figura 3.1: Localização dos termopares na Lente dos faróis avaliados em laboratório

OBS: O Ponto “5” foi monitorado apenas para efeito comparativo, uma vez que este foi posicionado diretamente para fecho alto que não é o alvo dos nossos ensaios.

Comparativo fotométrico e Curva Isolux: Tanto os pontos fotométricos especificados pela resolução CONTRAN nº 692/88, conforme descrito no capítulo 2 deste trabalho, bem como as Curvas Isolux foram mensurados com equipamentos descritos na tabela 3.7.

Tabela 3.7: Equipamentos utilizados para medição Fotométrica e Curvas Isolux.

Tipo:	Equipamentos:	Local:
Medição	Banco Fotométrico	VALEO do Brasil

4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados das medições realizadas em laboratório conforme materiais e métodos descritos no capítulo 3 deste trabalho.

Na tabela 4.1 são apresentados os resultados obtidos nas medições de potência, peso e temperatura da lente.

Na tabela 4.2 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios relativos ao desempenho fotométrico dos três tipos faróis avaliados.

Tabela 4.1: Resultado obtidos nas medições de laboratório *

Ensaio	Halógena	Descarga de Gás	LED	Especificação/ Comentários
Potência [W]	54,0	42,2	27,3	-----
Massa ** [kg]	1,925	2,715	3,380 *	-----
Temperatura *** média da Lente [°C]	65,7	52,2	40,8	Vide anexos 7.4 a 7.6

* Todos os ensaios foram realizados em laboratórios a uma temperatura ambiente controlada em 23 °C..

** Peso acima do esperado devido ao dissipador não estar otimizado

*** Ensaio realizado com as funções “alto” e “baixo” ligadas.

Tabela 4.2: Resultado obtidos nos ensaios fotométricos *

Ensaio	Halógena	Descarga de Gás	LED	Especificação/ Comentários
Fotometria*[lux]				
Ponto H	0,58	0,29	0,47	0,7 (max.)
Ponto 50L	0,25	0,34	0,07	0,4 (max.)
Ponto 75R	22,15	33,36	15,5	12,0 (min.)
Ponto 50R	33,66	42,81	19,2	12,0 (min.)
Ponto 50V	24,09	24,92	6,63	6,0 (min.)
Ponto 25R	12,85	27,85	4,36	2,0 (min.)
Ponto 25L	9,68	12,84	2,47	2,0 (min.)
Área Z4R	15,26	50,62	8,29	3,0 (min.)
Curvas Isolux:	Vide figura 4.1 e 4.2	Vide figura 4.1 e 4.2	Vide figura 4.1 e 4.2	-----

* Medições fotométricas tomadas nos pontos definidos pelo CONTRAN para a função “facho baixo”.

Figura 4.1 - Isolux: (a) Halógeno; (b) Xenon; (c) LED – vista frontal projetada

Figura 4.2 - Comparativo Isolux: (a) Halógeno; (b) Xenon; (c) LED – vista superior

5. DISCUSSÃO

Neste capítulo será feita uma breve discussão e análise crítica dos resultados encontrados nos ensaios práticos, bem como uma comparação de alguns parâmetros teóricos e características relevantes no desenvolvimento e construção de faróis automotivos.

5.1 Resumo comparativo dos ensaios realizados em laboratório

Com relação ao consumo de potência, através do gráfico mostrado na figura 5.1, podemos observar que o protótipo com LEDs consumiu o equivalente a aproximadamente a 50% da potência do farol com lâmpada halógena. Enquanto que no farol com lâmpada de descarga de gás esta mesma proporção equivale a 78%.

Figura 5.1: Gráfico comparativo entre as potências.

Quanto a massa dos faróis avaliados, verificamos que os dados obtidos durante a medição dos mesmos apresentou um resultado desfavorável ao farol com LED. Aproximadamente 75% a mais do que o farol com lâmpada halógena. Este resultado foi devido ao peso dos dissipadores dos LEDs não estarem otimizados, isto é, uma área de dissipação térmica equivalente poderia ter sido obtida utilizando o mesmo material (alumínio) num volume (massa) menor, porém com a sua área superficial aumentada de modo a maximizar a troca de calor com o ar.

Também pudemos constatar que o farol com lâmpada de descarga de gás apresenta um peso adicional de aproximadamente 40% em comparação à nossa referência (farol com lâmpada halógena).

Já as medições das temperaturas na superfície da Lente, realizadas conforme descrito na seção 3.2.1, apresentaram resultados bastante relevantes. A figura 5.2 representa a média de 5 pontos medidos sobre a superfície da lente com todas as funções do farol operando simultaneamente, isto é, luz de posição, luz indicadora de direção e facho alto e baixo. Através deste gráfico podemos constatar que a temperatura média da lente do farol com LED na função facho baixo somente, equivale a apenas 62% da temperatura da lente de um farol com lâmpadas halógenas. Já a no farol com lâmpadas com descarga de gás esta mesma proporção chega a 80%.

Podemos afirmar que esta diferença seria muito mais significativa se as demais funções do nosso protótipo a LED, hoje feitas por lâmpadas incandescentes, fossem reprojatadas para também trabalhar com LEDs. Suposição essa que também poderá ser objeto de estudo em trabalhos futuros.

Figura 5.2: Gráfico comparativo entre as temperaturas na superfície da Lente.

Tanto no desempenho fotométrico medido conforme regulamentação CONTRAN (1988), quanto nas curvas Isolux mostrados respectivamente na tabela 4.2 e figuras 4.1 e 4.2 do capítulo anterior, fica evidente a superioridade no desempenho dos faróis providos com lâmpada de descarga de gás. Fato que é explicado pela maior eficácia luminosa por cada “watt” de potência consumida por este tipo de lâmpada.

Já o nosso protótipo construído com 6 LEDs, mesmo apresentando algumas vantagens sob outros aspectos, está hoje longe de atingir o mesmo desempenho. Embora a eficácia dos LEDs utilizados seja equivalente a das lâmpadas convencionais (halógenas), o nosso protótipo consome cerca de 50% da potência destes faróis, conforme mostrado na tabela 4.1 desta dissertação. Desta forma, para atingirmos o desempenho equivalente ao de um farol a lâmpadas halógenas, deveríamos dobrar a quantidade de LEDs utilizados na construção do nosso protótipo, isto é, passaríamos de 6 para 12 LEDs. Número similar ao proposto por Ackermann (2003) e Wang (2004) em seus respectivos artigos sobre faróis a LED.

5.2 Resumo comparativo teórico dos faróis em estudo

Nesta seção destacaremos as vantagens e desvantagens de uma tecnologia em relação às outras, quando da sua aplicação em faróis automotivos, Estas constatações forem feitas com base nos dados técnicos disponibilizados pelos respectivos fabricantes de cada fonte luminosa.

5.2.1. Desempenho

Durabilidade: Conforme dados referentes à “confiabilidade” disponibilizados pelos respectivos fabricantes, a vida útil do LED pode chegar a 10.000 horas, desde que obedecida as condições de temperatura máxima na junção do semicondutor. Enquanto que numa lâmpada incandescente esta mesma vida útil é de aproximadamente 550 horas e para a lâmpada de descarga de gás encontramos valores de até 3.000 horas. Desta forma podemos afirmar que os faróis a LED poderão apresentar uma durabilidade de até 18 vezes maior, quando comparados aos atuais faróis a lâmpadas incandescentes; e de até 3,3 vezes no caso de comparação com lâmpadas de descarga de gás.

Eficácia luminosa: Através da comparação dos dados das mesmas fontes, constatamos que a eficácia atual dos LEDs e das lâmpadas incandescentes está hoje entre 20 a 25 lumens/watt, enquanto numa lâmpada de descarga de gás este índice pode chegar entre 80 a 100 lumens/watt, superando em mais de 4 vezes as duas primeiras.

Resistência à infiltração de água: Devido à possibilidade de se isolar a parte do semicondutor emissora de luz da sua parte geradora de calor (junção), a construção de faróis estanques aos olhos do cliente é perfeitamente viável. Característica esta que tornaria os faróis à LED superiores aos demais no que tange aos problemas de garantia ocasionados devido à infiltração de água ou mesmo da condensação de vapor no interior dos faróis convencionais.

5.2.2 Aspectos Térmicos

Devido ao princípio de funcionamento das lâmpadas incandescentes, o calor gerado por este tipo de fonte luminosa é hoje um dos maiores problemas que os projetistas de faróis automotivos têm a resolver. Já as lâmpadas de descarga de gás atingem temperaturas mais baixas e portanto não apresentam grandes problemas quanto a este aspecto específico. Quanto aos LEDs, o problema térmico na junção dos mesmos ainda precisa de soluções mais eficientes tanto para garantir a confiabilidade final do produto quanto para otimizar a sua massa.

As vantagens referentes à ausência de componentes de luz infra-vermelha nos LEDs só serão realmente aproveitadas quando o problema de dissipação do calor gerado em sua junção não afetar negativamente outros aspectos como: a ótica, o peso e o design do farol.

5.2.3 Resistência Mecânica

Devido a sua característica construtiva, peso reduzido, menor volume e principalmente devido à ausência de um filamento, os LEDs apresentam hoje a maior resistência mecânica entre as três tecnologias apresentadas. Considerando a sua aplicação em veículos automotores que normalmente são sujeitos a impactos e a altas taxas de vibração, esta característica é altamente desejada.

5.2.4 Aspectos ligados ao Estilo/Design do produto final

Um dos apelos dos fabricantes de LEDs para o seu uso na área automotiva é a promessa de inovações no design e estilo nos produtos finais, não só nos faróis mas em todos os itens ligados a iluminação e sinalização que compõem um veículo. Também por tratar-se de componentes eletrônicos ainda em desenvolvimento, há inúmeras possibilidades no que diz respeito a formas inovadoras e tonalidades de luz possíveis. Na verdade, a variação do tom da luz emitida que aparece hoje como

barreira tecnológica poderá ser no futuro um diferencial para o consumidor final. Isto é, opções do tom de luz variando do amarelo ao azulado, poderão tornar-se um item de personalização dos automóveis equipados com este tipo de farol.

5.2.5 Solução Ótica

Como já foi mostrado através dos dados da tabela 4.2 e das figuras 4.1 e 4.2, o desempenho fotométrico do protótipo de farol a LED ficou abaixo dos demais. Certamente isto pode ser atribuído em parte à solução ótica adotada não estar totalmente otimizada. Contudo, após uma rápida análise dos valores de potência consumida e da eficácia de cada tecnologia, fica claro que por mais que tivéssemos uma ótica mais refinada não atingiríamos os mesmos valores observados no farol com lâmpada incandescente e muito menos no de descarga de gás.

5.2.6 Impacto ambiental e componentes UV e IR.

Ao longo do capítulo 2 deste trabalho já foi mencionado que a ausência de metais pesados é não só desejada, mas obrigatória em países cuja legislação ambiental está regulamentada através de leis e acordos internacionais com este propósito. Também ressaltamos no capítulo 2 as conseqüências da incidência de componentes de luz Ultra-Violeta e Infra-Vermelho sobre os polímeros. Desta forma podemos ressaltar que os LEDs também apresentarão algumas vantagens em relação às demais tecnologias no que diz respeito ao baixo impacto ambiental tanto durante a sua fabricação como na sua utilização em larga escala.

5.2.7 Evolução da tecnologia

Na figura 5.3 encontramos um gráfico que mostra a evolução do desempenho dos LEDs ao longo do tempo e uma projeção para os próximos anos, publicada por Bergh et al (2003).

Figura 5.3 Gráfico “Eficácia/Custo X Tempo” - Fonte: Bergh et al (2001)

Com base na análise do gráfico da figura 5.3 podemos estimar que dentro de poucos anos a eficácia dos LEDs brancos superará a das lâmpadas convencionais e possibilitará a sua aplicação em diversas áreas, entre elas a automobilística.

6. CONCLUSÕES

As conclusões e observações mais relevantes que resultaram tanto da pesquisa bibliográfica quanto dos ensaios em laboratório, apresentados nos capítulos 2 e 4 respectivamente, estão agrupadas e descritas a seguir.

6.1 Contribuições deste trabalho

Os faróis que empregam diodos emissores de luz apresentam, potencialmente, algumas vantagens relevantes se comparados aos faróis convencionais.

Primeiramente, conforme constatado através dos ensaios e mostrado na figura 5.2, o farol à LED apresentou uma temperatura na superfície da lente aproximadamente 40% inferior quando comparado ao farol halógeno. Esta diferença seria ainda mais significativa se as demais funções do farol, principalmente o fecho “alto”, também tivessem sido concebidas com LEDs no lugar das lâmpadas incandescentes. No futuro esta condição permitirá o uso de materiais de menor custo na confecção dos demais componentes dos faróis, o que se converterá automaticamente em “vantagem competitiva” para a indústria automotiva.

Adicionalmente esses dispositivos proporcionarão maior segurança devido a sua maior durabilidade, o que conseqüentemente melhorará a confiabilidade do farol. Este fato, além de contribuir com a imagem de “qualidade” dos veículos, trará um benefício direto para o usuário final que provavelmente não precisará substituir os LEDs devido à queima dos mesmos. Fato este relativamente comum nos faróis providos a lâmpadas incandescentes.

Uma outra vantagem dos LEDs é a ausência de componentes UV e IR no espectro da luz emitida pelos mesmos. Como já foi apresentado nos capítulos anteriores, as componentes Ultra-violeta e Infra-vermelho contribuem respectivamente para a

degradação dos materiais plásticos dos faróis e para o aquecimento indesejado dos componentes próximos a fonte luminosa do farol.

Quanto aos aspectos ambientais, a ausência de Chumbo e de Mercúrio proporcionam uma vantagem imediata dos LEDs sobre as lâmpadas que permitirá também às empresas envolvidas com este produto atender as regulamentações vigentes. Embora os grandes fabricantes de lâmpadas também já estejam anunciando a eliminação desses metais pesados em seus produtos.

No que se refere à redução do custo de garantia, os faróis à LED apresentarão maior resistência à infiltração de água devido à não necessidade de ventilação frontal para liberar o ar quente gerado pela fonte luminosa. Existirão somente dissipadores de calor instalados na junção dos semicondutores para trocar de calor com o ambiente, porém isto poderia ser feito pela parte traseira do farol, o que não afetaria a região atualmente crítica quanto aos aspectos de aparência (região da lente). Desta forma poderiam ser concebidos faróis à LEDs totalmente estanques, isto é, sem a necessidade da troca de ar com o ambiente como nos faróis convencionais. Não havendo umidade no interior do mesmo, logo também não haverá a condensação de água, o que atualmente é motivo de várias reclamações de clientes finais às concessionárias de veículos. Além disso, conforme já detalhado no capítulo 2 deste trabalho, a própria característica construtiva dos LEDs os tornam mais robustos quanto a impactos e vibrações se comparados às lâmpadas. Desta forma podemos afirmar que estes dispositivos emissores de luz são mais robustos, não só em sua aplicação final mas também durante o seu manuseio, transporte e montagem, devido à sua maior resistência mecânica.

Por fim, o tamanho reduzido e a maior flexibilidade dos LEDs, devido à possibilidade de composição de vários dispositivos para formar um farol, sinalizam grandes possibilidades potenciais de inovações no “design” dos faróis automotivos. Além disso, devido à possibilidade da luz gerada nos LEDs brancos ter tons tendendo tanto para o azul quanto para o amarelo, também poderão ser concebidos

faróis cujo tom da luz emitida pelo mesmo seja um diferencial positivo para a maioria dos clientes finais.

6.2 Desvantagens e barreiras a serem vencidas

Atualmente a maior desvantagem dos LEDs brancos de alto desempenho em relação às lâmpadas é sem dúvida o seu alto custo individual. Este fato inviabiliza hoje o seu uso na maioria das aplicações na área de iluminação, não somente na área automotiva. Para que esse custo caia a níveis que viabilizem a sua aplicação é necessário vencer dois obstáculos a médio prazo, são eles: aumentar o volume de produção para reduzir seu custo em escala e aumentar a eficácia (lumens/watt) dos LEDs. Na seção 6.3 são apresentados alguns dados sobre o desempenho deste último índice ao longo das últimas décadas.

Conforme já detalhado no decorrer deste trabalho, a dissipação do calor na junção do semicondutor é uma barreira que dificulta a sua utilização porém atualmente este tema é alvo de constantes estudos objetivando o desenvolvimento de soluções mais robustas, como por exemplo a otimização dos dispositivos dissipadores de calor. Por outro lado, não podemos esquecer o fato positivo da luz gerada pelos LEDs não transmitir calor, conforme mencionado na seção 6.1.

Uma segunda barreira a ser melhor trabalhada até a consolidação dos faróis à LED diz respeito ao projeto ótico dos mesmos. De modo análogo ao problema da dissipação de calor, o projeto ótico dos faróis à LED é hoje objeto de estudo de vários especialistas do meio da iluminação veicular ao redor do mundo. Conforme também pôde ser constatado através dos ensaios descritos no capítulo 4 e resultados apresentados nas figuras 4.1 e 4.2, o nosso protótipo a LED apresentou resultados significativamente inferiores aos demais em relação ao seu desempenho fotométrico, embora os valores obtidos estejam acima do mínimo exigido pelo Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN. Contudo, acreditamos que já nos próximos anos estarão no

mercado dispositivos emissores de luz com eficácia superior, o que permitirá o desenvolvimento de faróis a LEDs de maior desempenho.

Também classificamos como uma barreira a ser vencida, a variação de cor encontrada na luz emitida pelos LEDs brancos, fato que pôde ser constatado durante a construção e ensaios de laboratório realizados com o protótipo de farol a LED. Embora este item tenha sido mencionado como uma vantagem para a flexibilidade do estilo dos faróis à LED, os fabricantes desses semicondutores atualmente não dominam totalmente seu processo produtivo a ponto de produzir somente LEDs de um determinado tom de luz branca. Desta forma, atualmente é necessário que os LEDs passem por um processo de teste e classificação para que os mesmo sejam devidamente separados de acordo com a cor da luz emitida pelo mesmo.

6.3 Estimativa da evolução da eficácia luminosa e dos custos dos LEDs

Conforme pesquisa realizada por Tsao (2003) do “*Sandia National Laboratories*”, uma verdadeira revolução no mundo da iluminação deverá acontecer entre cinco e dez anos, quando a eficácia dos dispositivos emissores de luz de “estado sólido” (LEDs) deverão saltar dos atuais 20 lm/watt para valores próximos a 100 lm/watt, corroborando às previsões de Bergh et al (2001) mostrados na figura 5.3. E, concretizando-se esta previsão, haverá espaço para que os LEDs substituam primeiramente as lâmpadas incandescentes e na seqüência as de descarga de gás. Logicamente esta tendência não está restrita ao mundo automotivo, pelo contrário, esta “revolução” deverá iniciar-se pelos setores de iluminação residencial e de aplicações específicas, como aplicações hospitalares por exemplo.

Os benefícios desta revolução serão primeiramente: a redução no consumo de energia elétrica; e, em segundo plano, a redução do impacto ambiental provocado pelas usinas termo-elétricas e nucleares, principalmente nos países de primeiro mundo onde a demanda por energia é bastante elevada.

No segmento automotivo podemos concluir que os faróis a LEDs já são viáveis tecnicamente e dentro de alguns poucos anos teremos os primeiros veículos circulando com este tipo de tecnologia. Alguns pesquisadores afirmam que dentro de 5 anos este cenário já será uma realidade nos chamados mercados de primeiro mundo.

6.4 Propostas para continuidade deste trabalho

Este trabalho não encerra as discussões sobre o assunto, muito pelo contrário, há alguns pontos que merecem um estudo mais aprofundado. Como exemplos de trabalhos correlatos que dariam continuidade a este tema, podemos sugerir:

- Estudos comparativos para a função “facho alto” (não abordada neste trabalho).
- Propor soluções ou até mesmo aplicações alternativas para as diferentes tonalidades de branco encontradas neste tipo de LED.
- Aprofundar o estudo sobre a possibilidade de se fazer um farol selado, ao menos parcialmente. Como dissemos isto evitaria por completo os problemas de infiltração e condensação de água nos faróis, ainda não resolvidos totalmente pela indústria automobilística.

7. ANEXOS

Figura 7.1: Lente tipo “calota-esférica”

Figura 7.2: LED com dissipador de calor utilizado no protótipo ensaiado

Figura 7.3: Farol Protótipo com 6 LEDs na função fecho baixo

Figura 7.4: Farol Protótipo finalizado

Figura 7.5: Farol com lâmpada H7 (normal de produção)

Figura 7.6: Farol com lâmpada de descarga de gás tipo Xenon (normal de produção)

Business Center Automotive Aachen	Product Information Sheet for Micro Power Xenon Light D2S	No. 1000 - 1
		1996-09-01 NEW
		1996-03-01 OLD

Applications

- projection headlights
- working lights
- rally lights
- optional lighting
- portable lighting

Technical data	R99
Testpower at	35W ±0.3W
Voltage	85V ± 17V
Luminous flux	3200 lm ±450 lm
Lumen maintenance	1500 h 75%
Colour x	0.380 ±0.025
Colour y	0.390 ±0.015
Colour temp.	4100 k

• Starting characteristics

Starting voltage, max.*	23 kV
Starting current, max.	2.6 A
Wattage, max.	75.0 W
Run-up time, max.*	1.3 s

• Service life*

	Min	Typ.
Tc>	2500	3000
B3>	1000	1300

*Depending on ballast system applied

• Temperatures

Temperature at pinch, max:	350 °C
Temperature at protective bulb:	700 °C
Temperature at lamp base, max:	240 °C

Micro Power Light	_____
85V 35W	_____
Cap: P32d-2 ¹⁾	_____
Type: 85122	_____
ECE R99	_____
Code No. 9285 013 29400	_____
D2S	_____
Made in Germany/Aachen	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____

¹⁾ according to IEC 61-1 sheet 7004-111-1

© Property of Business Centre Automotive Aachen-Germany MPDL / PS 1000-1	Page 1
---	--------

Figura 7.8: Especificação técnica – Philips. Lâmpada de descarga de gás.
(Technical Data Sheet, versão 5.0, 2003 – 1 CD-ROM.

Electrical Characteristics at 700mA, Junction Temperature, $T_J = 25^\circ\text{C}$

COLOR	FORWARD VOLTAGE V_F (V) ⁽¹⁾			DYNAMIC RESISTANCE ⁽²⁾ (Ω) R_D	TEMPERATURE COEFFICIENT OF FORWARD VOLTAGE ⁽³⁾ (mV/°C) $\Delta V_F / \Delta T_J$	THERMAL RESISTANCE, JUNCTION TO BOARD (°C/W) $R_{\theta JA}$
	MIN.	TYP.	MAX.			
GREEN	5.43	6.84	8.31	1.0	-4.0	11
CYAN	5.43	6.84	8.31	1.0	-4.0	11
BLUE	5.43	6.84	8.31	1.0	-4.0	11
ROYAL BLUE	5.43	6.84	8.31	1.0	-4.0	11

Notes:

1. Lumileds maintains a tolerance of $\pm 0.06\text{V}$ on forward voltage measurements.
2. Dynamic resistance is the inverse of the slope in linear forward voltage model for LEDs. See Figure 3.
3. Measured between $25^\circ\text{C} \leq T_J \leq 110^\circ\text{C}$ at $I_F = 700\text{mA}$.

Absolute Maximum Ratings

PARAMETER	GREEN/CYAN/ BLUE/ROYAL BLUE
DC FORWARD CURRENT (mA) ⁽¹⁾	700
PEAK PULSED FORWARD CURRENT (mA)	1000
AVERAGE FORWARD CURRENT (mA)	700
ESD SENSITIVITY ⁽²⁾	$\pm 16,000\text{V HBM}$
LED JUNCTION TEMPERATURE ($^\circ\text{C}$)	135
ALUMINUM-CORE PCB TEMPERATURE ($^\circ\text{C}$) ⁽³⁾	70
STORAGE & OPERATING TEMPERATURE ($^\circ\text{C}$)	-40 TO +120

Notes:

1. Proper current derating must be observed to maintain junction temperature below the maximum. For more information, consult Luxeon Design Guide, available upon request.
2. LEDs are not designed to be driven in reverse bias. Please consult Lumileds' Application Brief AB11 for further information.
3. Allowable board temperature to avoid exceeding maximum junction temperature at maximum V_F limit at 700 mA based on thermal resistance of Star assembly.

Wavelength Characteristics, $T_J = 25^\circ\text{C}$

Figure 1.
Relative Intensity vs. Wavelength.

Figura 7.9: Especificação técnica – Lumileds. Luxeon V Star, pag. 4.
(Technical Data Sheet, 2004.)

8. REFERÊNCIAS

ACKERMANN, R. Automotive Lighting Reutlingen, Germany. LED Headlamps – Possibilities and Problems. Progress in Automotive Lighting Congress. Disponível em: <http://fgltweb.lt.e-technik.tu-darmstadt.de/Pal/PAL2003.com_programme.html>. Acessos: Janeiro de 2004.

ALBOUT, P. LED Module for Headlamp. Progress in Automotive Lighting Congress, September 2003. (SAE Technical Paper Series, 2003-01-0556).

ARTEB, Centro Tecnológico. A História da Iluminação Veicular. Encarte comemorativo 70 anos. São Paulo, 2004.

BERGH, A; CRAFT, G; DUGGAL A; HAITZ R; The promise and Challenge of Solid-State Lighting. Physics Today, v54, nº12. December 2001.

BOSCH. Automotive Handbook. Distribution: SAE Society of Automotive Engineers. ISBN 0-7680-0669-4. 5th. Edition. 2000

CAMILLI, M. C. Princípios de Estabilização Térmica e à Luz U.V. de Materiais Polímeros. Ciba-Geigy Química S/A - 1991.

CONTRAN - Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº. 692/88 1.988.

DERLOFSKE, J.V.; BULLOUGH, J. D. Discomfort and Disability Glare from Halogen and HID Headlamp System. Michigan: SAE 2002 World Congress, March 2002. (SAE Technical Paper Series, 2002-01-0010).

DERLOFSKE, J.V.; BULLOUGH, J. D.; HUNTER, C. M. Visual Benefits of High-Intensity Discharge Automotive Forward Lighting. Michigan: SAE 2002 World Congress, March 2002. (SAE Technical Paper Series, 2002-01-0259).

DERLOFSKE, J.V.; BULLOUGH, J. D.; Spectral effects of High-Intensity Discharge Automotive Forward Lighting on Visual Performance. (SAE Technical Paper Series, 2003-01-0559).

GUIGER FILHO, D.; TAKATA, C. Apresentação GT-Iluminação ANFAVEA sobre as regulamentações européia e americana. Brasília, 1.999.

HAMM, M. HID Headlamp Development: Performance Benchmark Development in World's Market. (SAE Technical Paper Series, 2004-01-1283).

JENNATO, S.; MCKEE, G. Consideration in LED Photometry. (SAE Technical Paper Series, 2001-01-0447).

KERN, R. S. Light-Emitting Diodes in Automotive Forward Lighting Application: Materials Engineering Solutions to Fundamental Challenges. (SAE Technical Paper Series, 2004-01-0225).

LEE S. How to Select a Heat Sink for semiconductors. Apresenta notas de aplicação e informações sobre o cálculo de Dissipadores de Calor para componentes eletrônicos. Disponível em <http://www.aavidthermalloy.com>. Acessos entre abril e maio de 2004.

LUMILEDS LIGHTING, U.S., LCC. California. Apresenta diversas notas de aplicação e informações técnicas sobre a família de LEDs LUXEON. Disponível em <http://www.lumiLEDs.com>. Acessos entre setembro de 2003 a dezembro. 2004.

LUMLEDS LIGHTNG, LLC. San Jose, CA. Application Brief AB17 – Benefits of Lumileds Solid State Lighting Solutions vs. Conventional Lighting. 2000.

LUMLEDS LIGHTNG, LLC. San Jose, CA. Module II: Thermal Design. 2.001.

LUMLEDS LIGHTNG, LLC. San Jose, CA. Technical Datasheet DS 30. Luxeon V Star. February / 2.004.

LUMLEDS LIGHTNG, LLC. San Jose, CA. Technical Datasheet DS 46. Luxeon III Star. September / 2.004.

MALVINO, A. P. Eletronic Principles. McGraw Hill, Ltda. São Paulo, 1987.

MANSUELLI, S.; NEUMANN, R. LED Lamp Reliability and Production Process Impact. (SAE Technical Paper Series, 1999-01-0389).

MORAN M.J.; SHAPIRO; H. N. Fundamentals of Egeineering Thermodynamics. 5 Edition. John Wiley & Sons, Inc., U.S. 2004

NATIONAL LIGHTING PRODUCT INFORMATION PROGRAM'S (NLPIP). Rensselaer Polytechnic Institute. LED Lighting System. Troy, NY. May 2003. v.7.

OLIVEIRA, SÍLVIO JR. Apostilas e notas de aula da matéria PMC-5601: Trabalho e Calor. 2004

OSRAM GmbH. Apresenta informações técnicas diversas sobre sua família de produtos. Disponível em <http://www.osram.com>. Acessos entre jan. 2004 a mar. 2005.

PERRACINI, R. Faróis de todos os tempos: Uma contribuição para a história da iluminação automotiva. Gráficos Buriti, São Paulo, 1.990.

PHILIPS AUTOMOTIVE LIGHTING. Technical Datasheet, v. 5.0 - 2.003. 1 CD-ROM

RAGGIO, J. LUMILEDS LIGHTING., USA. Enabling LED Forward Lighting Today. Progress in Automotive Lighting Congress. Disponível em: <http://fgltweb.lt.e-technik.tu-darmstad.de/Pal/PAL2003.com_programme.html>.

Acessos: Janeiro de 2004.

REILL, J.; BOGNER, G. OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Germany. Progress in Automotive Lighting Congress. Disponível em: <http://fgltweb.lt.e-technik.tu-darmstad.de/Pal/PAL2003.com_programme.html>. Acessos em: Janeiro de 2004.

SAZUKA, K. Koito Manufacturing Co., Ltd., Japan. LED Headlamps. (SAE Technical Paper Series, 2004-01-0437).

SCHWENKSCHUSTER, L. Hella KG Hueck & Co., Germany. Automotive LED-Application Using High –Power LEDs. Progress in Automotive Lighting Congress. Disponível em: <http://fgltweb.lt.e-technik.tu-darmstad.de/Pal/PAL2003.com_programme.html>. Acessos em: Janeiro de 2004.

SHIN, K. LED Junction temperature Measurement and its Application to Automotive Lamp Desing. (SAE Technical Paper Series, 2004-01-0224).

SIKTBERG, F.D. Guide Corporation, USA. Feasibility of LED Automotive Optical. Progress in Automotive Lighting Congress. Disponível em: <http://fgltweb.lt.e-technik.tu-darmstad.de/Pal/PAL2003.com_programme.html>. Acessos: Janeiro de 2004.

STEINER, J. C.; CLARCK, N. E. Bulb Usage Analysis of LED-Type Automotive Lighting. (SAE Technical Paper Series, 2003-01-0892).

STOUT, B. Development Implementation of Side Emitter LED's in Exterior Automotive Signal Lighting Application. (SAE Technical Paper Series, 2004-01-0221).

TABOLT, D. LEDs vs. The Light bulb. Technology Review, May 2003.

TAKATA, C. Concepção Fotométrica de Faróis.Seminário VALEO Iluminação. São Paulo, 2.000.

TSAO, J. Roadmap projects significant LED penetration of lighting market by 2010. Laser Focus World, May 2003.

WALKING A. Philips Lighting, France. Positive-Contrast-Concept Like Car Headlights. Progress in Automotive Lighting Congress. Disponível em: <http://fgltweb.lt.e-technik.tu-darmstadt.de/Pal/PAL2003.com_programme.html>. Acessos : Janeiro de 2004.

WALL, F.; HAQUE, S.; RUDAZ, S.; BHAT, J.; COLLINS, D.; MARTINS, S.; Packaging Challenges of High-Power LEDs for Solid State Lighting. Lumiled Lighting San Jose, CA. 2003.

WANG, B.; JIAO, J. -Studies for headlamp Optical Design Using LEDs. (SAE Technical Paper Series, 2004-01-0434).

9. APÊNDICES

9.1 Definições e relações básicas de fotometria

- Fluxo Luminoso

Definição: Quantidade total de luz emitida por uma fonte luminosa

Símbolo: “ Φ ”

Unidade de medida: lumen [lm]

- Intensidade Luminosa

Definição: Quantidade de luz emitida numa determinada direção

Símbolo: “ I ”

Unidade de medida: candela [cd]

- Iluminamento

Definição: Quantidade de luz recebida por um objeto

Símbolo: “ E ”

Unidade de medida: lux [lx]

Relações entre “Iluminamento”, “Intensidade luminosa” e “Fluxo luminoso”:

$$E = I / d^2$$

Onde: “d” = distância

$$E = \Phi / S$$

Onde: “S” = área