

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**APLICAÇÃO DE LEDS NO CONJUNTO ÓTICO DIANTEIRO DE
VEÍCULOS DE PASSEIO**

Jackson Liu

**São Paulo
2008**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**APLICAÇÃO DE LEDS NO CONJUNTO ÓTICO DIANTEIRO DE
VEÍCULOS DE PASSEIO**

**Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Graduação em Engenharia**

Jackson Liu

**Orientador: Prof. Ronaldo de Breyne
Salvagni**

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**São Paulo
2008**

FICHA CATALOGRÁFICA

Liu, Jackson

**Aplicação de LEDs no conjunto ótico dianteiro de veículos de passeio / Jackson Liu. – São Paulo, 2008.
80 p.**

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Faróis 2.Veículos automotores 3.Diodos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por me mostrar o caminho;

Ao professor Ronaldo de Breyne Salvagni, por me orientar no caminho;

E aos amigos, por caminharem juntos comigo.

RESUMO

A iluminação automotiva eficiente atualmente é indispensável para a segurança dos automóveis. Seu mercado hoje em dia está em grande expectativa para as novas tecnologias que entrarão no mercado em poucos anos, e que revolucionará diversos conceitos de como iluminar melhor o caminho tomado pelo condutor do veículo.

Analisaremos neste trabalho a situação atual do mercado da iluminação automotiva frontal, e exploraremos as tecnologias que ainda estarão por vir. Com base no que existe atualmente, podemos estabelecer um *benchmark* de modo a elevar ainda mais o nível de luminosidade que o farol automotivo pode prover, e conseqüentemente, a segurança na condução de um veículo. Para tanto, veremos como a aplicação da tecnologia de LEDs de alta intensidade mudará os conceitos existentes atualmente nos faróis dianteiros. Por fim, veremos um estudo de aplicação a um veículo real fabricado e vendido no Brasil e quais serão as vantagens que esta nova tecnologia impactará.

ABSTRACT

Efficient automotive lighting is essential for the safety of the automobiles nowadays. Its market currently holds great expectation for the new technologies that are about to debut in a few years, and that will revolutionize several concepts of the ways to better illuminate the path of the vehicle.

This work will analyze the current situation of the automotive front-lighting market, and will explore the technologies that are still to come. On the grounds of what currently exists, a benchmark can be established in order to raise the luminosity levels that a automotive headlight can provide, and consequently, the cruising safety. In order to do so, the way how the appliance of high intensity LED technology will change the currently existing front-lighting concepts is to be studied. At last, a study of LEDs applied in a vehicle made and sold in Brazil will be done, as well as what advantages will this new technology bring.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO	2
3. CRONOGRAMA	3
4. ESTUDOS PRÉVIOS	4
4.1 Faróis de bulbos halógenos	4
4.2 Faróis de descarga de alta intensidade (HID) de xenônio.....	4
4.2 Farol de lâmpadas de tubos de gás neônio	6
5. APLICAÇÃO DE LEDS PARA FACHO ALTO E BAIXO DO FAROL DIANTEIRO DE UM VEÍCULO	8
5.1 Novas Tecnologias.....	11
5.1.1 Sistema avançado de iluminação frontal (AFS)	11
5.1.2 Sistema de iluminação linkado a câmeras (CLS).....	16
5.1.3 Integração de LEDs no desenvolvimento de novas tecnologias.....	17
5.2 Mercado.....	21
5.3 Parâmetros para a aplicação de LEDs no conjunto ótico luminoso dianteiro de um veículo.....	28
5.3.1 Custo.....	29
5.3.2 Estilo	30
5.3.3 Desempenho.....	31
5.3.3.1 Gerenciamento do calor no farol	31
5.3.4 Volume do pacote	37
5.3.5 Eficiência	38
5.3.6 Peso	39
5.3.7 Durabilidade.....	40
5.4 Determinação da melhor alternativa para o projeto do farol.	41
5.5 Resultados	45
5.6 Aplicação de faróis de LEDs no veículo Chevrolet Vectra Elite.	51

5.6.1 Técnicas de direcionamento de fecho	52
5.6.1.1 Lentes óticas	53
5.6.1.2 Refletor ótico	54
5.6.1.3 Projetor ótico	55
5.6.1.4 Fibra Ótica.....	56
5.6.2 Análise de modelos existentes	57
5.6.3 Matriz de decisão	62
5.6.3.1 Discussão.....	65
5.6.4 O mercado nacional	67
5.6.5 Construção.....	69
6. CONCLUSÃO	77
7. REFERÊNCIAS.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1 – <i>BMW</i> equipado com faróis de <i>HID</i> de xenônio	5
Figura 4.2 – <i>BMW Z8</i>	7
Figura 4.3 – <i>Lincoln Mark VIII</i>	7
Figura 5.1 – Protótipo da Hella de farol de LEDs permite liberdade estilística	9
Figura 5.2 – <i>Lincoln MKX</i> 2007.....	9
Figura 5.3 – <i>Honda Accord</i> 2006.....	9
Figura 5.4 – Distribuição do fecho luminoso para Town Light.....	12
Figura 5.5 – Distribuição do fecho luminoso para Country Light	12
Figura 5.6 – Distribuição do fecho luminoso para Motorway Light.....	12
Figura 5.7 – Distribuição do fecho luminoso para Adverse Weather Light.....	13
Figura 5.8 – Distribuição do fecho luminoso para High Beam	13
Figura 5.9 – Distruições dos fochos luminosos do <i>AFS</i>	13
Figura 5.10 – Módulo de projeção de farol <i>HID</i> de xenônio com sistema rotativo....	14
Figura 5.11 – Módulo de projeção de farol <i>HID</i> de xenônio equipado com <i>AFS</i>	14
Figura 5.12 – Iluminação flexível dinâmica	15
Figura 5.13 – <i>BMW série 3</i> equipado com <i>AFS</i>	15
Figura 5.14 – <i>Renault Modus</i> equipado com iluminação flexível estática.....	15
Figura 5.15 – Intensidades de pico de faróis com <i>AFS</i> equipados com LEDs e com lâmpadas de <i>HID</i> de xenônio <i>VarioX</i>	18
Figura 5.16 – Fluxo de luz de faróis com <i>AFS</i> equipados com LEDs e com lâmpadas de <i>HID</i> de xenônio <i>VarioX</i>	18
Figura 5.17 – Fluxo de luz de faróis com <i>AFS</i> equipados com LEDs e com lâmpadas de <i>HID</i> de xenônio <i>VarioX</i> (dobrado a quantidade de LEDs de iluminação próxima).	19
Figura 5.18 – Previsão de mercado para o <i>AFS</i> , em milhões de dólares americanos.	21
Figura 5.19 – LEDs do fecho baixo do farol do modelo <i>Lexus LS 600h</i>	22
Figura 5.20 – <i>Cadillac Escalade Platinum</i> 2008.	23
Figura 5.21 – Farol do <i>Cadillac Escalade Platinum</i> 2008 com fecho baixo aceso	23
Figura 5.22 – Farol do <i>Cadillac Escalade Platinum</i> 2008 com ambos fochos acesos.....	23
Figura 5.23 – Farol dianteiro de LEDs do <i>Audi R8</i>	24
Figura 5.24 – Farol dianteiro de LEDs do <i>Audi R8</i>	24
Figura 5.25 – Farol dianteiro com LEDs de posição do <i>Audi R8</i>	24
Figura 5.26 – Projeção do mercado americano para cada sistema de iluminação.	25
Figura 5.27 – Previsão do mercado de diferentes aplicações de LEDs.....	26
Figura 5.28 – Renderização de um farol composto por LEDs.....	30
Figura 5.29 – Volumes relativos dos principais componentes do sistema do farol	37
Figura 5.30 – Eficiência pela corrente, para LED de chip 1x4.....	38
Figura 5.31 – Fluxo relativo pela temperatura de um LED de chip 1x4.	38
Figura 5.32 – Massa relativa dos principais componentes do sistema do farol.....	39
Figura 5.33 – <i>Porsche 911</i> com iluminação por LEDs	52
Figura 5.34 – Representação de farol com lentes óticas.....	53
Figura 5.35 – Representação de farol com refletor ótico.	54
Figura 5.36 – Representação de farol com projetor ótico.....	55

Figura 5.37- Reflexão em fibra ótica.....	56
Figura 5.38- Fibra ótica em farol.....	56
Figura 5.39- Ilustração do funcionamento do farol do <i>LS600h</i>	58
Figura 5.40- Luz de posição e indicador de direção do <i>R8</i>	58
Figura 5.41- Farol do <i>Audi R8</i>	59
Figura 5.42- Farol do <i>Audi R8</i>	59
Figura 5.43- Farol do <i>Audi R8</i> totalmente aceso.....	60
Figura 5.44- Farol do <i>Escalade Platinum</i>	61
Figura 5.45- <i>Citroën C4 Pallas</i> com faróis de xenônio e iluminação flexível	69
Figura 5.46- Ostar Headlamp de 5 chips, da Osram Opto Semiconductors	71
Figura 5.47- Unidade de LED da <i>Osram</i> contendo 5 chips	72
Figura 5.48- Distribuição luminosa de um LED com 5 chips.....	72
Figura 5.49- Montagem dos conjuntos de LEDs de 5 chips em um projeto ótico. ...	74
Figura 5.50- Montagem de LED na lente de um projetor ótico	75
Figura 5.51- Ilustração do protótipo da <i>Hella</i>	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Cronograma do primeiro semestre	3
Tabela 3.2 - Cronograma do segundo semestre.....	3
Tabela 5.1 - Projeção dos preços de diferentes aplicações de LEDs.....	27
Tabela 5.2 - Matriz de decisão dos sistemas de convecção forçada para dissipação de calor do conjunto do farol.....	34
Tabela 5.3 - Influência da temperatura de junção na durabilidade de LED branco. .	40
Tabela 5.4 - Influência dos efeitos da corrente na durabilidade de um LED branco.	40
Tabela 5.5 - Matriz de decisão do projeto de farol dianteiro veicular.	40
Tabela 5.6 - Matriz de decisão do projeto de farol dianteiro do Vectra.	40
Tabela 5.7 - Sistemas de iluminação utilizados no mercado analisado.	67
Tabela 5.8 - Relação das tecnologias e geração luminosa dos veículos analisados ..	68
Tabela 5.9 - LEDs existentes atualmente para aplicação em faróis automotivos.....	70
Tabela 5.10 - Descrição do sistema adotado para o veículo analisado	73

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia da iluminação automotiva teve um desenvolvimento relativamente estável por diversos anos, com avanços ocasionais esporádicos, como o desenvolvimento de bulbos de halogênio, o aumento da complexidade dos refletores e o desenvolvimento de lâmpadas de descarga de alta intensidade (*High Intensity Discharge – HID*).

Por diversas décadas durante o século vinte, a única fonte de iluminação externa frontal automotiva era fornecida principalmente pelo bulbo de filamento incandescente de tungstênio. No período entre 1960 e 1970, surgiram os bulbos incandescentes de halogênio, que acabou por dominar o mercado de iluminação automotiva em pouco tempo, pois ofereciam um desempenho superior, produzindo até 50% mais luz do que bulbos incandescentes de tungstênio, tinham vida útil consideravelmente maior e, além disso, gastavam menos energia.

Atualmente, lâmpadas de halogênio ainda são a fonte de luz dominante em faróis de automóveis. No entanto, com o constante desenvolvimento de novas tecnologias, oferecendo produtos mais qualificados, as lâmpadas de halogênio eventualmente serão substituídas. Hoje em dia, a tendência do mercado é a expansão do uso de lâmpadas de descarga de alta intensidade de xenônio, tecnologia introduzida no começo dos anos 90.

Do mesmo modo, mesmo as lâmpadas de *HID* usadas atualmente serão ultrapassadas por novas tecnologias. Para tanto, cada vez mais o mercado aponta para o desenvolvimento da iluminação automotiva usando diodos emissores de luz (LED).

A tecnologia do LED em aplicações luminosas em veículos de passeio surgiu na década passada em lâmpadas de freio e piscas de sinalização, e agora emerge como a fonte de luz em carros do futuro, acerca do qual traz grandes expectativas para o mercado automotivo.

2. OBJETIVO

O objetivo do projeto é a avaliação da aplicação da tecnologia do LED para faróis automotivos. Além disso, estudaremos sua aplicação também para um veículo específico. O veículo a ser estudado para tanto será o *Chevrolet Vectra*, atualmente fabricado pela *General Motors do Brasil*, em sua versão *Elite*. A escolha deste veículo se dá nas bases do fato de ser este o carro de maior representatividade de uma grande montadora no Brasil. A escolha de veículos importados, que porventura poderiam ter representatividade ainda superior, foi descartada, pois a intenção é estudar a aplicação desta tecnologia em produtos desenvolvidos, fabricados e vendidos dentro do território nacional.

3. CRONOGRAMA

O cronograma do projeto é apresentado a seguir:

Primeiro Semestre

		MARÇO					ABRIL					MAIO				JUNHO			
No.	Atividade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1	Pesquisa Bibliográfica	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
2	Estudo dos tipos lâmpadas			X	X	X	X	X	X										
3	Pesquisa de novas tecnologias			X	X	X	X	X	X										
4	Pesquisa do mercado de faróis automotivos					X	X	X	X	X	X								
5	Definição dos parâmetros do farol de LEDs					X	X	X	X	X	X	X	X						
6	Definição da matriz para escolha de farol													X	X	X	X	X	X

Tabela 3.1 : Cronograma do primeiro semestre

Segundo Semestre

		JULHO					AGOSTO					SETEMBRO				OUTUBRO				NOVEMBRO			
No.	Atividade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	Pesquisa Bibliográfica	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
7	Definição da matriz para o farol do Vectra	X	X	X	X	X	X	X	X	X													
8	Detalhamento do farol							X	X	X	X	X	X	X	X								
9	Elaboração do relatório final												X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabela 3.2 : Cronograma do segundo semestre

4. ESTUDOS PRÉVIOS

Para melhor compreender as possibilidades das aplicações da tecnologia de LEDs na iluminação frontal no mercado automotivo, apresentaremos as diversas fontes de luz que atualmente existem, assim como uma explicação dos seus diferentes modos de aplicação.

4.1 Faróis de bulbos halógenos

Faróis de bulbos halógenos automotivos foram lançados por volta da década de 70, e permitiu melhorias significativas na iluminação, quando comparadas aos faróis de tungstênio. Uma lâmpada halógena é uma lâmpada de filamento incandescente fechado em um invólucro preenchido de gás inerte. Atualmente as lâmpadas de halogênio são a fonte de luz dominante no mercado de faróis automotivos.[8] Com o desenvolvimento gradual de novas tecnologias, esse tipo de lâmpada vem perdendo espaço no mercado. Seu espectro emitido produz uma luz amarelada, que não simula muito bem a iluminação natural. [7]

4.2 Faróis de descarga de alta intensidade (*HID*) de xenônio

Atualmente, cada vez mais faróis de *HID* de xenônio estão ganhando espaço no mercado de faróis automotivos. Sua introdução se deu em 1991, com a apresentação pela *BMW* de seu modelo *série 7* com este atributo. Desde então, a tecnologia de lâmpadas de *HID* de xenônio se popularizou, chegando a veículos de grande produção. Além disso, possui grande penetração no mercado de acessórios, sendo vendido como alternativa aos faróis instalados na fábrica, e com adaptação possível (muitas vezes de maneira incorreta) para praticamente todos os modelos de automóveis.



Figura 4.1 – BMW equipado com faróis de *HID* de xenônio

Lâmpadas de descarga de alta intensidade geram um arco elétrico como fonte de luz dentro de um ambiente selado com o gás xenônio. O uso do xenônio se dá pelas suas capacidades de aquecimento muito rápidas, produzindo a luminosidade requerida quase que instantaneamente. Este fator é fundamental para a segurança do veículo. Para que o arco elétrico seja gerado, lâmpadas de *HID* necessitam de um reator. O reator pode ser alocado fora do conjunto ótico, o que garante que a unidade de iluminação não seja prejudicada por limitações devido à necessidade deste. [14]

O vidro usado por bulbos de lâmpadas de *HID* possui filtros ultravioletas (UV) que filtram espectros UV médios (com ondas médias, de 300 nm a 200 nm) e distantes (com ondas UV curtas, de 200 nm a cerca de 100 nm), que são nocivos à saúde. Espectros UV mais longos, conhecidos por UV próximos, tem sua irradiação inofensiva permitida pela lâmpada de *HID* de xenônio, o que faz com que a luz emitida tenha um aspecto azulado, considerado mais próximo do espectro da luz natural do que a iluminação de aspecto amarelado de lâmpadas incandescentes. [14]

Além deste benefício, a iluminação provida por lâmpadas de *HID* chega a ser até três vezes mais intensa do que a originada pela lâmpada de filamento incandescente de halogênio, utilizando a mesma quantidade de energia. Sua vida útil chega a ser até duas vezes superior, e a ausência do filamento incandescente torna este tipo de lâmpada mais resistente ao choque. Ao se mostrar mais eficiente e necessitar de menor quantidade de energia, em relação às lâmpadas incandescentes, lâmpadas de *HID* permitem que sejam usados unidades de luz de menor tamanho, o que permite maior liberdade aos engenheiros e *designers* no projeto do veículo. [14]

Os faróis de xenônio devem atingir seu auge na penetração do mercado por volta de 2010. A partir deste ano, sua participação deverá começar a declinar, com o aumento da aplicação de faróis de LEDs, que deverão se sobrepor no mercado por volta de 2013. [25]

4.2 Farol de lâmpadas de tubos de gás neônio

Lâmpadas de neônio também usam um arco elétrico dentro de um ambiente selado com gás inerte para produzir iluminação. Neste caso, o gás utilizado é o neônio. Assim como no caso da lâmpada de gás xenônio, necessitam de um reator para que o arco elétrico seja criado, que pode ser localizado separadamente do conjunto ótico, o que remove restrições que eventualmente a presença deste causaria.

Apesar de compartilhar muitos dos atributos de lâmpadas de *HID* de gás xenônio, lâmpadas de neônio, no entanto, tem pouca participação na iluminação frontal do veículo. A maioria das aplicações nas unidades iluminadoras frontais foi em carros-conceito, sendo que nenhum modelo chegou a entrar na linha de produção apresentando este tipo de farol. No entanto, lâmpadas de gás neônio ganharam algum espaço em outras aplicações luminosas em carros. Hoje em dia, alguns modelos apresentam parte da iluminação traseira realizada por este tipo de lâmpadas. Em 1995, a *Ford* apresentou seu modelo de grande produção *Explorer*, usando lâmpadas de gás neônio na terceira luz de freio. Três anos depois, a *Ford* apresentou novamente, em sua marca subsidiada *Lincoln*, o modelo *Mark VIII*, com iluminação com lâmpadas de neônio em uma peça que atravessava a tampa de seu porta-malas. No mesmo ano, a *BMW* introduziu seu modelo esportivo *Z8*, de baixa produção, com as lanternas traseiras dotadas integralmente com esta tecnologia.



Figura 4.2 : *BMW Z8*



Figura 4.3 : *Lincoln Mark VIII*

A iluminação provida por lâmpadas de gás neônio possui um efeito estilístico muito interessante, devido principalmente às baixas limitações do formato e do comprimento da lâmpada. E também, toda a lâmpada, devidamente preenchida pelo gás, acende de maneira uniforme, causando uma impressão muito positiva em termos de *design*. Como não possuem filamento incandescente, têm resistência ao choque superior às lâmpadas comuns. Além disso, lâmpadas de descarga de gás de baixa pressão possuem a característica de acendimento muito rápido, normalmente atingindo sua total luminosidade em menos de um milissegundo, quando lâmpadas de filamento incandescentes levam até 250 milissegundos para tanto. Dessa maneira, além de permitirem uma liberdade estilística maior para os projetistas, lâmpadas de gás neônio têm a seu favor o fator da segurança, quando aplicados às luzes de freio. Essa diferença no tempo de acendimento influi diretamente no tempo de reação do motorista que, em termos de frenagem, chega a representar até 7 metros de diferença durante a parada de um veículo viajando a 100 km/h. O custo de lanternas com esta tecnologia é consideravelmente superior às lâmpadas comuns, no entanto. Isso reflete no fato que quase a totalidade dos carros que utilizam maiores aplicações destas lâmpadas são modelos que ocupam categorias superiores no mercado automotivo.

[14]

5. APLICAÇÃO DE LEDS PARA FACHO ALTO E BAIXO DO FAROL DIANTEIRO DE UM VEÍCULO

A renovação tecnológica no mercado automotivo se dá em ritmo constante, em todos os segmentos de carros e em todas as partes do veículo. Vez ou outra, uma grande inovação estabelece um novo *benchmark* no mercado, e faz com que todos os concorrentes corram atrás para não ficarem ultrapassados. Muitas tecnologias, no entanto, são desenvolvidas gradualmente e simultaneamente por diversos fabricantes e fornecedores.

Para o caso do mercado de faróis automotivos, é previsível a evolução tecnológica que se dará dentro de alguns anos. A introdução da iluminação provida por LEDs já aconteceu em modelos alguns modelos *high-end*, nos carros de maior representatividade de algumas marcas. Como já foi discutido em tópicos anteriores, essa evolução se dará de uma maneira gradual, com a substituição de lâmpadas halógenas e lâmpadas de *HID* como fontes de luz predominantes no mercado automotivo, pela iluminação por LEDs. No entanto, esta lenta evolução tem grande potencial para se tornar uma verdadeira revolução no mercado automotivo, com as empresas revendo totalmente os conceitos dos futuros projetos. Apesar de à primeira vista parecer ser muito semelhante o processo de substituição dos faróis de *HID* por LEDs ao processo de substituição dos faróis de filamento incandescente de halogênio por faróis de *HID*, podemos prever que o impacto da introdução da iluminação por LEDs nos carros será imensuravelmente superior ao processo anterior. Isso por que a tecnologia do LED automotivo, atualmente em seu estágio inicial de desenvolvimento, deve ser ainda aprimorada de modo a extrapolar qualquer parâmetro hoje estabelecido por faróis de *HID*. Mas, além disso, podemos citar principalmente que a aplicação de LEDs para a iluminação automotiva revolucionará o *design* dos veículos no futuro, por permitir uma flexibilidade estilística até hoje não encontrada nos conjuntos óticos dianteiros. Projetistas terão uma liberdade na concepção de novos veículos que não existe atualmente, com as limitações impostas pela relativa padronização existente nos faróis dianteiros de automóveis.



Figura 5.1: Protótipo da Hella de farol de LEDs permite liberdade estilística

Por diversos anos, LEDs já possuem reconhecimento como fontes de luz confiáveis e econômicas. Sua aplicação em iluminação exterior de veículos data desde o começo dos anos 90, quando foram primeiramente usadas na terceira luz de freio. Atualmente, diversos fabricantes aplicam LEDs no conjunto luminoso traseiro, oferecendo como principais vantagens em relação a lâmpadas comuns, o ciclo de vida muito superior, chegando a superar o ciclo de vida do próprio veículo, redução do espaço ocupado, robustez à impactos e um tempo de acendimento muito inferior.



Figura 5.2: *Lincoln MKX* 2007



Figura 5.3: *Honda Accord* 2006

Este último atributo chega a influenciar na segurança no trânsito. Assim como para luzes de freio com aplicação de lâmpadas de neônio, mencionados anteriormente, luzes de freio por LEDs possuem um tempo de acendimento semelhante, na ordem de 250 milissegundos mais rápido do que um filamento incandescente. [14]

A segurança atualmente é o fator central no desenvolvimento da iluminação externa de um veículo. Apesar do desenvolvimento de lâmpadas de LEDs ter sido guiado inicialmente por motivos estilísticos, a melhoria da visão dos motoristas, proporcionado pelas lâmpadas de *HID* deve ser ampliada com a aplicação da iluminação por LEDs.

Além dos atributos já discutidos, devemos observar que atualmente já existe uma tendência de evolução do conjunto ótico dianteiro do carro, não só de sua fonte luminosa, mas de novos recursos que extrapolam a visão das capacidades do farol de um carro. As maiores novidades em desenvolvimento atualmente são o sistema avançado de iluminação frontal (*Advanced Front-Lighting System – AFS*), a iluminação adaptativa de curvas (*Curve Adaptive Lighting – CAL*) e o sistema de iluminação linkado a câmeras (*Camera-linked lighting systems*) com tecnologia *CMOS* (*Complementary Metal Oxide Semi-conductor*). Todas essas novas tecnologias, isoladamente ou combinados, tem potencial para mudar significativamente a maneira como o farol do carro atua. A introdução dos LEDs e sua adaptação a esses sistemas permitirão uma liberdade ainda maior na dinâmica do farol dianteiro, assim como poderão mutuamente criar sistemas de iluminação cada vez melhores para os carros.

Este capítulo apresentará as tecnologias que estão entrando no mercado de iluminação automotiva e como a aplicação dos LEDs se integra à essas inovações. Será apresentada também a situação atual e projeções futuras do mercado para LEDs de iluminação automotiva. Isso permitirá que se visualize de maneira mais objetiva a importância deste trabalho, com a previsão da expansão deste mercado. A seguir, abordaremos os parâmetros do projeto de um farol de carro, mostrando esses atributos na aplicação de LEDs para o farol dianteiro. Levando em conta como prioridades deste projeto um farol de alta capacidade, inovador e com uma estética distinta e agradável, este estudo de viabilidade seguirá com a determinação da melhor alternativa de iluminação para o farol dianteiro automotivo, considerando os parâmetros já estudados e as alternativas já apresentadas. Por fim, a construção de uma matriz de decisão permitirá a escolha, de maneira sistemática, da melhor alternativa do projeto.

5.1 Novas Tecnologias

O desenvolvimento de novas tecnologias em iluminação automotiva sempre teve como fator central, questões de segurança ao volante. A eficiência energética dos sistemas de iluminação tem ganhado crescente notoriedade por motivos econômicos e ambientais. Atualmente novas tecnologias são guiadas por tais prioridades, e sistemas como o sistema avançado de iluminação frontal (*Advanced Front-Lighting System – AFS*), que engloba diferentes configurações de iluminação, assim como mecanismos que permitem a flexibilidade do fecho luminoso e o sistema de iluminação linkado a câmeras (*Camera-linked lighting systems - CLS*) com tecnologia CMOS (*Complementary Metal Oxide Semi-conductor*) têm seu desenvolvimento bastante avançado, e seu futuro é muito relacionado com a proliferação do uso de LEDs em sistemas de iluminação frontal.

5.1.1 Sistema avançado de iluminação frontal (*Advanced Front-Lighting System – AFS*)

O *AFS* é um sistema que combina uma variedade de capacidades que possibilita um grande aumento na eficiência do farol veicular. Englobando tecnologias que permitem diferentes configurações luminosas e a flexibilidade do fecho de luz, o *AFS* tem seu desenvolvimento muito ligado com a aplicação de LEDs nos faróis. Além disso, abre portas para sua aplicação junto à outras tecnologias, como a integração de sistemas de localização por GPS para otimizar o seu uso.

O sistema introduz ao mercado novas configurações de iluminação frontal, que reproduzem os seguintes tipos de distribuição de luz:

- Town Light (luz para cidade): produz uma distribuição simétrica de luz, com um espalhamento do fecho luminoso em regiões mais próximas do veículo. Possui um ângulo de cerca de 55° de abertura do espalhamento do fecho, com 580 lm de fluxo luminoso por farol e alcance de 70 metros.

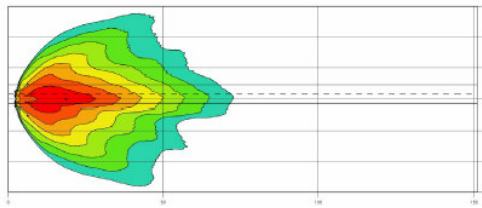


Figura 5.4: Distribuição do fecho luminoso para Town Light

Country Light (luz para campo): adequado para uma faixa de velocidades médias, esta função é caracterizada por um incremento do campo de visão no lado direito da estrada. Com ângulo de espalhamento de cerca de 37° , possui abertura do espalhamento inferior ao Town Light. Produz 600 lm de fluxo luminoso.

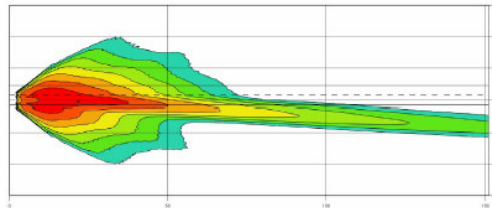


Figura 5.5: Distribuição do fecho luminoso para Country Light

Motorway Light (luz para estrada): produz características de iluminação adequadas para condução em alta velocidade em estradas, com aumento do campo de visão na faixa de rolamento em que está o veículo. O alcance da visibilidade aumenta para mais de 100 metros nesta situação

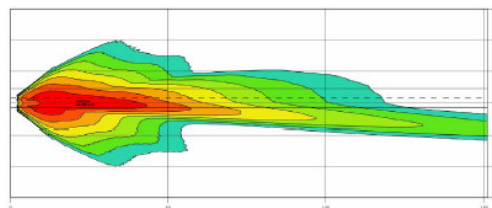


Figura 5.6: Distribuição do fecho luminoso para Motorway Light

Adverse Weather Light (luz para condições climáticas adversas): tem como principal função evitar o ofuscamento em veículos trafegando no sentido oposto, causado pelo brilho do reflexo do fecho luminoso. Esta opção diminui

consideravelmente o brilho do reflexo e reduz o incômodo causado a outros motoristas.

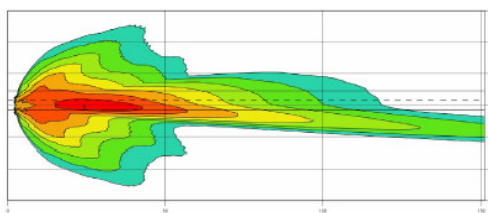


Figura 5.7: Distribuição do fecho luminoso para Adverse Weather Light

High Beam (farol alto): é gerado pela somatória das combinações de todos os elementos de iluminação do *AFS* e produz um padrão de luz homogêneo e poderoso para a iluminação de distâncias maiores. [3][5]

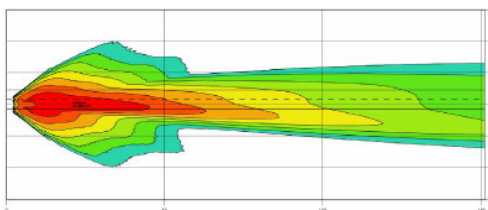


Figura 5.8: Distribuição do fecho luminoso para High Beam

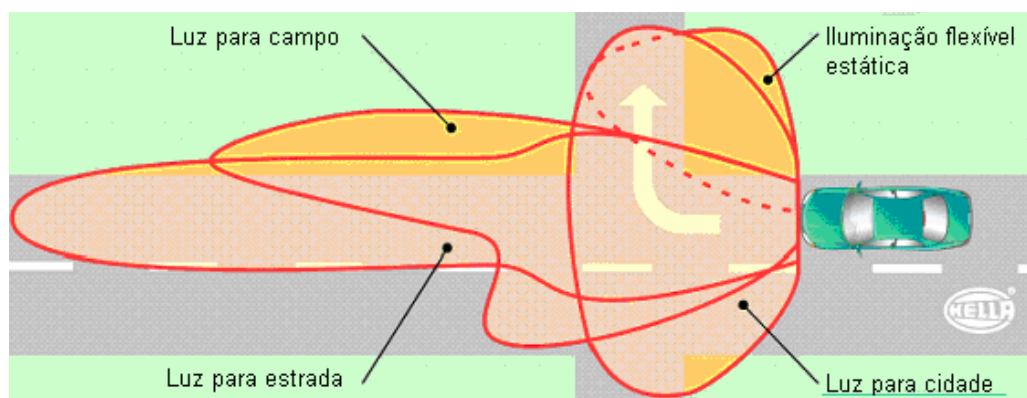


Figura 5.9: Distribuições dos fechos luminosos do *AFS*

Além de ser composto pelas diferentes configurações luminosas citadas, o *AFS* também possui o atributo da **flexibilidade do fecho luminoso**. Essa funcionalidade pode ser dividida em dois modos:

Iluminação flexível dinâmica: neste modo o sistema ótico central é direcionado de acordo com a direção tomada pelo veículo, como função da detecção do raio da curva determinado pelo movimento do volante. Para sistemas óticos atuais, a rotação é realizada por um atuador eletromecânico. O elemento central é um cilindro rotativo, cujo raio varia ao longo de seu eixo e sua circunferência. O contorno do cilindro, que é projetado na rua, acaba por definir a distribuição de luz.

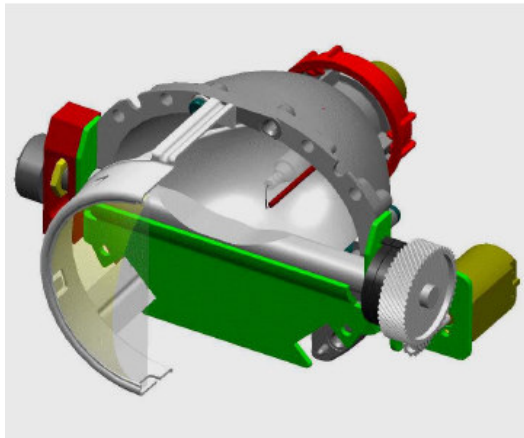


Figura 5.10: Módulo de projeção de farol *HID* de xenônio com sistema rotativo

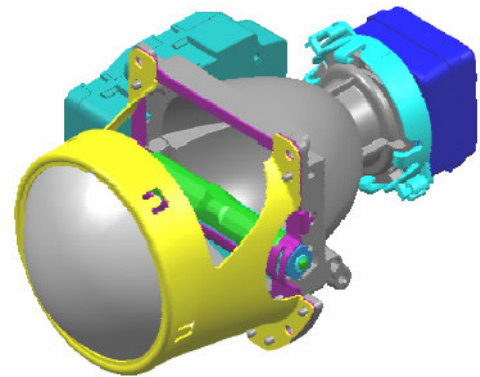


Figura 5.11: Módulo de projeção de farol *HID* de xenônio equipado com *AFS*.

A adoção de LEDs para os faróis dianteiros possibilita a implementação de *AFS* com a iluminação flexível dinâmica sem o uso de elementos mecânicos móveis no farol.



Figura 5.12: Iluminação flexível dinâmica



Figura 5.13: *BMW série 3* equipado com AFS

Iluminação flexível estática: nesta opção, são empregadas lâmpadas adicionais posicionadas em ângulo determinado (normalmente 45°) em direção à curva, e são acionadas em situações urbanas diversas, como curvas de pequenos raios, entradas e saídas de vias ou manobras pequenas. Iluminação adicional é gerada diretamente no plano de iluminação do veículo e nas suas laterais. Além disso, quando acionado em conjunto com o modo de iluminação Adverse Weather Light, a iluminação lateral adicional permite uma otimização na detecção das bordas da estrada em condições climáticas severas. [3][5][6][14]



Figura 5.14: *Renault Modus* equipado com iluminação flexível estática

5.1.2 Sistema de iluminação linkado a câmeras (Camera-linked lighting systems - CLS)

A instalação de câmeras de irradiação infravermelha, assim como câmeras auxiliares para manobras já não são novidade no mercado automotivo. No entanto, tratamos agora do desenvolvimento de novas tecnologias de câmeras CMOS (semicondutor metal-óxido complementar) integradas ao sistema de iluminação do veículo. Este sistema promove uma varredura dos obstáculos à frente do veículo para auxiliar os demais sistemas óticos do veículo na decisão de qual modo de iluminação tomar. Em situações adversas, as informações registradas pela câmera são processadas e podem direcionar e regular o fecho de luz dos faróis, de modo a iluminar de modo mais eficiente a região desejada ou evitar o ofuscamento de veículos em direção contrária, com o ajuste automático do ângulo do fecho. Este sistema se integra perfeitamente aos *AFS*, apresentado anteriormente. Após o processamento das informações obtidas pelo registro das câmeras, o sistema pode direcionar o fecho de luz e acionar uma diferente configuração de iluminação. Portanto, o *CLS* complementar o *AFS*, dando ainda mais autonomia ao próprio sistema de iluminação.[15] Os primeiros sistemas de faróis compostos pelos *CLS* e *AFS* junto aos LEDs deve estar em produção em 2015, a ser produzido pela *Hella*. [24]

5.1.3 Integração de LEDs no desenvolvimento de novas tecnologias

O avanço dos LEDs de alta intensidade no mercado de iluminação automotiva e o desenvolvimento de novas tecnologias que melhoram as capacidades de iluminação são mutuamente benéficos. Ao mesmo tempo em que as novidades tecnológicas diversas proporcionam aos LEDs novas oportunidades de aplicações diferenciadas, o uso de LEDs em faróis facilitam e simplificam o desenvolvimento de muitas dessas inovações.

É possível verificar claramente esse desenvolvimento mútuo com o sistema avançado de iluminação frontal (*AFS*), que têm sua aplicação ampliada, melhorada e simplificada quando se usam LEDs no lugar de lâmpadas de *HID* de xenônio. Por outro lado, a aplicação de LEDs no *AFS* permite que se alcance um desempenho consideravelmente superior em relação a faróis convencionais que utilizam LEDs, mas que não contam com nenhum outro sistema auxiliar de iluminação.

Benefícios para o *AFS* começam por dispensar o uso de atuadores mecânicos na iluminação flexível dinâmica. O movimento do fecho de luz pode ser simulado pela ativação de LEDs complementares que acompanham o movimento do veículo em curvas. Para tanto, seria necessária a presença de LEDs específicos para esta função, que são ativados quando solicitados.[3][6] A eliminação de elementos mecânicos móveis no *AFS* representa ganhos significativos para o sistema em termos de simplicidade, confiabilidade, manutenção, custo, peso e outros atributos. Além de simular o movimento da iluminação flexível dinâmica, a aplicação de LEDs é muito importante para o desenvolvimento das diferentes distribuições de luz que constituem o *AFS*. A flexibilidade proporcionada pela configuração de múltiplas fontes de luz em faróis de LEDs, em comparação à duas fontes de luz (fecho alto e baixo) para lâmpadas de *HID*, permite que as diferentes distribuições de luz (Town Light, Country Light, Motorway Light, Adverse Weather Light e High Beam) possam ter suas configurações alcançadas de modo mais simples, uma vez usados elementos óticos apropriadamente projetados. [3][6]

Os gráficos a seguir mostram um comparativo do desempenho dos faróis com *AFS* equipados com LEDs e lâmpadas de *HID* de xenônio.

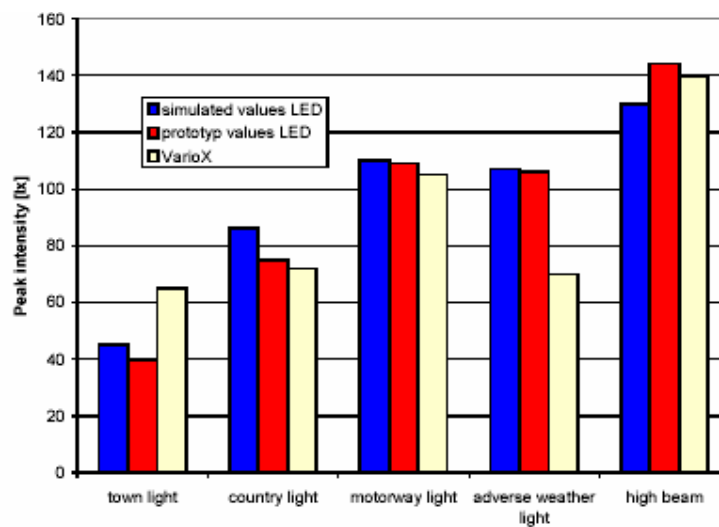


Figura 5.15: Intensidades de pico de faróis com *AFS* equipados com LEDs e com lâmpadas de *HID* de xenônio *VarioX*.

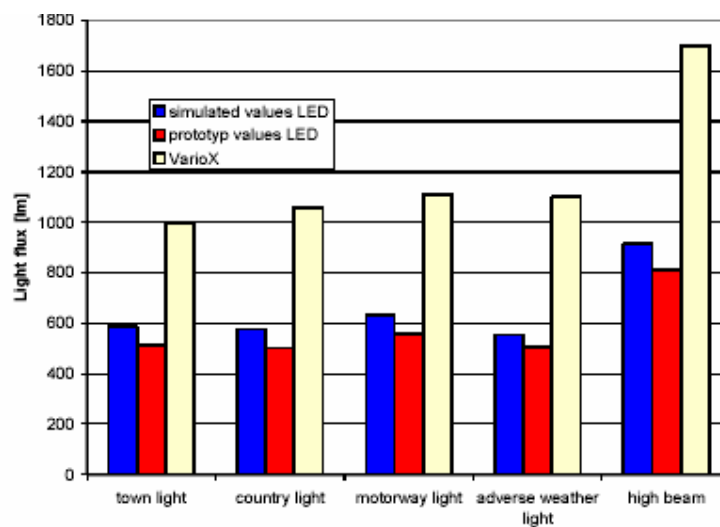


Figura 5.16: Fluxo de luz de faróis com *AFS* equipados com LEDs e com lâmpadas de *HID* de xenônio *VarioX*.

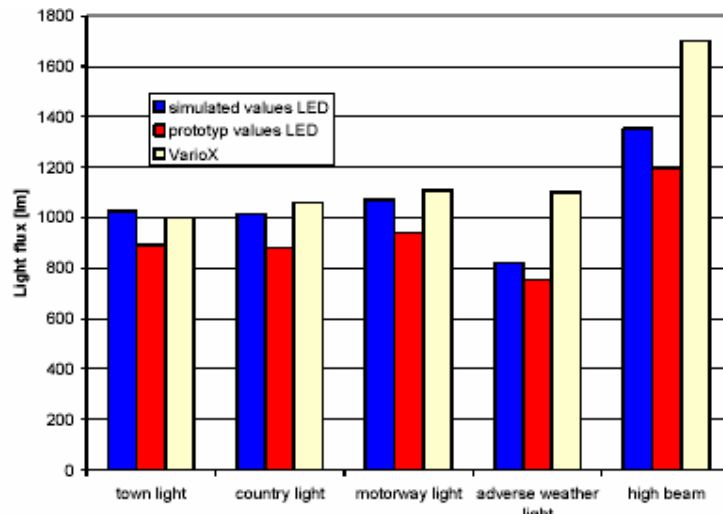


Figura 5.17: Fluxo de luz de faróis com *AFS* equipados com LEDs e com lâmpadas de *HID* de xenônio *VarioX* (dobrado a quantidade de LEDs de iluminação próxima).

Para simular um farol de desempenho semelhante ao do farol com lâmpadas de *HID*, *benchmark* do projeto, foi adotado um farol composto por 11 LEDs de alta intensidade. Os 11 LEDs seriam necessários para, combinados de diferentes maneiras, reproduzirem as diferentes distribuições dos feixes de luz do *AFS*. Foi possível observar que, para as distribuições de luz programadas para o *AFS*, a intensidade de pico foi próximo ou superior aos valores alcançados por lâmpadas de *HID* de xenônio. Já o fluxo de luz, mostrado na figura 5.16, foi inferior ao alcançado pela lâmpada de *HID*. Essa diferença se deveu ao fato dos LEDs responsáveis pela iluminação nas proximidades do veículo não serem suficientes para gerarem o fluxo esperado. A adição de dois LEDs para auxiliarem nesta função resolveu o problema do baixo fluxo de luz, como pôde ser visto na figura 5.17.[3] Assim, verificamos e confirmamos a possibilidade de se alcançar o desempenho oferecido por lâmpadas de *HID*, assim como vemos que a integração de sistemas óticos de LEDs com o *AFS* representa um grande avanço para a iluminação automotiva.

Semelhante integração pode ser observada também para o sistema de iluminação linkado a câmeras (*CLS*). Como dito anteriormente, a adoção do uso de LEDs só facilitará alcançar as diferentes distribuições de luz. Após o processamento das informações das pistas captadas pelas câmeras, o farol pode se configurar de acordo com os comandos recebidos baseados em tais informações. Assim, da mesma

maneira, o desenvolvimento dessas câmeras está fortemente relacionado ao crescimento do mercado de LEDs automotivos. [15]

Este estudo inicial mostra que é possível e vantajoso a integração de LEDs em sistemas de iluminação inovadores que porventura estarão disponíveis no mercado automotivo. Mostra a possibilidade de se alcançar o desempenho de um sistema de *HID* usando LEDs como fonte de luz. Mais do que isso, revela como o potencial dos LEDs pode ser extrapolado com a implementação dessas novas tecnologias. A pesquisa e o desenvolvimento de LEDs cada vez mais eficientes e robustos com certeza ampliará as perspectivas de aplicação à esses sistemas.

5.2 Mercado

A iluminação automotiva é um dos segmentos mais regulamentados da indústria automotiva. As regras na maioria dos países, incluindo o Japão, têm se convergido de maneira estável em direção aos códigos da comissão européia (EC), com os Estados Unidos continuando a manter um conjunto separado de padrões, regulamentado pelo seu órgão *US Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS)*. A sociedade de engenheiros automotivos - *SAE (Society of Automotive Engineers)* também desenvolve padrões para a iluminação automotiva. [14]

A iluminação frontal é primariamente uma questão de segurança, e diversos padrões foram desenvolvidos para assegurar que o desempenho do farol garantirá uma margem segura durante a direção noturna.

O mercado para sistemas inovadores como o *AFS* têm uma projeção futura promissora. Em 2005, uma pesquisa realizada pela *J.D. Power and Associates*, nos Estados Unidos, apontou que 14% dos consumidores estavam “definitivamente interessados” e 64% “provavelmente interessados” em comprar algum veículo equipado com a tecnologia de iluminação flexível em curvas. Fabricantes europeus estimam que cerca de 10%, ou seja, por volta de 2,1 milhões de novos veículos produzidos na Europa em 2007 estarão com este tipo de tecnologia. A figura 5.18 mostra a previsão anual do mercado do *AFS*, em milhões de dólares americanos.[14]

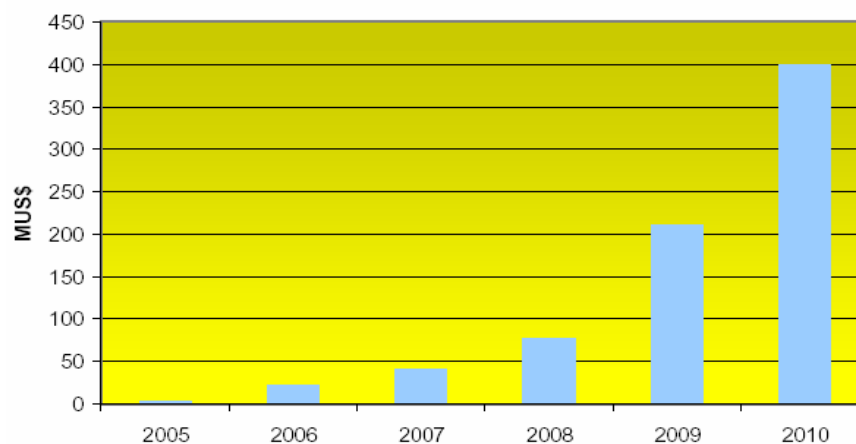


Figura 5.18: Previsão de mercado para o *AFS*, em milhões de dólares americanos

Já o mercado de LEDs automotivos tem mostrado constante crescimento devido ao aumento das aplicações de LEDs em diversas partes do veículo. Só em 2005, houve um crescimento de 10% na aplicação de LEDs na iluminação traseira de veículos, sendo que na Europa, esse crescimento foi de 18%. No ano de 2008, espera-se que essa taxa deva aumentar outros 14%, e para 2010, é previsto que mais de 50% dos carros fabricados globalmente apresentem iluminação traseira realizada por LEDs. Além disso, espera-se que nesse ano, as lanternas traseiras equipadas com LEDs mais avançadas comecem a apresentar a tecnologia da iluminação inteligente, com funções como o brilho variável, sistemas progressivos de luz de freio e ativação automática do pisca-alerta em situações de risco.[18]

O primeiro marco para os LEDs no mercado automotivo foi em Junho de 2007, com a sua introdução no fecho baixo do farol do modelo *LS 600h*, topo de linha da marca *Lexus*, submarca da *Toyota*. No entanto, as outras funções do farol não eram realizadas por LEDs, com pisca normal e fecho alto produzido por lâmpada de HID de xenônio. Como é esperado em tecnologias inovadoras, a aplicação se dá sempre no extremo superior da gama de veículos de uma montadora. A *Lexus* usou faróis fornecidos pela *Koito Lighting*. [16]



Figura 5.19: LEDs do fecho baixo do farol do modelo *Lexus LS 600h*

Porém, outro grande avanço foi dado pela *General Motors*, que lançou em 2008, o seu utilitário esportivo topo-de-linha *Cadillac Escalade* na versão *Platinum*. Junto à essa versão, foi desenvolvido como opcional o conjunto ótico dianteiro composto totalmente por LEDs.



Figura 5.20: Cadillac Escalade Platinum 2008.

Fornecidos pela *Hella*, os faróis do *Escalade* produzem o fecho baixo do farol através do acendimento conjunto de uma fileira vertical de cinco LEDs em cada farol. O fecho alto do farol é alcançado com o acendimento adicional de outros dois LEDs. Luzes de posição e pisca também são de LEDs, o que torna este veículo o primeiro do mundo a portar um farol totalmente ativado por LEDs. O *Escalade*, apesar de ser um veículo topo da linha da *Cadillac*, já representa um avanço em relação ao *Lexus LS 600h* quando se trata da popularização desta tecnologia, por ser um veículo consideravelmente mais acessível. Com uma projeção anual de vendas de cerca de dez mil veículos, o farol do *Cadillac Escalade* é um grande conquista para o desenvolvimento da tecnologia de LEDs em faróis automotivos.



Fig. 5.21: Farol do *Cadillac Escalade Platinum* 2008 com o fecho baixo aceso



Fig. 5.22: Farol do *Cadillac Escalade Platinum* 2008 com fechos baixo e alto acesos

A próxima montadora a lançar um veículo dotado de faróis totalmente iluminados por LEDs é a *Audi* com seu modelo esportivo de baixa produção *R8*. O *R8* atual já faz o uso de LEDs para as luzes de posição no farol dianteiro. [16]



Figura 5.23: Farol dianteiro de LEDs do *Audi R8*



Figura 5.24: Farol dianteiro de LEDs do *Audi R8*



Figura 5.25: Farol dianteiro com LEDs de posição do *Audi R8*

Os exemplos mostram como não há limitações para o tipo de automóvel que os LEDs podem ser aplicados. Pode-se observar também que, como toda nova tecnologia, o uso dos LEDs na iluminação automotiva começa com aplicações em modelos mais exclusivos, de menor produção. É esperado que com o tempo e aplicação em mais veículos, haja uma popularização desta tecnologia para carros de menor preço, com a redução de seu custo pelo maior volume de produção.

O mercado de LEDs de iluminação frontal está no começo de seu desenvolvimento. O que se prevê é que haja primeiramente maiores aplicações semelhantes ao do *Lexus LS 600h*, ou seja, sistemas híbridos onde se combinam lâmpadas de *HID* de xenônio com algumas funções realizadas por LEDs. Posteriormente, esses sistemas deverão eventualmente ser substituídos por faróis dotados somente por LEDs. O gráfico da figura 5.26 mostra uma projeção da faixa de mercado que cada sistema deverá ocupar, para os fabricantes americanos de automóveis. [18]

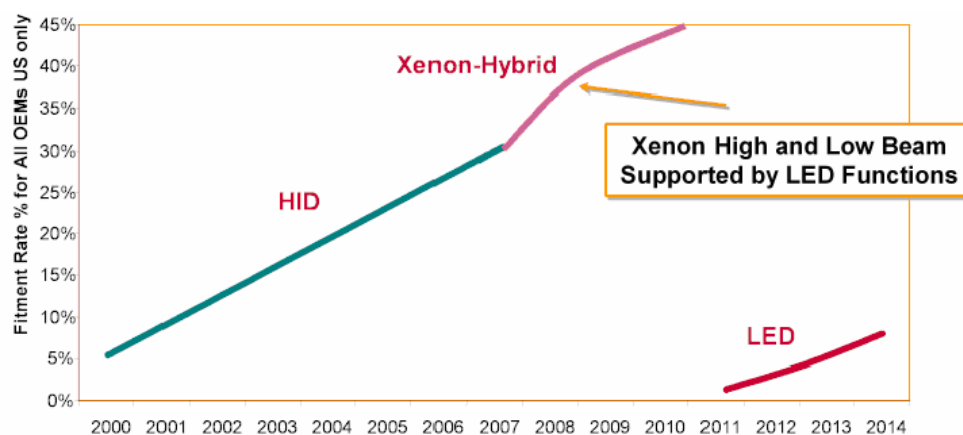


Figura 5.26: Projeção do mercado para cada sistema de iluminação, para o mercado americano de automóveis.

Já a figura 5.27 mostra uma projeção da participação de diferentes aplicações de LEDs no automóvel no mercado, em milhões de dólares americanos. [18]

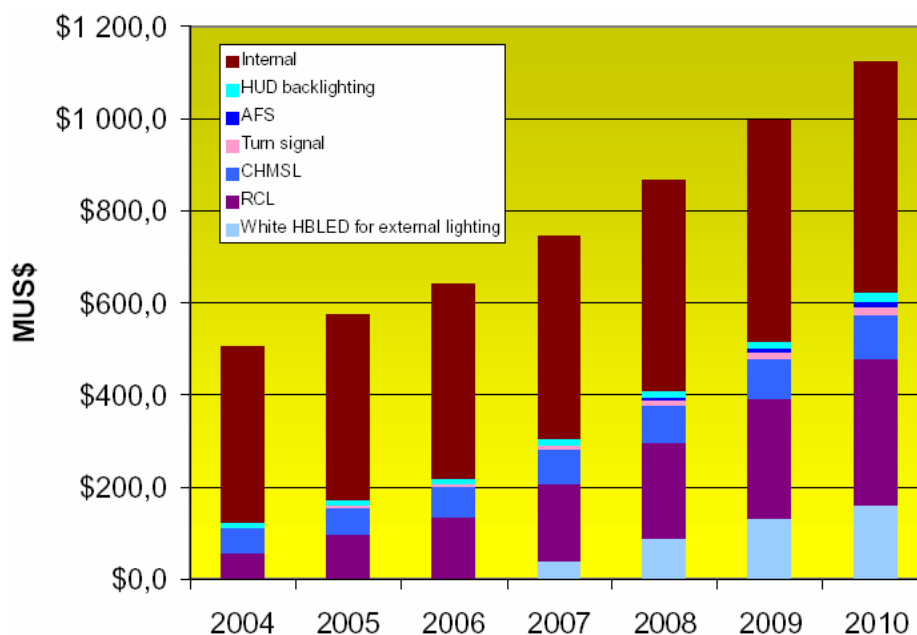


Figura 5.27: Previsão do mercado de diferentes aplicações de LEDs em milhões de dólares americanos.

Pode se observar que há uma previsão muito positiva para o mercado de LEDs já nos próximos anos. Para um futuro um pouco mais distante, a tendência é que a fatia ocupada por LEDs venha a aumentar ainda mais. O preço unitário dos LEDs tende a cair à medida que o mercado expande. É esperado que faróis de *HID* de xenônio alcancem sua máxima penetração até cerca do ano de 2010, quando começarão a ter sua participação do mercado declinar, com o aumento gradual da fatia ocupada por LEDs. As vendas de faróis de LEDs deverão ultrapassar os faróis de *HID* de xenônio em 2013.[25] Além disso, como foi mostrado na figura 5.18, é projetado que haja também um crescimento do *AFS*. [18] Como o desenvolvimento da tecnologia de LEDs de iluminação frontal e sistemas como o *AFS* e o *CLS* estão estritamente relacionados, podemos observar como o crescimento de todas essas inovações tem uma projeção muito positiva para um futuro próximo.

	Color	Function	2007			2008			2009			2010			Market CAGR
			Units	ASP (\$)	Market	Units	ASP (\$)	Market	Units	ASP (\$)	Market	Units	ASP (\$)	Market	
External front	White	Headlamp (low & high beam)	0,5	\$68,0	\$34,0	1	\$64,0	\$64,0	2	\$56,0	\$112,0	3	\$45,0	\$135,0	58%
		Fog	0,5	\$14,0	\$7,0	1	\$13,0	\$13,0	2	\$11,0	\$22,0	3	\$9,0	\$27,0	57%
External rear	Red/amber	RCL (stop, turn, tail, fog)	4,5	\$38,0	\$172,5	6,0	\$36,1	\$218,0	8,0	\$34,3	\$275,4	10,7	\$32,6	\$348,0	33%
		CHMSL	47,916	\$1,5	\$71,9	52,7	\$1,5	\$79,1	58	\$1,5	\$87,0	63,78	\$1,5	\$95,7	10%
External	Red/amber	Turn signal	9,09	\$1,1	\$9,5	11,59	\$1,0	\$11,6	14,19	\$1,0	\$13,5	17	\$0,9	\$15,3	20%
External front	White	AFS	0	\$0,0	\$0,0	0,3	\$21,0	\$6,3	0,5	\$19,0	\$9,5	0,8	\$15,0	\$12,0	38%
Internal	Amber	HUD backlighting	0,08	\$162,9	\$13,0	0,09	\$154,8	\$13,9	0,1	\$147,0	\$14,7	0,15	\$139,7	\$21,0	17%
Internal lighting market					\$440			\$460			\$480			\$500	5%
TOTAL (M\$)					\$748,0			\$865,8			\$1 014,0			\$1 153,9	15%

Tabela 5.1: Projeção dos preços de diferentes aplicações de LEDs

Pode-se observar, pela tabela 5.1, que à medida que a aplicação de LEDs aumenta e, além disso, o mercado expande, o preço unitário dos LEDs decresce. A diminuição do preço dos LEDs viabiliza o aumento da sua aplicação, auxiliando também a sua popularização em veículos mais acessíveis. Pela previsão da tabela 5.1, é possível verificar esse efeito na primeira linha, com a aplicação para os faróis alto e baixo de faróis e faróis de neblina. É interessante observar também que há efeitos semelhantes em todas as aplicações analisadas pela tabela. Para sistemas AFS o decréscimo de preço também é substancial, por ser, assim como os LEDs para faróis dianteiros, uma tecnologia recente ainda não popularizada. Pode-se observar uma redução do preço menos acentuada em outras aplicações (iluminação traseira, terceira luz de freio, piscas e iluminação interna). Isso talvez ocorra por que este efeito já vem acontecendo por alguns anos.

Existe, porém, um efeito colateral desvantajoso para o mercado com a difusão do uso de LEDs automotivos. Faróis usando LEDs vão diminuir significativamente o mercado pós-vendas de fornecedores de faróis e lâmpadas, uma vez que, devido à sua vida útil extremamente estendida, não necessitarão de trocas. O pós-vendas se baseará basicamente em trocas devido a acidentes. [22]

5.3 Parâmetros para a aplicação de LEDs no conjunto ótico luminoso dianteiro de um veículo. [4]

A evolução do desenvolvimento de LEDs permite atualmente a concepção de novos veículos já incluindo a tecnologia dos LEDs no seu projeto. A recente introdução de LEDs de grande capacidade permitiu que se atingissem os níveis de iluminação hoje proporcionados por lâmpadas de *HID* de xenônio.

Até alguns anos atrás, LEDs convencionais ofereciam luminosidade de cerca de 15 a 20 lúmens por Watt (lm/W). Este valor era comparável somente aos fornecidos por lâmpadas de filamento incandescentes, insatisfatórios para o mercado de iluminação automotiva. O advento de HB-LEDs (*High Brightness LEDs*) e UHB-LEDs (*Ultra High Brightness LEDs*), de grande capacidade, permitiu que se atingissem cerca de 30 lm/W sob as condições de operação, de alta temperatura de junção. Além disso, a criação de LEDs multichips com 4 a 5 chips enfileirados, permitiu que o conjunto ótico fosse construído em um espaço compactado, permitindo melhor desempenho no espaço disponível.

A padronização da fabricação de LEDs automotivos no futuro permitirá que o projeto de novos veículos incluindo esta tecnologia seja realizado de maneira muito mais dinâmica, uma vez que desenvolvimento básico não precisará ser refeito. Somente o projeto das partes relevantes será necessário, dando ao mesmo tempo grande liberdade estilística ao farol, que seguirá as tendências de cada fabricante.

Abordaremos a seguir, alguns tópicos para o estudo da aplicação de LEDs em faróis automotivos. Analisaremos como a influência de atributos como **custo, estilo, desempenho, volume do pacote, eficiência, peso e durabilidade** determinarão os objetivos do projeto do farol. Alguns desses parâmetros poderão ser otimizados através de sua simples maximização, enquanto outros podem influenciar os demais atributos.

5.3.1 Custo

O atributo do custo inclui o custo da aquisição da lâmpada do fornecedor, o custo da garantia e reparos, e o custo operacional.

Os parâmetros que influenciam diretamente no custo da aquisição são a quantidade e a variedade dos LEDs necessários, a quantidade de material plástico usado, os dissipadores de calor, fiação e fixadores. Atualmente a temperatura de operação requer métodos forçados de dissipação de calor, que aumentam o custo do conjunto.

O custo da garantia e reparos é afetado diretamente pela durabilidade e robustez do farol e seus subsistemas. Estes custos têm a tendência de serem reduzidos, devido à grande durabilidade deste tipo de farol, apresentando-se assim como uma vantagem ao consumidor.

O custo operacional inclui o próprio consumo de energia do veículo, assim como parâmetros como a introdução de um recurso adicional que consuma energia ou, por exemplo, substituindo o alternador por outro reduzido e de menor custo, caso o consumo total de energia seja inferior ao planejado previamente aos faróis de *HID*.

Atualmente, o custo da introdução de faróis de LEDs em automóveis ainda continua significativamente superior às alternativas equivalentes no mercado. É esperado que com a aplicação cada vez maior desta tecnologia na indústria automotiva, os preços venham a cair na medida em que seu volume de produção aumenta. Apesar de LEDs vermelhos e âmbar (para a iluminação traseira) estarem se aproximando um custo aceitável de cerca de 50 a 60 lúmens por dólar americano, o custo de HB-LEDs brancos ainda é proibitivo para uma aplicação de grande penetração no mercado. Atualmente é esperado que HB-LEDs brancos consigam alcançar o objetivo de se obter uma razão de desempenho/custo de 100 a 150 lúmens por dólar americano em 2010.

Eventualmente conjuntos luminosos automotivos de LEDs deverão para entrar em produção de grande volume. Fornecedores indicam que, apesar de levar alguns anos ainda para que os LEDs se tornem a fonte de luz dominante no mercado, este é um processo inevitável.

5.3.2 Estilo

O atributo do estilo engloba principalmente elementos de aparência e distinção do conjunto ótico quando não aceso, assim como sua aparência quando está acesa e o aspecto geral do conjunto. O estilo é controlado por diversos parâmetros, como as dimensões do farol, o seu contorno, elementos de *design* contínuos e reconhecíveis e sua homogeneidade luminosa.

A introdução dos LEDs nos componentes óticos automotivos se deu inicialmente com o foco na diferenciação do estilo nos carros. A aplicação de LEDs permitirá também uma liberdade de estilo para o conjunto luminoso de um automóvel ainda não vista no mercado automotivo, uma vez que a iluminação é provida não somente de uma ou duas fontes luminosas, como atualmente nos faróis de *HID*. O fecho de luz em faróis com LEDs é gerado por múltiplas fontes luminosas, que podem ser dispostas de diversas maneiras no sistema ótico, ou até posicionadas espaçadamente na região frontal do veículo. Esta liberdade de disposição possibilitará aos projetistas extrapolar a criatividade no estilo dos veículos. Sistemas óticos podem ser modificados de acordo com as opções de estilo.

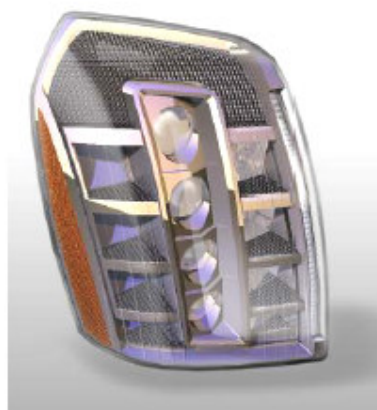


Figura 5.28: Renderização de um farol composto por LEDs.

5.3.3 Desempenho

O desempenho do farol é baseado no fluxo de luz, homogeneidade, intensidade de pico e principalmente a capacidade de detecção de objetos pela visibilidade do motorista.

O fluxo está relacionado à quantidade de fontes de LEDs, a potência dessas fontes e a eficiência do sistema ótico do farol. Mais especificamente, a potência dos LEDs é ditada pela temperatura ambiente, resistência térmica entre a junção do LED e a temperatura externa, a eficiência do próprio LED, e a corrente elétrica. Existe, no entanto, uma sobreposição entre os atributos de desempenho e eficiência.

Considerando ser a temperatura de operação o ponto crítico do sistema de iluminação automotivo por LEDs e, além disso, afetar diretamente no desempenho do conjunto, aprofundaremos o detalhamento deste atributo.

5.3.3.1 Gerenciamento do calor no farol [8]

A tarefa mais árdua no projeto do farol de LEDs é manter sua temperatura de junção abaixo do máximo especificado. Apesar de muitos faróis de *HID* apresentarem uma temperatura final do conjunto superior às temperaturas hoje em dia alcançadas pelos faróis de LEDs, estas normalmente geram grande parte do calor fora da unidade do farol. Os LEDs geram o calor dentro dos próprios semicondutores, que é conduzido através do chip de silicone. Assim, mesmo tendo que dissipar menos calor do que lâmpadas de *HID*, este é concentrado dentro de um pequeno conjunto, que por sua vez, não é muito tolerante a altas temperaturas. [15]

A convenção natural seria a melhor opção em termos do desenvolvimento do projeto por dispensar extratores de calor forçados e assim diminuir drasticamente seu custo, peso, volume e outros fatores. No entanto, o resfriamento pela simples convenção natural de calor é atualmente impraticável. A temperatura de junção deve ser mantida abaixo de 150°C para que o conjunto possa operar de maneira aceitável.

Assumindo que a dissipação de energia dos seis LEDs multichips integrados (para alcançar desempenho similar à de lâmpadas de *HID*) para o feixe baixo seja de 60 W, teremos uma dissipação unitária de 10W por LED. A resistência térmica de

um LED multichip pode ser considerada 5K/W. Ainda, um dissipador de calor para cada LED multichip com uma área de cerca de 100x100 mm² deverá ter uma resistência térmica adicional de cerca de 1,5K/W, para os 60W dissipados pelos LEDs.

$$\begin{array}{l}
 60\text{W} \Rightarrow 6 \text{ LEDs} \Rightarrow 10 \text{ W / LED} \Rightarrow 5 \text{ K / W} \Rightarrow 50 \text{ K} \\
 1 \text{ Dissipador} \Rightarrow 60\text{W} \Rightarrow 1,5 \text{ K / W} \Rightarrow 90 \text{ K}
 \end{array}$$

Temperatura final gerada pelo conjunto = 140 K

Assim, somando a temperatura gerada pelo conjunto atuando, devemos ter uma temperatura de junção de 140K acima da temperatura ambiente. Considerando agora ser cerca de 100°C a temperatura ao redor do conjunto ótico, pelas condições operacionais devido à presença do motor, deveremos então considerar cerca de 240°C como a temperatura de funcionamento dos LEDs para sua aplicação com convecção natural de calor. Mesmo se o veículo considerado tivesse uma configuração com seu motor distante do farol dianteiro (por exemplo, um carro com motor traseiro, ou central-traseiro), a temperatura de funcionamento dos LEDs seria de cerca de 165°C (considerando temperatura do ar de 25°C), ainda consideravelmente acima da temperatura de junção máxima. Logo, a condição de convecção passiva só seria possível se os requisitos de desempenho fossem drasticamente reduzidos.

Dessa maneira, para manter a temperatura em condições aceitáveis de operação, hoje em dia é indispensável a montagem de convecção forçada aos dissipadores de calor dos LEDs. Como alternativas para o resfriamento do conjunto, consideraremos os sistemas de **tubos condutores de calor, dissipador externo de calor e resfriamento ativo por ventilador**. A seguir apresentaremos uma matriz de decisão para selecionar, de modo sistemático, a melhor alternativa para este atributo crucial no projeto do farol de LEDs. Para melhor entender a tabela montada, explicaremos primeiramente seus atributos.

Dissipação de calor: é a capacidade do sistema analisado de retirar calor do conjunto do farol. Este atributo é considerado o de maior importância na matriz. Foi-lhe atribuído maior peso, por basicamente consistir no objetivo da instalação do dissipador de calor no conjunto.

Confiabilidade: engloba a durabilidade e a robustez do sistema analisado. Representa a credibilidade atribuída ao sistema de que esta não irá falhar em sua vida útil, conseqüentemente acarretando na falha do farol. Desse modo, assim como o atributo da dissipação de calor, a confiabilidade tem um peso muito alto na matriz de decisão exposta abaixo.

Custo: representa o custo do sistema para o fabricante, custos de instalação e reposição, assim como custos que o sistema acarreta aos usuários enquanto opera.

Peso: o sistema analisado influencia não somente no excesso do peso que o veículo passará a carregar, mas também nas dificuldades de ajuste e nivelção do farol, na flexibilidade à adaptação de novas tecnologias, na maior complexidade de fixação do conjunto, na maior dificuldade de instalação e reposição do conjunto ótico, entre outras conseqüências.

Flexibilidade: a flexibilidade representa a facilidade em que o sistema de convecção forçada escolhido se adapta às novas situações que a introdução de novas tecnologias e sistemas externos adicionais porventura se integre ao conjunto.

Espaço: este atributo representa basicamente o espaço que é ocupado pelo sistema de convecção forçada analisado.

Simplicidade: a simplicidade do sistema analisado representa as adaptações adicionais que serão necessárias para a integração do sistema no conjunto ótico.

Atributo	Peso	Tubos Condutores de Calor		Dissipador de Calor Externo		Resfriamento por Ventilador	
		nota	n*p	nota	n*p	nota	n*p
Dissipação de calor	0,25	9	2,25	3	0,75	8	2
Confiabilidade	0,22	7	1,54	3	0,66	8	1,76
Custo	0,15	3	0,45	6	0,9	8	1,2
Peso	0,1	7	0,7	3	0,3	7	0,7
Flexibilidade	0,1	2	0,2	10	1	7	0,7
Espaço	0,1	2	0,2	9	0,9	6	0,6
Simplicidade	0,08	1	0,08	8	0,64	8	0,64
Soma	1		5,42		5,15		7,6

Tabela 5.2: Matriz de decisão dos sistemas de convecção forçada para dissipação de calor do conjunto do farol.

A partir dos resultados obtidos na matriz de decisão, sistematicamente verificamos que a melhor opção dentre os apresentados é indubitavelmente o resfriamento ativo por ventilador. A seguir, segue uma análise um pouco mais detalhada de todas as opções apresentadas na matriz de decisão.

- Tubos condutores de calor.

Esta alternativa possui uma grande capacidade de transferência de calor. Os tubos conseguem dissipar facilmente 100W dadas as condições deste tipo de projeto. As principais desvantagens se resumem no espaço ocupado por este sistema, e na dificuldade de fabricação de tubos dissipadores flexíveis. Uma vez que os faróis devem ser ajustáveis e, além disso, deve-se considerar a possibilidade da adequação do sistema às tecnologias *AFS* e das câmeras integradas, descritas em tópicos anteriores, este sistema acaba por se mostrar pouco dinâmico e inflexível. Além disso, o custo do conjunto deverá ser consideravelmente afetado com a integração de tubos condutores. Podemos descartar esta opção de convecção de calor para esta aplicação.

- Dissipador de calor externo

Uma alternativa seria a instalação de um dissipador de calor adicional, inserido no invólucro do farol a conduzir calor para fora deste. Esta solução se mostra mais flexível do que os tubos dissipadores, uma vez que se poderia fixar o dissipador em uma tampa de borracha e fixá-lo na caixa do farol. O que impede a adoção deste sistema é que a elevada temperatura ambiente (cerca de 100°C) para um veículo de motor dianteiro, configuração atualmente predominante no mercado automotivo, torna impossível que o dissipador resfrie o ambiente interno do farol. Em condições forçadas de atuação do motor, é possível até que haja uma convecção de calor de fora para dentro do conjunto. Adicionalmente, apesar da possível flexibilidade, o peso do dissipador de calor causará complicações nos sistemas de ajuste e nivelção do farol.

- Resfriamento ativo por ventilador

A solução encontrada para um resfriamento adequado e que não implica em grandes desvantagens para o sistema é a ventilação forçada no ambiente interno do farol. A adição de um ventilador localizado é suficiente para manter a temperatura de junção em condições normais de operação, permitindo até a redução das dimensões dos dissipadores de calor, o que possibilita a instalação mais próxima de LEDs consecutivos. Seu baixo peso, custo e simplicidade contribuem para uma adaptação adequada sem interferir muito nos atributos do projeto. Desse modo o ventilador passa a ser um elemento crucial para o funcionamento adequado do farol, e sua confiabilidade deve ser garantida para uma vida útil acima da vida útil dimensionada para o conjunto de LEDs. Logo, um desenvolvimento específico e a realização de testes extensivos de acordo com as especificações do veículo devem ser feitas para otimizar o ventilador para esta aplicação específica. Caso ocorra uma falha, proteções adicionais devem ser acionadas para preservar a integridade do sistema.

Para se certificar que a temperatura de junção dos LEDs não exceda o seu limite, deve-se impor um controle de temperatura no sistema. Assim, caso ultrapasse

sua temperatura de junção máxima devido a alguma irregularidade, o conjunto de LEDs têm sua alimentação reduzida. Uma redução de cerca de 20% da energia já proporciona um decréscimo significativo da temperatura de junção. Os efeitos fotométricos, no entanto, são pouco afetados com esta redução, já que a eficiência dos LEDs aumenta simultaneamente com a diminuição da temperatura.

5.3.4 Volume do pacote

O volume do farol inclui sua profundidade, flexibilidade no fator do seu formato e o volume da lâmpada. Uma vez que o empacotamento nos estágios preliminares do farol de LEDs se dá em torno do estilo e da seleção dos componentes óticos, também devem ser considerados fundamentais os métodos de dissipação de calor e o formato dos dissipadores de calor. Além disso, também entram o volume adicional dos conectores e dos chicotes, assim como a possibilidade de englobar também o módulo dentro do farol. Apesar da maior possibilidade de liberdade dada aos projetistas ao instalar o módulo externamente ao conjunto, a solução de empacotá-lo junto ao farol pode ser uma alternativa de redução de custo caso o farol seja feito para ser completamente substituído em caso de falha. O item de maior volume no conjunto é certamente o dissipador de calor, o que pode ser visto pelo gráfico abaixo.

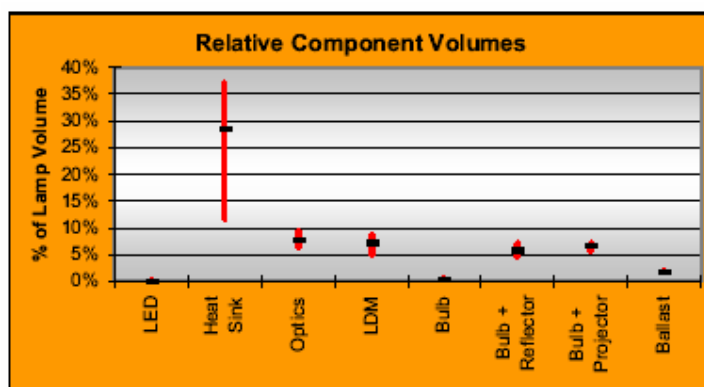


Figura 5.29 : Volumes relativos dos principais componentes do sistema do farol, baseado em diversos desenhos diferentes de faróis de LEDs.

5.3.5 Eficiência

A eficiência do farol engloba tanto o consumo médio de energia necessária para produzir um número fixo de lúmens dentro de um campo de visão, e também a potência de pico consumida pela lâmpada.

A energia consumida pode variar de acordo com as diferentes condições de uso. O fecho baixo pode ser projetado para funcionar de maneiras diferentes, com diferentes fontes de LEDs a serem selecionadas para cada uso. Dessa maneira, para variar o fecho, a eficiência pode ser diminuída. No entanto, com a variabilidade que os LEDs permitem, tanto em termos ligar ou desligar algum LED em particular, quanto na potência consumida/necessária por estes, permitam que uma grande gama de perfis de iluminação existam no futuro. A temperatura influencia diretamente na capacidade de emissão de luz, e a corrente tem influência direta na eficiência do conjunto, como se pode observar pelos gráficos mostrados abaixo.

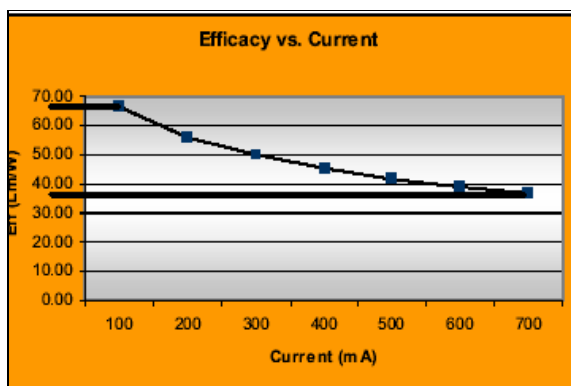


Figura 5.30: Eficiência pela corrente, para LED de chip 1x4 com temp. amb. de 25°C.

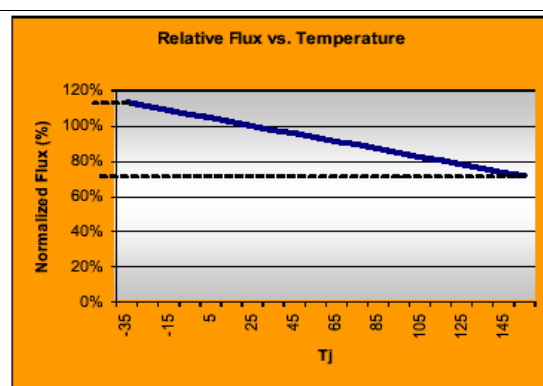


Figura 5.31: Fluxo relativo pela temperatura de um LED de chip 1x4 com $I_f = 700$ mA.

5.3.6 Peso

O atributo do peso em um farol de LEDs com resfriamento forçado é principalmente influenciado pela massa do dissipador de calor. A retirada do dissipador representa um corte de até 30% do peso de todo o conjunto. Além disso, a geometria do dissipador, sua posição e seleção de material são muito importantes em efeito de peso no sistema. Outros elementos também estão envolvidos no peso do conjunto, como a abordagem ótica, as quantidades dos componentes envolvidos e o design.

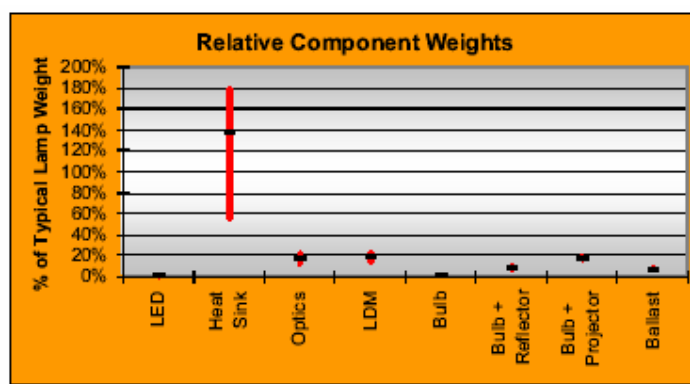


Figura 5.32: Massa relativa dos principais componentes do sistema do farol, baseado em diversos desenhos diferentes de faróis de LEDs.

5.3.7 Durabilidade

A durabilidade do conjunto ótico é principalmente influenciada pela degradação da fonte do LED, uma vez considerando sua temperatura de operação (temperatura da junção) e as condições de alimentação de energia fixadas dentro de limites operacionais aceitáveis. Além disso, a degradação do sistema ótico também é concebível. Pela durabilidade, entende-se o tempo que dura a lâmpada até que esta exiba uma medida de degradação em intensidade. Assim como o atributo da eficiência, a durabilidade do LED é muito influenciada pela corrente elétrica e a temperatura de junção, como indicados na tabela abaixo. É necessário assim, buscar a otimização da vida do conjunto atendendo a durabilidade mínima requerida, ao mesmo tempo em que meramente excedendo a vida máxima de um veículo. As tabelas mostradas a seguir indicam a influência da temperatura e da corrente na duração da vida de um LED.

T_j	Lifetime (@ 750mA, 70% Flux maintenance)
120	<10,000 (10,000@600mA)
150	1000
175	100

Tabela 5.3: Influência da temperatura de junção na durabilidade de um LED branco.

I_f	T_j	Lifetime (@ 70% Flux maintenance)
375	35	50000
600	105	10000
750	150	1000

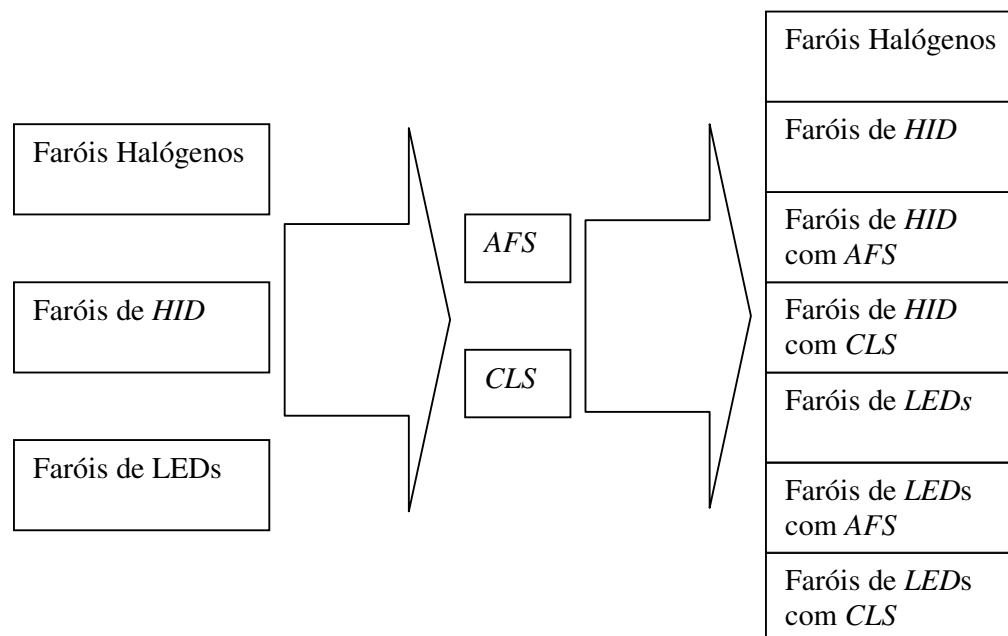
Tabela 5.4: Influência dos efeitos da corrente na durabilidade de um LED branco.

5.4 Determinação da melhor alternativa para o projeto do farol.

Considerando os parâmetros expostos no tópico anterior, podemos estudar a viabilidade dos sistemas analisados. Para determinar a seleção da melhor alternativa para o projeto de farol dianteiro do veículo, será feita uma análise comparativa entre as alternativas propostas. Sistemáticamente determinaremos a melhor opção através de uma matriz de decisão, onde teremos como alternativas as combinações das propostas apresentadas junto às tecnologias e inovações mostradas. As entradas da matriz são os parâmetros vistos anteriormente.

Neste estudo almeja-se encontrar uma solução de um farol avançado de alto desempenho e que apresente inovações tecnológicas. Além disso, é muito desejável que apresente um design diferenciado, que possa projetar ao veículo uma distinção percebida ao público.

Para as alternativas da matriz de decisão, foram consideradas as lâmpadas halógenas, lâmpadas de *HID* de xenônio, combinadas ou não ao sistema avançado de iluminação frontal (*AFS*) e ao sistema de câmeras linkadas (*CLS*), e faróis de LEDs, combinados ou não aos mesmos sistemas. Os faróis equipados com *CLS* são implicitamente os conjuntos mais completos, por ser este um sistema que engloba o *AFS*, regulando seu modo de operação através das informações captadas por suas câmeras. Foram analisadas também as lâmpadas halógenas, o sistema mais aplicado atualmente em iluminação automotiva.



As entradas da matriz de decisão foram analisadas previamente, e são **estilo, desempenho, eficiência, durabilidade, custo, peso e volume do pacote**.

Estilo: pelo fato de almejar um farol avançado, inovador e que promova um impacto estilístico imediato no público, este atributo recebe, junto com o desempenho, o maior peso na matriz de decisão. Trataremos aqui o estilo como um fator de grande importância no automóvel. Apesar de ser um parâmetro muito subjetivo, é possível o projeto alcançar um estilo que agrada uma grande maioria, de maneira uniforme, sem deixar de ser ousado. A aplicação de novas tecnologias e inovações são quase sempre bem-vistas em termos estilísticos. Um desenho diferenciado e agradável é extremamente desejável no projeto do carro, e que pode determinar o sucesso ou fracasso nas vendas do veículo.

Desempenho: atributo de fundamental importância para farol veicular de alta capacidade. Considerando desejar projetar um farol que atenda às expectativas mais exigentes existentes atualmente, e que se enquadre às exigências de futuras gerações de faróis automotivos, foi atribuído a este parâmetro alto peso na matriz de decisão. Foi considerado como *benchmark* o desempenho de iluminação dos faróis de *HID*

existentes hoje em dia no mercado automotivo. O desempenho do farol envolve não somente a quantidade de lúmens gerada pelas fontes luminosas, mas principalmente a capacidade de iluminação do conjunto, e conseqüentemente, a capacidade do motorista de identificar os obstáculos de seu caminho.

Eficiência: tem peso alto na matriz por representar a quantidade de lúmens que o farol consegue gerar com a potência que consome. A eficiência, não só do farol, mas do veículo como um todo, tem tido importância crescente ultimamente no mercado global, principalmente devido ao aumento da conscientização em relação às questões ambientais. Um conjunto que possui bons índices de eficiência é cada vez mais importante para os fabricantes de automóveis.

Durabilidade: assim como a eficiência, possui alto peso na matriz de decisão, por ser um parâmetro de alta importância em um projeto adequado para as exigências das futuras gerações de faróis. A criação de faróis de alto desempenho e capacidade, com sistemas auxiliares complexos, requer que o conjunto possa durar por um considerável período de tempo sem necessidade de reposição. O custo seria demasiadamente elevado com a troca constante de peças, assim como traria prejuízos para a imagem do fabricante. O ideal é o projeto do conjunto do farol com durabilidade dimensionada para a vida útil do carro.

Custo: para o projeto de um farol avançado e inovador, relevamos o atributo do custo a uma importância reduzida. Dando importância maior a parâmetros que possam conferir ao farol propriedades inovadoras, o custo acaba tendo menor peso na matriz de decisão.

Peso: o peso do sistema acaba tendo menor importância se planeja-se construir um farol sofisticado. Além disso, o peso total do conjunto influencia muito pouco no peso total do veículo.

Volume: assim como o parâmetro do peso, para faróis automotivos mais avançados, o volume ocupado pelo farol não é tão importante nesta análise. Se o projeto prioriza atributos que contribuem para um farol inovador e avançado, o volume ocupado por este pacote é naturalmente maior do que faróis mais simples, e isso é levado em conta no planejamento.

Matriz de decisão do projeto de farol

Atributo	Peso	Farol de Lâmpadas Halógenas		Farol de <i>HID</i> de xenônio		Farol de <i>HID</i> de xenônio com <i>AFS</i>		Farol de <i>HID</i> de xenônio com <i>CLS</i>		Farol de LEDs		Farol de LEDs com <i>AFS</i>		Farol de LEDs com <i>CLS</i>	
		nota	n*p	nota	n*p	nota	n*p	nota	n*p	nota	n*p	nota	n*p	nota	n*p
Estilo	0,25	2	0,5	6	1,5	6	1,5	6	1,5	9	2,25	9	2,25	9	2,25
Desempenho	0,25	2	0,5	7	1,75	8	2	9	2,25	6	1,5	8	2	9	2,25
Eficiência	0,15	2	0,3	7	1,05	8	1,2	9	1,35	6	0,9	8	1,2	9	1,35
Durabilidade	0,15	3	0,45	7	1,05	7	1,05	7	1,05	9	1,35	9	1,35	9	1,35
Custo	0,1	9	0,9	6	0,6	5	0,5	4	0,4	3	0,3	2	0,2	1	0,1
Peso	0,05	9	0,45	7	0,35	6	0,3	6	0,3	7	0,35	6	0,3	6	0,3
Volume do Pacote	0,05	8	0,4	6	0,3	5	0,25	5	0,25	4	0,2	3	0,15	3	0,15
Soma	1		3,5		6,6		6,8		7,1		6,85		7,45		7,75

Tabela 5.5 : Matriz de decisão do projeto de farol dianteiro veicular

5.5 Resultados

Segue agora uma análise dos resultados obtidos na matriz de decisão, que auxiliará na definição da melhor alternativa para o projeto. As entradas da matriz de decisão, como já foram explicadas previamente, tiveram seus pesos ponderados de acordo com as prioridades do projeto. Considerando a intenção de projetar um farol automotivo avançado, de alto desempenho e com destaque no estilo, foi atribuída maior ênfase aos parâmetros de estilo e desempenho, sob a penalidade de tirar importância dos parâmetros de peso, volume e custo. Analisaremos agora as alternativas e suas notas, para melhor compreensão dos resultados obtidos.

- Farol de Lâmpadas Halógenas: é ainda atualmente o sistema de iluminação mais utilizado. Possui impacto visual muito pouco expressivo, uma vez comparado aos sistemas mais avançados. Seu desempenho também está muito além do oferecido por sistemas mais modernos. Dessa maneira, foi atribuído nota 2 à esses parâmetros. Por ser composto por lâmpadas de filamento incandescente, naturalmente esse tipo de iluminação se comporta de maneira muito ineficiente, com grande quantidade de energia perdida na produção de calor. A configuração de filamento incandescente também prejudica muito na durabilidade do conjunto, pois a lâmpada não resiste a impactos muito altos. O filamento rompe com grandes impactos e também com o uso prolongado. Assim, foi atribuído nota 2 para eficiência, e 3 para durabilidade. Por outro lado, lâmpadas halógenas são as mais baratas hoje em dia, o que traduz em uma nota muito elevada no quesito do custo. O peso e o volume ocupado por um farol de lâmpadas halógenas são muito baixos, e por isso também lhe foi atribuído notas altas para estes atributos. Na somatória na matriz de decisão, a nota final foi de 3,5. O resultado é explicado principalmente pelas prioridades atribuídas no projeto tratado. Ao ser conferido pesos altos para os parâmetros de design, desempenho, eficiência e durabilidade, quesitos que esta opção registrou notas muito baixas, e atribuídos pesos baixos aos parâmetros que obteve notas maiores, o farol de lâmpadas halógenas obteve a nota mais baixa da matriz de decisão.

Farol de *HID* de Xenônio: apresenta uma estética expressivamente mais moderna que lâmpadas halógenas, inclusive com um fecho de luz com tonalidade azulada, o que para muitos representa um impacto visual muito positivo. No entanto, ainda concentra os focos luminosos principais em no máximo duas fontes de luz (fecho baixo e alto), o que limita muito os arranjos possíveis dentro do farol, fazendo com que o projeto sempre esteja em torno desses dois únicos pontos luminosos. Dessa maneira, foi lhe atribuído nota 6 para o quesito do estilo, o que representa uma avanço significativo em relação às lâmpadas incandescentes normais. No parâmetro do desempenho, a capacidade de geração de lúmens das lâmpadas de *HID* de xenônio é atualmente referência para novas tecnologias, e é ainda o benchmark a ser alcançado. No entanto, recebe aqui a nota 7 para o desempenho, pois para esta opção, ainda não foi considerado sua adaptação às novas tecnologias. Ou seja, seu desempenho está, portanto, limitado à capacidade de faróis de *HID* convencionais. Possui uma eficiência muito boa, assim como a durabilidade, recebendo assim nota 7 para ambos parâmetros. O custo é consideravelmente superior ao das lâmpadas incandescentes, mas aceitável atualmente no mercado automotivo. Faróis de *HID* de xenônio se tornam cada vez mais acessíveis, com a sua propagação aos carros de menor representatividade. O peso do sistema é superior ao de lâmpadas halógenas, mas que não chegam a representar grande influência no veículo. O mesmo vale para o quesito do volume. A presença do reator ajuda aumentar tanto o peso quanto o volume do pacote, que tiveram notas menores que as notas obtidas para estes atributos para as lâmpadas halógenas. A nota final do sistema foi de 6,6. Essa nota foi consideravelmente superior à nota obtida pelo sistema de lâmpadas halógenas. Ao atingir maiores pontuações nos parâmetros em que foram dadas prioridade no projeto, as lâmpadas de xenônio se mostraram superiores à opção das lâmpadas de halogênio.

Farol de *HID* de Xenônio com *AFS*: a inclusão do *AFS* em faróis de xenônio altera as notas de alguns parâmetros. Estilisticamente, os dois sistemas são

praticamente iguais, quando vistos de fora. Dessa maneira, a nota continua a mesma do Farol de *HID* de xenônio. No entanto, o desempenho e a eficiência do sistema dotado de *AFS* aumentam. O *AFS*, como visto em tópicos anteriores, aumenta sensivelmente a capacidade do motorista de identificar obstáculos, e torna o farol mais eficiente ao direcionar o fecho de maneira adequada. A durabilidade do sistema é praticamente a mesma, se baseando na durabilidade da lâmpada. O custo, peso e o volume do farol dotado de *AFS* são um pouco afetados com a adição do sistema, e suas notas foram decrescidas em um ponto para cada um dos parâmetros. Ao serem atribuídas notas ainda maiores para desempenho e eficiência, parâmetros com alto peso na matriz de decisão, e notas menores para custo, peso e volume do pacote, parâmetros com pouco peso na matriz, esta alternativa atingiu a nota final de 6,8, que é ligeiramente superior à alternativa de farol de *HID* de xenônio sem a opção de *AFS*.

Farol de *HID* de Xenônio com *CLS*: analisando agora a adição do sistema *CLS* no conjunto, temos que, em termos de estilo, o conjunto permanece inalterado em relação às alternativas de *HID* de xenônio sem este sistema. O desempenho e eficiência aumentam ainda mais, quando dotadas do *CLS*, obtendo assim nota 9 para ambos os parâmetros. Combinando a tecnologia do *CLS* e *AFS*, junto com a grande capacidade luminosa de lâmpadas de *HID* de xenônio, atualmente este sistema mostra-se como o conjunto que deve ser tomado como parâmetro para o desenvolvimento de novos faróis. A durabilidade permanece, assim como no item anterior, inalterada. A inclusão das câmeras do *CLS* representa um custo adicional, e isso reflete na nota obtida para este parâmetro. Assim, para o custo, foi atribuído nota 4. Considerou-se que o peso do conjunto com *CLS* é praticamente o mesmo do conjunto com *AFS*, uma vez que o peso das câmeras é insignificante perto do conjunto total. O mesmo vale para o parâmetro do volume. No final, este conjunto obteve a maior nota das combinações de faróis de *HID* de xenônio, de 7,1. A nota superior ocorreu ao serem atribuídas notas ainda maiores para desempenho e eficiência, parâmetros com alto peso na matriz de decisão, e

notas menores para custo, peso e volume do pacote, parâmetros com pouco peso na matriz.

Farol de LEDs: ao apresentar um estilo diferenciado e nunca antes visto em faróis automotivos, e por permitir uma grande liberdade estilística devido às múltiplas fontes de luz, o farol de LEDs recebeu nota 9 para este parâmetro. O desempenho desta opção atualmente está quase do mesmo nível de faróis de *HID* de xenônio, recebendo assim nota 6. O desempenho de LEDs de iluminação frontal deve melhorar consideravelmente com o desenvolvimento desta tecnologia, e em futuro próximo já há previsões para que esta facilmente supere o desempenho alcançado por lâmpadas de *HID* de xenônio.[3][8][26] Há, no entanto, um outro efeito a ser analisado no desempenho do farol de LEDs. No estudo do gerenciamento térmico do farol o controle de temperatura na parte interna do conjunto é muito importante, para que o ambiente não exceda a temperatura limite de operação para os LEDs. O farol de LEDs concentra a geração de calor na parte interna do conjunto, sem haver a projeção de calor à frente da lente do farol, como acontece com faróis de lâmpadas halógenas, ou de *HID* de xenônio. Interessantemente, porém, isto acaba causando um efeito contrário neste local. A ausência de geração de calor à frente do farol acaba sendo indesejável para locais que há a precipitação de neve e gelo. Nestas situações, lâmpadas que produzem calor à frente do farol derretem a neve e o gelo, impedindo o seu acúmulo.[22] Analisando agora o parâmetro da eficiência do conjunto, este é também está muito relacionado ao controle da temperatura do sistema, e é ligeiramente inferior aos sistemas de *HID* atuais, recebendo nota 6. A durabilidade dos faróis de LEDs é uma das grandes vantagens desse sistema. LEDs podem ter vida útil maior que a vida útil do veículo, uma vez mantida sua temperatura operacional compatível. O custo desse sistema atualmente é extremamente alto, por se tratar de uma tecnologia nova, e ainda em desenvolvimento pelas empresas. Portanto, recebeu nota 3 para este parâmetro. O peso do sistema total não é tão expressivo, se revelando semelhante a sistemas de *HID* de xenônio, sendo-lhe atribuído nota 7. O

volume ocupado pelo farol de LED é consideravelmente superior à de outros sistemas. Grande parte deste volume se deve aos sistemas de extração de calor. O dissipador de calor e o ventilador forçado são os itens mais volumosos do conjunto. Por se apresentar mais volumoso que os outros sistemas até então, foi-lhe atribuído nota 4. No total, o farol de LED recebeu nota 6,85. Obteve um resultado, portanto, inferior ao sistema de *HID* de xenônio com *CLS*, mas ligeiramente superior ao mesmo sistema com *AFS*. É interessante notar como a adoção da tecnologia de LEDs faz com que o sistema seja superior às existentes dotadas de tecnologias adicionais. Os parâmetros de estilo e durabilidade foram os que mais contribuíram para tanto.

Farol de LEDs com *AFS*: o estilo do farol de LEDs dotado do *AFS* pouco muda em relação ao farol de LEDs sem este sistema. Dessa maneira, para este parâmetro, a nota foi mantida. Ao adotar o *AFS* o desempenho do conjunto é elevado de maneira perceptível, pois o sistema permite que a percepção do motorista usando a aplicação da tecnologia de LEDs possa ser sensivelmente extrapolada, em relação aos faróis sem este sistema. Dessa maneira foi atribuído nota 8 ao desempenho. Ligada a este parâmetro, está a eficiência, que também foi elevada com a adoção do *AFS*. As notas para o desempenho e eficiência foram semelhantes aos conferidos para a alternativa de farol de lâmpadas de *HID* de xenônio. A nivelção destas capacidades ocorre por que a inclusão desse sistema promove não somente uma melhoria significativa nesses quesitos para o farol de LEDs. O próprio sistema avançado de iluminação frontal (*AFS*) fica mais simples e eficiente com a adoção de LEDs, o que faz com que o conjunto obtenha uma melhoria mutuamente benéfica. O parâmetro da durabilidade fica inalterado em relação ao farol de LEDs convencional, e mantém a nota. Já a adoção do *AFS* representa um custo adicional ao conjunto, que passa a receber nota 2. O peso e o volume também receberam notas inferiores. O total para esta alternativa foi nota 7,45. O aumento das notas para o desempenho e eficiência, ambas de grande importância na matriz, foram decisivos para a alta nota alcançada. Por outro

lado, as notas menores para o custo, peso e volume de pacote influenciaram de maneira pouco expressiva na nota final. Pode-se observar que esta opção já ultrapassa todas as notas até então alcançadas, inclusive o do conjunto de lâmpadas de *HID* de xenônio com *CLS*.

Farol de LEDs com *CLS*: para as prioridades adotadas no projeto, esta alternativa se mostrou imbatível, representando todos os extremos das notas dos parâmetros. Foi atribuído nota 9 para estilo, desempenho, eficiência e durabilidade, os parâmetros mais importantes na matriz de decisão. Por outro lado, o custo teve nota 1, por representar um sistema extremamente custoso. No entanto, como o custo tem um peso inferior, esta nota baixa acabou influenciando pouco na vitória desta alternativa. O peso e o volume são praticamente os mesmos para esta alternativa e para o farol de LEDs com *AFS*, e receberam as mesmas notas. Assim como receberam as mesmas notas os parâmetros de estilo e durabilidade, pois estas permanecem inalteradas. O desempenho e eficiência, no entanto, foram ainda mais ampliadas, e suas notas aumentadas em relação à alternativa anterior. A pontuação total desta opção de farol foi de 7,75, e é a maior na matriz de decisão. Para o projeto de um farol avançado de alto desempenho e que apresente um desenho agradável e diferenciado, esta é a alternativa que deve ser escolhida.

5.6 Aplicação de faróis de LEDs no veículo Chevrolet Vectra Elite.

O estudo da aplicação de faróis com tecnologia dos LEDs no veículo escolhido se dará baseado nos conceitos desenvolvidos anteriormente, com a atribuição de pesos aos atributos prioritários no projeto.

A otimização simultânea de todos os atributos do sistema ótico não é possível. Em muitos casos surgirão conflitos com a otimização de algumas características específicas, cujos resultados terão suas implicações discutidas neste estudo. Será incluída também a análise das vantagens e desvantagens do farol de LEDs em comparação às alternativas existentes no mercado.

Para a determinação das especificações técnicas do farol a ser projetado, primeiro serão analisadas as técnicas construtivas predominantes no mercado atualmente, os modelos já existentes em carros no mercado, o mercado no qual o veículo está inserido e as alternativas de LEDs candidatos à esta aplicação.

O avanço do desenvolvimento da tecnologia do LED automotivo de alta capacidade torna evidente o seu advento no mercado de iluminação automotiva. A aplicação em carros de alta representatividade já é prova de sua viabilidade, e o ritmo acelerado do desenvolvimento de diversos setores em torno desta tecnologia levanta previsões de sua rápida popularização. Este trabalho estuda a adaptação de um veículo nacional para uma nova tecnologia, o que acarreta em limitações físicas e de projeto. Em um futuro próximo, o novo projeto de um veículo incluindo os LEDs desde seu início permitirá melhor planejamento no seu desenvolvimento, e acima de tudo, proporcionará aos projetistas uma grande liberdade estilística. É importante relembrar a importância do estudo da tecnologia dos LEDs para carros nacionais. Por ser uma tendência mundial, a introdução de LEDs nos faróis automotivos eventualmente chegará no mercado brasileiro. Quanto mais se anteciparem os fabricantes nacionais à tal novidade, melhor preparados estarão para esta eventual renovação tecnológica, e conseqüentemente melhor posicionada no mercado estará cada montadora em relação a seus concorrentes.

5.6.1 Técnicas de direcionamento de fecho

Na iluminação automotiva, a tecnologia ótica atualmente utilizada para direcionar propriamente o fecho de luz envolve o uso de projetores, lentes e refletores, ou a combinação destes. Faróis mais antigos normalmente aplicam a combinação de lentes refrativas com refletores parabólicos, enquanto projetos mais modernos aplicam refletores de múltiplos espelhos ou projetores.

Os faróis de LEDs existentes atualmente empregam refletores de múltiplos espelhos, projetores e a combinação destas duas técnicas. Não existe um consenso sobre qual técnica é superior. Cada fabricante utiliza o que considera melhor para seu projeto. Por estar em estágio inicial de desenvolvimento, às vezes limitações físicas e de projeto acabam por forçar a adoção de determinadas técnicas para a aplicação de LEDs nos faróis dos veículos.



Figura 5.33: *Porsche 911* com iluminação por LEDs

5.6.1.1 Lentes óticas

A tecnologia do direcionamento do fecho de luz por lentes consiste no posicionamento da fonte de luz no foco do refletor, normalmente parabólico simples. O emprego de Lentes de Fresnel¹ possibilita a produção de um fecho de luz colinear e paralelo. A variação da curvatura da lente de Fresnel fornece dispersão luminosa para cobrir as áreas necessárias da estrada à frente do veículo. Estas lentes podem usar tanto refração e total reflexão interna para alcançar o resultado desejado. [14]

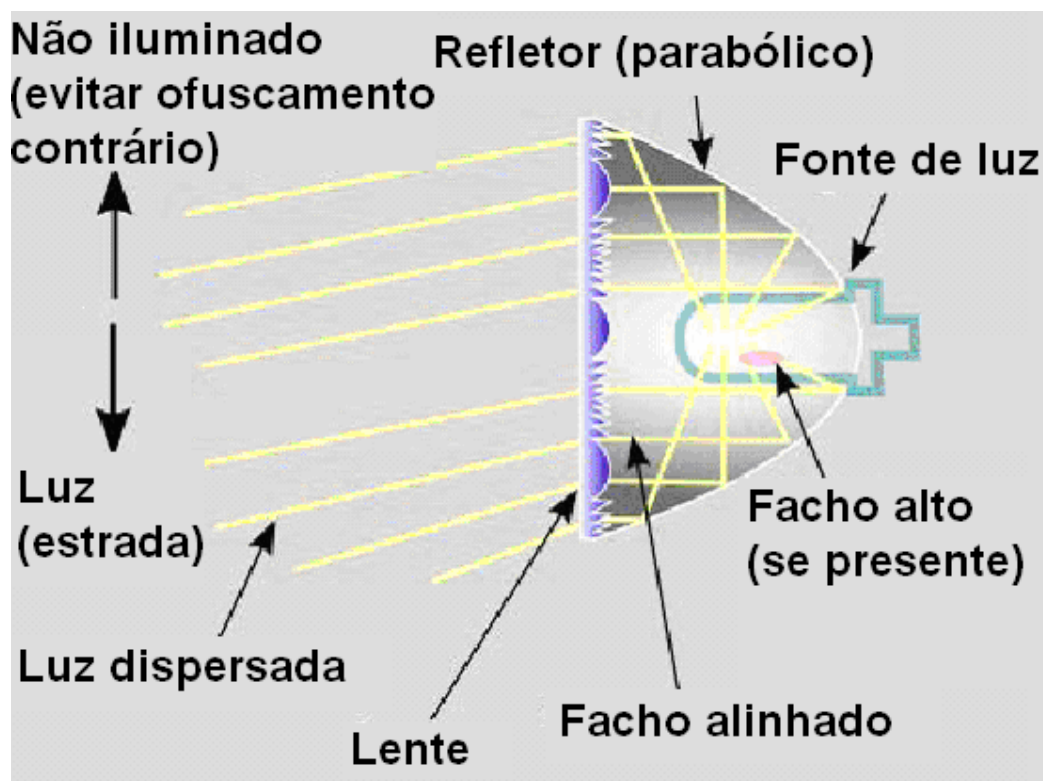


Figura 5.34: Representação de farol com lentes óticas.

¹ A *Lente de Fresnel* foi inventada pelo físico francês Augustin-Jean Fresnel. Estas lentes reduzem a quantidade de material necessário na fabricação, quando comparado a lentes esféricas convencionais. Para tanto, são constituídas por camadas de seções anulares concêntricas, conhecidas como *Zonas de Fresnel*. Para cada uma dessas zonas, a espessura das lentes é decrescida através do corte efetivo da superfície contínua da lente, tornando um conjunto de superfícies descontínuas de mesma curvatura. Dessa maneira, reduz-se não somente a quantidade de material utilizado, mas também a qualidade da imagem.

5.6.1.2 Refletor ótico

O surgimento da tecnologia do farol sem o uso de lentes de Fresnel possibilitou grandes avanços no *design* automotivo. A transparência das lentes lisas contribuiu para tanto, assim como a aplicação de materiais plásticos transparentes nas lentes, em substituição do vidro utilizado nas lentes de Fresnel, ao permitir maior liberdade estilística para o conjunto ótico. O farol com refletor ótico possui uma superfície complexa constituída de segmentos individuais com formatos e contornos específicos de modo que o efeito acumulado produz o padrão de distribuição de luz requerido. Os refletores óticos são normalmente feitos de plástico moldado, apesar da existência também de refletores de vidros e metais refletivos. A superfície refletiva é feita de alumínio depositado por vapor e camada antioxidante. [14]

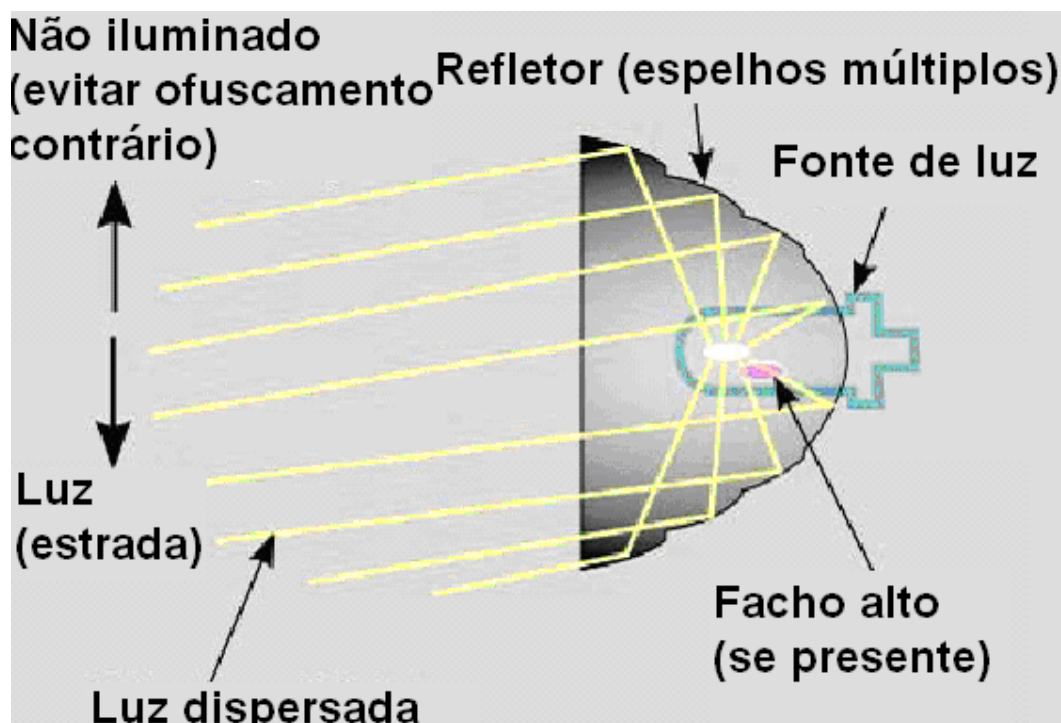


Figura 5.35: Representação de farol com refletor ótico.

5.6.1.3 Projetor ótico

Em um sistema ótico de projeção, a fonte de luz é localizada em um foco de um refletor elíptico, e a luz produzida passa através de uma lente localizada na parte frontal da lâmpada, responsável pela condensação dos fechos de luz. Um escudo fica localizado entre o refletor e a lente, e a projeção do limite superior do escudo fornece o corte do farol baixo. O escudo pode ser acionado por um solenóide para alternar entre farol alto e baixo. Pode ser também estacionário, para projetos que separam o farol alto e farol baixo em lâmpadas diferentes. A lente condensadora pode ter tratamento superficial, como o de Fresnel, para reduzir a espessura de sua lente. [14]

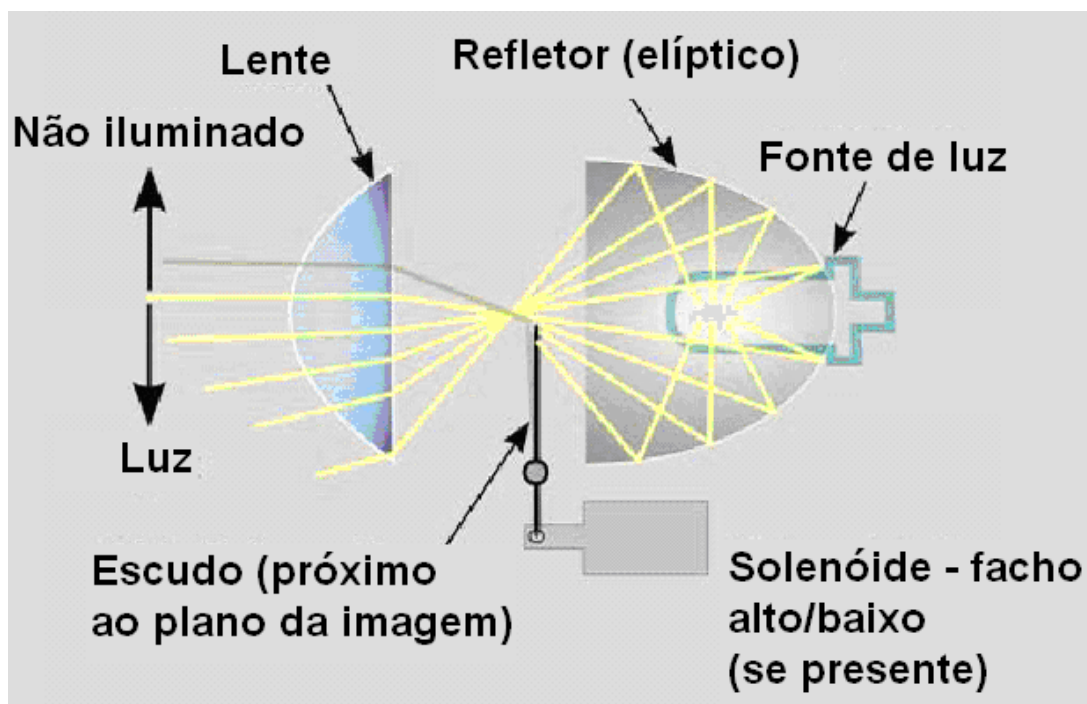


Figura 5.36: Representação de farol com projetor ótico.

5.6.1.4 Fibra Ótica

Sistemas de iluminação distribuídas exteriores empregam o uso de fibra ótica para distribuir luz em pontos variados e/ou diversos através de uma única fonte de luz. O emprego desta tecnologia se aplica majoritariamente para funções de sinal, ou luzes de posição. [3][14]

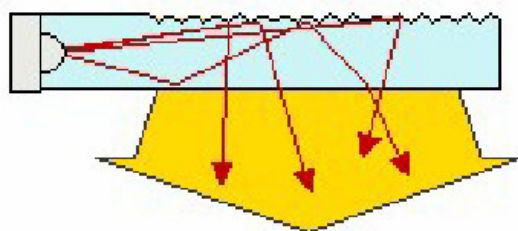


Figura 5.37: Reflexão em fibra ótica



Figura 5.38: Fibra ótica em farol

5.6.2 Análise de modelos existentes

Para melhor escolher a configuração construtiva do modelo estudado, primeiramente analisaremos com maior profundidade os faróis com aplicação de LEDs mais expressivos existentes atualmente.

O uso de LEDs para luzes de posição e no conjunto ótico traseiro existe já há alguns anos. O primeiro veículo a incorporar a tecnologia de LEDs de alta capacidade para iluminação efetiva, mais especificamente para o fecho baixo, foi o *Lexus LS600h*. Neste caso, o farol é fornecido pela *Koito Manufacturing Co Ltd of Japan*, e emprega no total cinco conjuntos de LEDs de alta capacidade. O modelo emprega tanto projetores quanto refletores. Três dos conjuntos usam a tecnologia de projetores, montados juntos na parte superior externa do farol. Outros dois conjuntos de LEDs usam refletores, e estão localizados abaixo dos três LEDs projetados, na parte externa inferior do farol. Para alcançar a iluminação necessária, a solução foi montar em cada conjunto, quatro chips de LEDs azuis, contando com 2,5W cada, resultando um total de 10W a 700 mA de corrente. Cada conjunto possui a capacidade de gerar 400 lúmens, somando assim 2000 lúmens no total para o fecho baixo. No entanto, o *LS600h* emprega LEDs para o fecho baixo do farol, somente. Para o fecho alto, ainda recorre à lâmpadas de xenônio de HID. [19][20]

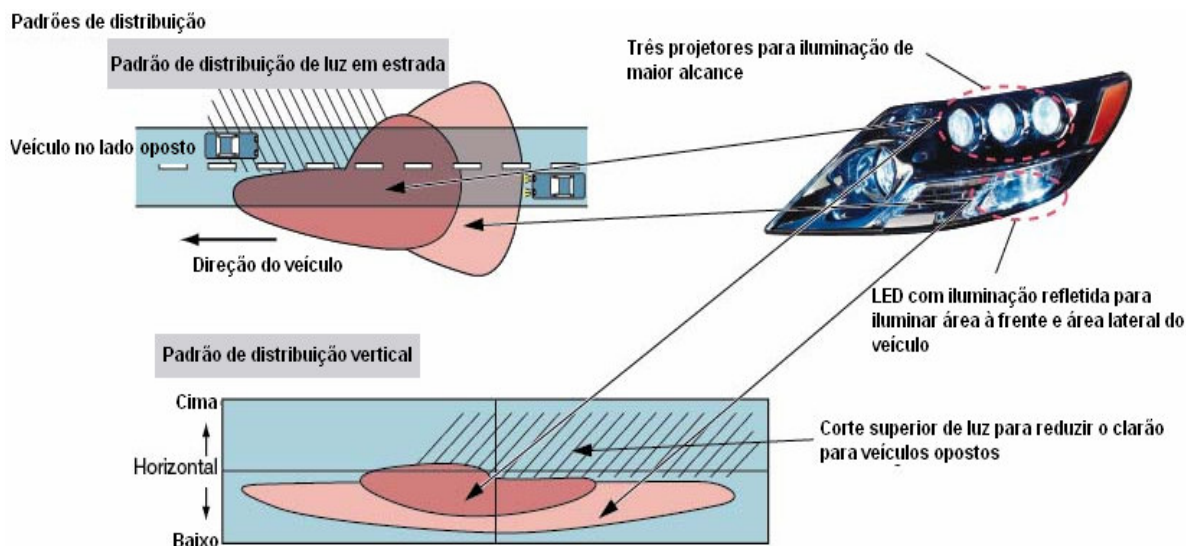


Figura 5.39: Ilustração do funcionamento do farol do *LS600h* [19]

A montadora *Audi* aplicou para o seu modelo esportivo *R8*, faróis de LEDs com técnicas construtivas diferentes em relação ao conjunto do *LS600h*. Ao contrário do carro da *Lexus* que utiliza lâmpadas de xenônio de *HID* para o fecho alto, o *R8* possui todas as funções de seu farol desempenhados por LEDs. Desse modo, tanto as luzes de posição, luzes direcionais, faróis alto e baixo são acionados por diferentes LEDs, totalizando 54 em cada conjunto.



Figura 5.40: Luz de posição e indicador de direção do *R8* [13]

Para as luzes de posição, foram usadas 24 *Advanced Power TopLEDs* da *Osram*. Alinhados proximamente, formam uma iluminação contínua no contorno inferior do conjunto. As luzes direcionais foram compostas por oito LEDs de alta

capacidade *Luxeon K2*, produzido pela *Philips LumiLEDs*, alinhados continuamente na parte interna e superior do contorno do farol. Os LEDs direcionais são operados por uma corrente de 350 mA e tensão de 3,2V.

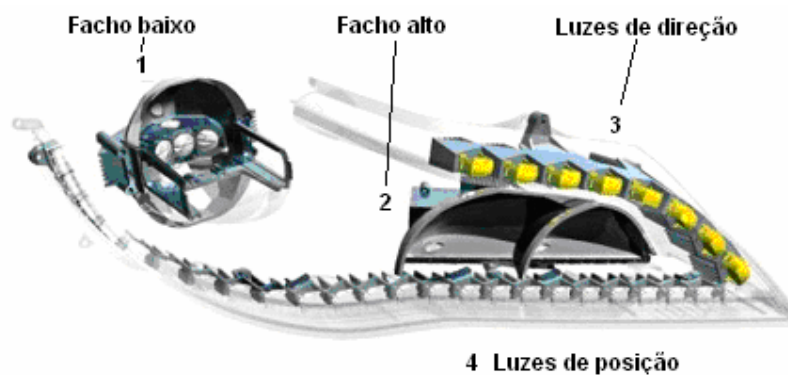


Figura 5.41: Farol do *Audi R8*

Já a distribuição para o feixe baixo é fornecido por um complexo sistema de refletores e lentes. Primeiramente, a distribuição básica de luz do feixe baixo é feito por dois refletores em forma de meias-conchas, posicionados invertidos um sobre o outro, localizados na parte externa do conjunto. Cada refletor ótico contém uma fileira de quatro LEDs. Para prover iluminação complementar no feixe baixo, um sistema de lentes fica posicionado à frente dos dois refletores sobrepostos, com três pares de LEDs. É possível identificar este sistema no item 1 da figura 5.41.



Figura 5.42: Farol do *Audi R8* [10]

O fecho alto, por sua vez, é gerado por dois refletores de forma livre, posicionados na parte interna no farol. Visualiza-se este sistema no item 2 da figura 5.41. São utilizados uma fileira de quatro LEDs para cada um dos refletores óticos. Os LEDs dos fechos alto e baixos são fornecidos pela *Philips Lumileds*, com corrente de 1A.



Figura 5.43: Farol do *Audi R8* totalmente aceso [20]

Analisando agora o conjunto ótico do *Cadillac Escalade Platinum*, fabricado nos Estados Unidos da América pela montadora *General Motors*, podemos verificar outra diferente disposição dos LEDs. O farol, fornecido pela *Hella*, utiliza LEDs fornecidos pela *Osram Opto Semiconductors*, possui um LED branco vertical que atua como luz de posição. As luzes indicadoras de direção ficam localizados no pára-choque, e não estão integrados no conjunto principal. O fecho baixo é gerado por cinco unidades do modelo *Ostar Headlight*, com projetores óticos, empilhados verticalmente no meio do farol. Cada lente desses projetores possui características óticas diferentes, e portanto produz uma parte específica do padrão de distribuição de luz. Quando operados em menor potência, estes também servem como luzes de posição durante o dia. Dois projetores adicionais iguais entre si, também do modelo *Ostar Headlight* ficam localizados internamente e complementam o conjunto, sendo responsáveis pelo fecho alto. O conjunto ótico em questão é montado para gerar cerca de 730 lúmens para o fecho baixo, e 1000 lúmens no fecho alto. Pode-se observar que neste caso há uma geração de cerca de 146 lúmens por cada LED no fecho baixo, e 500 lúmens por LED no fecho alto, mesmo utilizando os mesmos modelos, *Ostar Headlight* da *Osram*. Tal diferença é explicada pelo fato do *Ostar Headlight* ser um produto flexível que permite a escolha da quantidade de chips (unidades de LEDs) em cada pacote. Cada unidade pode conter entre um e cinco chips, e seu desempenho varia de acordo com esta escolha, o que permitiu que o projeto do farol do *Escalade* pudesse ser dimensionado com este recurso. Maiores detalhes técnicos destes LEDs serão discutidos mais à frente.[20][21]



Luzes de posição de dia (DRL)

Facho baixo com luzes de posição

Facho alto

Figura 5.44: Farol do *Escalade Platinum* [20]

5.6.3 Matriz de decisão

Este trabalho foca encontrar uma solução de um farol avançado de alto desempenho e que apresente inovações tecnológicas. Além disso, é muito desejável que apresente um design diferenciado, que possa projetar ao veículo uma distinção percebida ao público. Mas, apesar do veículo estudado ser o carro de maior representatividade de uma grande montadora nacional, é necessário levar em conta, sobretudo, a situação do mercado em que o carro está inserido. Desta maneira, para o caso do veículo especificado, os pesos dos parâmetros a serem analisados serão diferentes dos parâmetros previamente estabelecidos. Assim, foi realizada uma nova análise sobre os pesos aplicados à matriz de decisão. Foi possível então, verificar a sensibilidade da matriz de decisão com as mudanças aplicadas.

Os pesos da matriz de decisão foram repensadas levando em consideração o mercado nacional, que o veículo se situa. Por ser ainda uma tecnologia de alto custo², a sua disponibilização deve ser cautelosamente analisada. O mercado brasileiro possui tendência de ser mais sensível às mudanças de preço quando comparados a outros mercados, principalmente o europeu, americano ou japonês. O consumidor nacional, ao prezar muito pelo custo do produto avaliado, muitas vezes acaba por desestimular a introdução de avanços tecnológicos de diversas áreas. É possível verificar tal fato pela ausência de equipamentos agregados ao veículo que há muito foram introduzidos em veículos similares em outros mercados, como freios com sistemas anti-travamento *ABS*, bolsas infláveis de impacto, sistemas de navegação eletrônicos, controladores de velocidade de cruzeiro, entre outros. Tais equipamentos são presentes, e muitas vezes obrigatórios, em muitos mercados onde veículos semelhantes são vendidos, principalmente na Europa. Sua ausência no Brasil é perceptível principalmente em veículos de menor custo, mais especificamente carros compactos e médios³. A faixa do mercado do *Chevrolet Vectra Elite* é também por assim influenciado, mas em menor escala, por se situar, em âmbito nacional, numa faixa de veículos de maior prestígio.

² O conjunto de farol de LEDs têm o custo estimado de US\$3.044,00 o par, para o *Cadillac Escalade*, montado pela *General Motors*. O custo dos faróis de LEDs ainda são da ordem do dobro do preço de faróis de *HID* de xenônio. [8] [17][20]

³ Faixa de mercado estipulada de acordo com informações da revista Quatro Rodas.

Matriz de decisão do projeto de farol do *Vectra Elite*

Atributo	Peso	Farol de Lâmpadas Halógenas		Farol de <i>HID</i> de xenônio		Farol de <i>HID</i> de xenônio com <i>AFS</i>		Farol de <i>HID</i> de xenônio com <i>CLS</i>		Farol de LEDs		Farol de LEDs com <i>AFS</i>		Farol de LEDs com <i>CLS</i>	
		nota	n*p	nota	n*p	nota	n*p	nota	n*p	nota	n*p	nota	n*p	nota	n*p
Estilo	0.25	2	0.5	6	1.5	6	1.5	6	1.5	9	2.25	9	2.25	9	2.25
Desempenho	0.1	2	0.2	7	0.7	8	0.8	9	0.9	6	0.6	8	0.8	9	0.9
Eficiência	0.1	2	0.2	7	0.7	8	0.8	9	0.9	6	0.6	8	0.8	9	0.9
Durabilidade	0.2	3	0.6	7	1.4	7	1.4	7	1.4	9	1.8	9	1.8	9	1.8
Custo	0.25	9	2.25	6	1.5	5	1.25	4	1	3	0.75	2	0.5	1	0.25
Peso	0.05	9	0.45	7	0.35	6	0.3	6	0.3	7	0.35	6	0.3	6	0.3
Volume do Pacote	0.05	8	0.4	6	0.3	5	0.25	5	0.25	4	0.2	3	0.15	3	0.15
Soma	1		4.6		6.45		6.3		6.25		6.55		6.6		6.55

Tabela 5.6 : Matriz de decisão do projeto de farol dianteiro veicular

Dessa maneira, a matriz de decisão foi modificada de maneira que pudesse refletir melhor as necessidades do produto. As alterações foram feitas nos pesos dos atributos pré-determinados, sendo que as opções e as notas referentes aos atributos para cada uma delas se manteve.

Assim, ainda levando em consideração a necessidade do desenvolvimento de um farol veicular diferenciado com distinção percebida ao público, o atributo do estilo teve, junto com o custo, o maior peso na matriz de decisão. Pesquisas realizadas indicam que o atributo mais valorizado pelo público brasileiro é o estilo do veículo, na hora de fechar negócio[9]. Segundo uma pesquisa realizada pela *Citroën do Brasil* [27], o consumidor brasileiro tem como a maior prioridade do carro o seu *design*. Além disso segundo o *Grupo Ibope*, proprietários de carros das marcas *Ford* e *Volkswagen* dão maior prioridade a critérios econômicos na decisão de compra, enquanto os proprietários de veículos da *Chevrolet* valorizam mais o estilo, *design*, conforto e segurança [28]. O maior peso do atributo do custo é justificável pela notável resistência à introdução de tecnologias no mercado brasileiro, em detrimento ao preço cobrado.

O quesito da durabilidade vem em seguida com peso de 20% na lista dos atributos da matriz. Também relacionada às prioridades de custo baixo do consumidor, a durabilidade também recebeu significativa importância, por estar diretamente relacionada com custos de manutenção. [28]

O desempenho e a eficiência vêm em seguida na ordem de importância dos atributos da matriz. Lhe são atribuídos pesos medianos pelo fato do seu mercado não ser tão avançado e exigente, se comparado aos mercados europeu, americano ou japonês. Maiores detalhes sobre este assunto serão discutidos no próximo tópico.

O atributo do peso, assim como o volume do conjunto, têm importâncias menores na matriz pois, assim como na matriz da Tabela 5.5, têm pouca influência no peso e volume total do veículo.

Dessa maneira, foi definida a matriz de decisão apresentada na tabela 5.6. Os resultados da nova matriz são consequência das mudanças aplicadas, e assim foi escolhida uma outra opção para o estudo do caso do *Vectra*. Por muita pouca margem, a nova opção escolhida foi o farol de LEDs com *AFS*, modelo que será analisado em maiores detalhes.

Vale observar também que a aplicação desta tecnologia em um modelo no Brasil coloca o veículo e a empresa em posição de vanguarda no cenário nacional. Os benefícios da escolha da opção determinada vão além das vantagens técnicas obtidas pela análise da matriz de decisão. Deve-se levar em conta também a oportunidade da introdução de uma inovação e aquisição de conhecimento técnico praticamente inexistente no país, mas indispensável em um futuro próximo. O quanto antes alguma montadora se dispor a adquirir este *know-how*, mais preparada e melhor posicionada estará futuramente, uma vez que, como discutido no capítulo 5.2, tal tecnologia certamente se difundirá dentro de alguns anos.

5.6.3.1 Discussão

É interessante observar a sensibilidade da matriz, alterando os pesos dos seus atributos. As opções tiveram notas finais muito mais próximas, quando comparadas à matriz inicial. O comportamento da nova matriz foi determinado principalmente pelo aumento da importância do custo em detrimento da eficiência e desempenho. Dessa maneira, foi dada muito mais importância a um fator que os sistemas de LEDs obtiveram notas baixas, quando comparado aos sistemas de lâmpadas de *HID* e de lâmpadas halógenas. Os atributos da eficiência e do desempenho têm notas semelhantes para os sistemas de *HID* e de LEDs, o que fez com que a diminuição do seu peso nas notas não afetasse muito o resultado final. É possível observar que o equilíbrio dos resultados dessa matriz provém da distribuição mais homogênea dos itens de maior peso na matriz, ou seja, o aumento da influência do atributo do custo contrabalançou o estilo, critério determinante na matriz inicial.

Assim, foram realizadas algumas simulações para observar a resposta da matriz. Foi possível verificar que modificando, dentro do estipulado aceitável para as novas condições analisadas, os atributos determinantes da matriz, esta apontava sempre para alguns resultados. Tais atributos foram o custo, estilo e durabilidade, uma vez que o desempenho e a eficiência não têm pesos tão diferentes para os sistemas de LEDs ou de lâmpadas de *HID*, e os atributos de peso e volume não foram alterados. Desse jeito, as opções que sempre se destacavam nestas condições foram o farol de LEDs, farol de LEDs com *AFS*, e farol de lâmpadas de *HID* de xenônio.

Caso fosse dada relevância ainda maior para o custo, a opção de lâmpadas de *HID* de xenônio obtinha notas mais altas, enquanto o aumento do peso da durabilidade favorecia opções de faróis com LEDs.

5.6.4 O mercado nacional

Na presente data, o mercado no qual o veículo analisado está inserido têm concorrência muito alta, onde a diferenciação muitas vezes se dá pela presença de detalhes exclusivos. Apesar dos veículos vendidos nesta faixa de mercado no Brasil não serem caracterizados como carros de alta representatividade no exterior, nacionalmente muitos destes carros são topo-de-linha de suas marcas, sendo superados por modelos importados, somente. Portanto, é de se considerar que o público-alvo analisado é razoavelmente receptivo à inovações tecnológicas.

A faixa de mercado analisada, o de sedans quatro portas de luxo, com preços em torno de R\$ 80 mil, é composto por sete modelos⁴. Além do *Vectra Elite*, fabricado nacionalmente pela *General Motors do Brasil*, estão também o *Citroën C4 Pallas*, fabricado na Argentina, o *Ford Fusion SEL*, fabricado no México, o *Honda Civic EXS*, fabricado no Brasil, o *Renault Megane Privilège*, fabricado na Argentina, o *Toyota Corolla SE-G*, fabricado no Brasil, e o *Volkswagen Jetta*, fabricado no México. A relação dos modelos e seus respectivos sistemas de iluminação está descrito na tabela abaixo:

Fabricante	Modelo / Versão	Sistema utilizado	AFS	CLS
Chevrolet	Vectra Elite	Halógenas	não	não
Citroën	C4 Pallas	HID de xenônio	sim	não
Ford	Fusion SEL	HID de xenônio	não	não
Honda	Civic EXS	Halógenas	não	não
Renault	Megane Privilège	Halógenas	não	não
Toyota	Corolla SE-G	HID de xenônio	não	não
Volkswagen	Jetta	HID de xenônio	não	não

Tabela 5.7: Sistemas de iluminação utilizados no mercado analisado.

É possível observar que os carros situados nesta faixa mercado têm adotado a iluminação por lâmpadas de *HID* de xenônio, o que posiciona os modelos que ainda utilizam lâmpadas halógenas como mais atrasados tecnologicamente. Além da adoção cada vez mais freqüente de faróis de *HID* de xenônio, é interessante notar também que a *Citroën* utiliza um sistema simples de *AFS*, que integra aos seus faróis a iluminação flexível dinâmica em ambos os facho, o que possibilita ao seu feixe

⁴ Modelos citados estão na faixa de preço de acordo com a tabela FIPE de preços médios de veículos do mês de outubro de 2008 (www.fipe.org.br).

luminoso variar com ângulos de até 8 graus para o farol externo à curva e 15 graus para o farol interno

Dessa maneira, a aplicação da nova tecnologia de LEDs para os faróis do *Vectra Elite* deve levar em consideração a situação dos veículos concorrentes na sua faixa de mercado. Ou seja, a determinação das especificações do farol se fará em torno do objetivo de igualar ou superar tecnicamente as tecnologias dos outros veículos. Dessa maneira, para melhor visualizar o *benchmark* que deverá ser adotado para a elaboração do farol de LEDs, foi montada a seguinte tabela expositiva:

Fabricante	Modelo / Versão	Sistema utilizado	AFS	CLS	Lúmens gerados (lm)	
					<i>Facho baixo</i>	<i>Facho alto</i>
Citroën	C4 Pallas	HID de xenônio	sim	não	≈ 1200	≈ 2000
Ford	Fusion SEL	HID de xenônio	não	não	≈ 1200	≈ 2000
Honda	Civic EXS	Halógenas	não	não	≈ 400	≈ 600
Renault	Megane Privilège	Halógenas	não	não	≈ 400	≈ 600
Toyota	Corolla SE-G	HID de xenônio	não	não	≈ 1200	≈ 2000
Volkswagen	Jetta	HID de xenônio	não	não	≈ 1200	≈ 2000

Tabela 5.8: Relação das tecnologias e da geração luminosa dos veículos analisados [21].

5.6.5 Construção

A determinação da especificação de montagem do farol proposto para o veículo escolhido será feito através da análise das necessidades e da comparação com os produtos existentes no mercado no qual este está inserido. A partir das informações do tópico anterior, foi possível observar a necessidade da construção de um sistema capacitado a equivaler ou superar a marca de 1.200 lúmens e 2.000 lúmens gerados para os fachos baixo e alto, respectivamente [21]. Além disso, como proposto na matriz, deverá ser incluído um sistema *AFS*. Observando as especificações de modelos concorrentes no mercado atual, verifica-se a existência de somente um modelo com tecnologia similar. O farol com *AFS* do *Citroën C4 Pallas* é composto por um sistema de iluminação flexível dinâmica, com um atuador eletromecânico como descrito na seção 5.1.1.



Figura 5.45: *Citroën C4 Pallas* com faróis de *HID* de xenônio e iluminação flexível.

Dessa maneira, será proposta a inclusão de um sistema semelhante de *AFS* simples de iluminação flexível. A própria característica construtiva do farol de LEDs inibe o uso de atuadores móveis para sistemas de *AFS*. De maneira muito mais simples, sistemas de iluminação flexíveis são alcançados pela simples ativação ou desativação de uma unidade de LED específica. Assim, para este projeto, o sistema *AFS* simples de iluminação flexível será realizada pela inclusão de um LED adicional no fecho baixo, posicionado lateralmente inclinado, de modo que sua ativação ocorrerá somente quando for necessário.

Após análise dos produtos disponíveis atualmente para a construção de um farol de LEDs, foi possível afunilar o mercado para basicamente três modelos⁵:

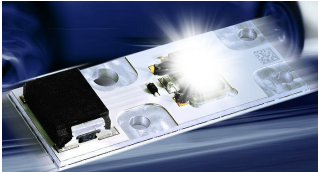
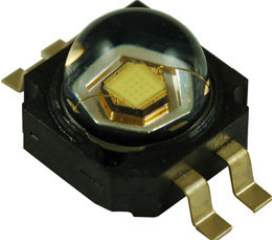
Fabricante	Osram	Koito Manufacturing	Philips Lumileds
Modelo	Ostar Headlamp	White LEDs	Luxeon
Geração de Lúmens (lm)	125 (1 chip por módulo) 1000 (5 chips por módulo)	400 (4 chips por módulo)	160
			

Tabela 5.9: LEDs existentes atualmente para aplicação em faróis automotivos.

Basicamente, os LEDs expostos são os modelos já disponibilizados no mercado, analisados previamente no tópico 5.6.2. A *Osram* provê para a *General Motors* os LEDs *Ostar Headlamp*, para o uso no *Escalade*, com capacidade de geração de 125 lúmens no conjunto com 1 chip, e possibilidade atingir até 1000 lúmens quando combinados 5 chips em série um mesmo conjunto a 1A de corrente. No entanto, operando a 750 mA, o conjunto emite normalmente 500 lúmens [12]. Já a *Koito Manufacturing* fornece para a *Toyota* LEDs para o *Lexus LS600h*, que têm a capacidade de geração de 400 lúmens por cada módulo, contendo 4 chips [19]. A *Audi*, por sua vez, aplica no *R8* LEDs *Luxeon*, da *Philips Lumileds*, que geram 160 lúmens em cada unidade.

A escolha da melhor opção para a aplicação no veículo estudado deve se dar com base na capacidade luminosa e no custo. Por se tratar de uma tecnologia recente e ainda pouco difundida, informações referentes aos custos de LEDs brancos de alta capacidade para faróis veiculares ainda são muito escassas, sendo que provavelmente a estratégia dos atuais fabricantes é propositalmente evitar a divulgação dos preços de suas unidades. No entanto, apesar do mercado atualmente ainda ser muito reduzido, em questão de poucos anos já se projeta uma popularização desta

⁵ Modelos analisados disponíveis nos catálogos dos fabricantes de novembro de 2008.

tecnologia, como já foi discutido no capítulo 5.2. Dessa maneira, apesar da possível existência de disparidade entre os preços hoje em dia, existe uma tendência de estabilização e redução dos preços praticados no mercado, como pode ser visto na tabela 5.1.

Portanto, a princípio, a escolha da opção de LED para a aplicação no caso estudado se baseará na capacidade luminosa gerada. É importante sempre lembrar que a escolha poderia tomar outro rumo com a aquisição de dados sobre o custo das opções de LEDs. Desse jeito, a melhor opção, levando em consideração sua maior capacidade de geração de luz em cada conjunto com 5 chips, será o *Ostar Headlamp* da *Osram Opto Semiconductors*.



Figura 5.46: Ostar Headlamp de 5 chips, da Osram Opto Semiconductors. [12]

Além da maior capacidade luminosa, também é válido a observação que o fato da *General Motors* já utilizar os LEDs da *Osram* facilita o processo de integração da tecnologia para o caso nacional, havendo assim uma maior compatibilidade entre os projetos dentro da empresa. O *know-how* já adquirido pela montagem de um veículo usando peças da *Osram*, assim como a existência de uma rede de contatos entre as duas multinacionais com certeza são facilitadores para um eventual programa.

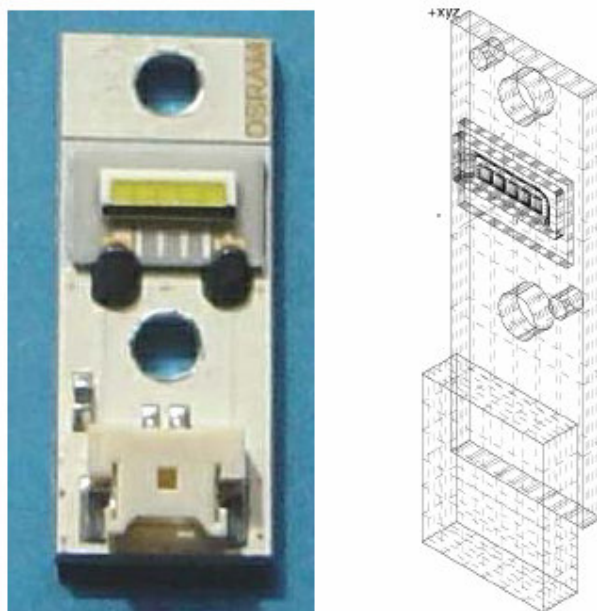


Figura 5.47: Unidade de LED da *Osram* contendo 5 chips. [3]



Figura 5.48: Distribuição luminosa de um LED com 5 chips. [3]

Portanto, com a análise de todo o levantamento anterior, este estudo propõe que uma possível construção de um sistema de LEDs para o veículo determinado utilizando LEDs *Ostar Headlamp*, os mesmos utilizados pela *Hella* para o fecho baixo do *Escalade*, e que seja composto por pela seguinte configuração:

	Facho baixo	Facho alto	Total
Modelo	<i>Ostar Headlamp</i> , 5 Chips ThinGaN®	<i>Ostar Headlamp</i> , 5 Chips ThinGaN®	
Fabricante	<i>Osram</i>	<i>Osram</i>	
Quantidade	3	4	7
Potência unitária / total (W)	12 / 36	12 / 48	84
Resistência térmica (K/W)	3	3	
Calor gerado (K)	108	144	252
Geração de luz unitária / total (lm)	500 / 1500	500 / 2000	3500
Corrente de operação (mA)	700	700	
Temperatura da cor (K)	6000	6000	
Vida útil (h)	≈ 20.000	≈ 20.000	

Tabela 5.10: Descrição do sistema adotado para o veículo analisado[11][12].

A tabela 5.10 descreve a quantidade de LEDs necessários para a proposta deste trabalho. Todos os LEDs descritos são do modelo *Ostar Headlamp*, da *Osram*, montados com 5 Chips ThinGaN cada. Operando à corrente de 700 mA, cada conjunto é capaz de gerar em condições normais, 500 lúmens [11][12].

Para o facho baixo, 2 LEDs seriam suficientes para atingir a luminosidade desejada. No entanto, foi adotado um LED adicional para uso do sistema *AFS*. Este LED deve ser posicionado inclinado lateralmente, de modo que seja ativado sob necessidade, ou seja, durante curvas. Para o facho alto alcançar os 2.000 lúmens, será necessário montagem de 4 conjuntos.

A potência total de cada farol será de 84 W, e que, com resistência térmica de 3K/W, gerará no total 252K. Como já discutido no tópico 5.3.3.1, a melhor alternativa para a dissipação de calor é a montagem de um ventilador no conjunto ótico. Assim como foi observado na matriz de decisão da tabela 5.2, esta opção

apresenta baixo peso, custo favorável em relação às outras alternativas e simplicidade de operação e montagem. No entanto são necessárias proteções adicionais para caso ocorra falha no ventilador, para preservar a integridade do sistema. Um controle de temperatura no sistema deve ser imposto, para se certificar que a temperatura de junção dos LEDs não exceda o seu limite. Assim, caso ultrapasse sua temperatura de junção máxima devido a alguma falha, o conjunto de LEDs têm sua alimentação reduzida. Como a eficiência dos LEDs aumenta simultaneamente com a diminuição da temperatura, os efeitos fotométricos são portanto pouco afetados com esta redução. Como já exposto anteriormente, uma diminuição de cerca de 20% da energia já proporciona um decréscimo significativo da temperatura de junção.

Como método de direcionamento do fecho, utiliza-se o sistema de projetor ótico para todas as unidades de LEDs descritas, como descritos na seção 5.6.1.3. Tal técnica é adotada por ser uma das sugestões da *Osram* para o uso específico nestes conjuntos de LEDs [12]. Uma ilustração da integração do conjunto de 5 chips do LED estudado com o projetor ótico pode ser observado na figura abaixo.

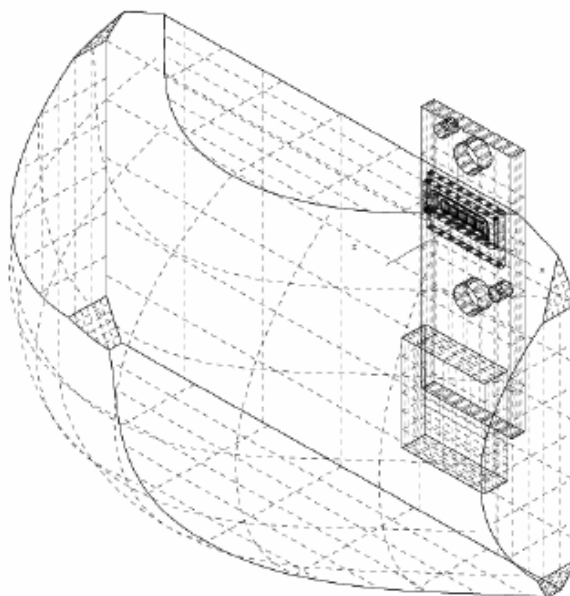


Figura 5.49: Montagem dos conjuntos de LEDs de 5 chips em um projetor ótico.

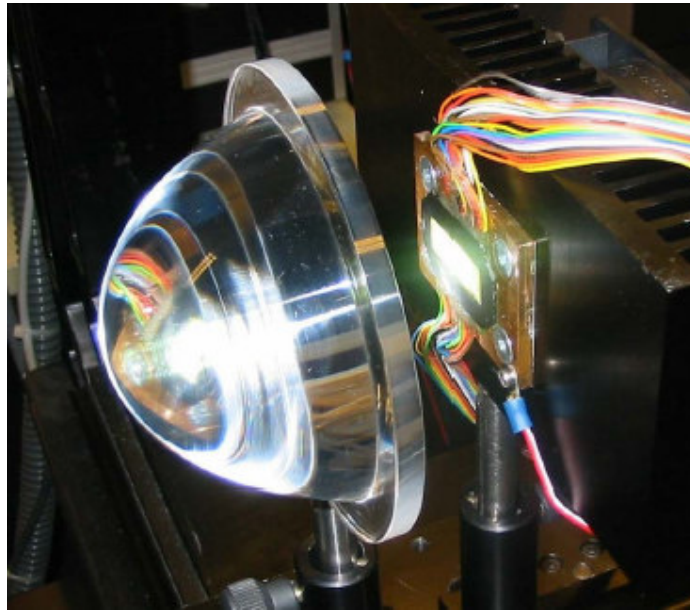


Figura 5.50: Montagem de LED na lente de um projetor ótico.[5]

Por fim, discutiremos a disposição das unidades no interior do farol. Como já visto anteriormente, a separação dos pontos geradores de iluminação dentro do farol confere ao projetista uma grande liberdade estilística, sendo esta uma das grandes vantagens na adoção de LEDs como fontes de luz. Como o formato do conjunto do farol já é pré-determinado, existe uma grande variedade de possibilidades para a disposição interna das unidades de LEDs. Seguindo os parâmetros do protótipo da *Hella* este trabalho levanta a seguinte sugestão para disposição dos LEDs no farol [17]:

- . 4 LEDs do fecho alto alinhados horizontalmente e localizados perto da base inferior do farol;
- . 2 LEDs do fecho baixo alinhados horizontalmente, localizados acima dos LEDs do fecho alto;
- . LED da iluminação flexível disposto inclinado lateralmente para fora, alinhados horizontalmente com os LEDs do fecho baixo;
- . Luzes de sinalização (piscas) localizados acima dos LEDs do fecho baixo.



Figura 5.51: Ilustração do protótipo da *Hella*

6. CONCLUSÃO

Atualmente, o mercado de iluminação veicular está na iminência de uma transformação tecnológica, sendo que o início deste processo já pode ser observado atualmente. O surgimento dos primeiros veículos dotados de LEDs como fonte principal de iluminação frontal é um avanço de proporções imensuráveis para a indústria automotiva. Tal transformação será a base de uma revolução no design automotivo, ao permitir uma flexibilidade estilística até hoje não vista nos automóveis. Além disso, seu desenvolvimento deve ser ainda aprimorado de modo a extrapolar qualquer parâmetro existente hoje em dia de iluminação veicular.

Este trabalho têm a importância de avaliar a viabilidade da aplicação de LEDs nos faróis automotivos em um cenário muito promissor para esta tecnologia. Como foi observado no estudo, o mercado para LEDs automotivos têm imenso potencial de crescimento, ainda mais com o desenvolvimento paralelo de tecnologias integráveis aos LEDs.

A comparação de diversas opções de faróis através de seus parâmetros na matriz de decisão possibilitou visualizar as vantagens de cada uma, e seu comportamento diante das prioridades dadas aos seus atributos. Dessa maneira, levando em consideração um projeto priorizando o alto desempenho, a inovação e um estilo diferenciado, foi possível, de maneira sistemática, determinar a melhor opção entre as alternativas propostas. Assim, a escolha do farol de LEDs combinados com sistemas auxiliares *AFS* e *CLS* foi determinado pelas importâncias atribuídas aos parâmetros do projeto, que neste estudo foram custo, estilo, desempenho, volume, eficiência, peso e durabilidade. Através disso, o sistema escolhido superou as outras opções na matriz e se mostrou a melhor alternativa.

Já o estudo da aplicação desta tecnologia no *Vectra Elite* levou em consideração as características do mercado que o veículo está inserido. A análise dos modelos já existentes de faróis de LEDs, seguida de uma extensa pesquisa sobre os produtos atualmente disponíveis possibilitou o levantamento das alternativas das unidades de LEDs possíveis para o estudo da aplicação desta parte do trabalho. Levando em conta uma análise do mercado em que o *Vectra* se situa, foi elaborado

nova matriz de decisão, com os pesos dos atributos alterados, de modo a melhor refletir as necessidades do produto localmente. Assim, conferindo aos atributos do custo e estilo os maiores pesos na matriz, e com alta importância também à durabilidade, a opção determinada para este caso foi o farol de LEDs com sistema *AFS* de iluminação flexível somente, ao contrário do sistema mais complexo anterior.

Por fim, após a escolha da alternativa do farol para o veículo, foi determinada a melhor opção do LED a ser aplicado no projeto. Isso foi feito através do levantamento das características dos LEDs disponíveis para tal aplicação, e a avaliação de qual modelo melhor se enquadraria para as necessidades expostas. Devido à escassez de informações sobre o custo das unidades de LEDs atualmente, a decisão da melhor opção de LED foi baseada na sua capacidade luminosa. Então, com o objetivo de equivaler ou superar as capacidades de outros veículos de geração de 1.200 lúmens para o fecho baixo, e 2.000 lúmens para o alto, foi optado o modelo *Ostar Headlamp*, capaz de gerar cerca de 500 lúmens cada, quando operado normalmente. Para atingir os níveis alcançados pelos outros faróis, foi sugerido que a montagem fosse composta por 3 LEDs no fecho baixo (sendo 1 LED dedicado à função de iluminação flexível do *AFS*), e 4 LEDs no fecho alto. O estudo prosseguiu com a sugestão do direcionamento do fecho com o uso de projetores óticos, e a disposição das unidades de LEDs dentro do farol.

Foi possível, através deste estudo, obter uma visão aberta sobre as possibilidades da aplicação desta tecnologia em situações com prioridades diferentes. Acima de qualquer resultado exato, este trabalho tem a importância de expor a viabilidade dos LEDs em faróis automotivos, e o impacto acarretado em um futuro próximo.

7. REFERÊNCIAS

- [1] KAMINSKI, P.C. **Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade**. Rio de Janeiro, LTC, 2000
- [2] **A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)**, Newtown Square, Project Management Institute, Inc., 2004
- [3] SCHMIDT, C., KALZE, F.J., EICHHORN, K., **Adaptive Front-Lighting System in LED Technology – Initial Steps and the Future**. SAE technical paper, Detroit, 2007
- [4] SAYERS, E. M., LUCAS, K., KUBENA, V., **Design Parameter Tradeoffs for LED Headlamp Applications**. SAE technical paper, Detroit, 2007
- [5] DECKER, D., HIMMLER, A., AMSEL, C., **The Road to Active Light - Headlamp Concepts with Enhanced Adaptive Functionalities**. SAE technical paper, Detroit, 2007
- [6] GRIMM, M., CASENAVE, S., **Dynamic Bending Light: An Innovative Technology for Today and the Future**. SAE technical paper, Detroit, 2007
- [7] KITA, Y., KOJIMA, S., SATO, T., **Color Perception and Recognition under Automotive Headlight with LED**. SAE technical paper, Detroit, 2007
- [8] LUCE, T., HO, P., **LED HB/LB Module : A Compact Module for Unrivaled Styling, HID Performance and Reduced Package**. SAE technical paper, Detroit, 2007
- [9] ESCUDERO, F.T., **Hierarquia de metas do consumidor de automóveis em Curitiba: Um estudo na categoria de utilitários esportivos compactos**, Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2006
- [10] HAMM, I.M., **LED im Audi R8 – was ist die technische Herausforderung?**, Reutlingen, Automotive Lighting, 2006
- [11] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS, Press Release, **OSTAR Headlamp LED achieves 620 lumen**, Munich, 2008
- [12] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS, Press Release, **Precisely defined headlight – OSTAR headlamp LED with new brightness data and accurate cut-off-line**, Regensburg, 2008
- [13] AUTOMOTIVE LIGHTING, Press Release, **Design meets Innovation - Red dot design award for first Full-LED headlamp**, Reutlingen, 2008

- [14] **The Lighting Report.** Stamford, SupplierBusiness Ltd, 2007
- [15] BIRCH, S., **Illuminating technology**, Warrendale, Automotive Engineering International, 2007, Volume 104
- [16] CARNEY, D., **LEDing the way**, Warrendale, Automotive Engineering International, 2008, Volume 116
- [17] DECLOEDT, P.; BRANQUART, H., **Smart power pushes LEDs into mainstream**, Warrendale, Automotive Engineering International, 2008, Volume 116 n9
- [18] **LED4Auto 06 – New LED & HBLED-based applications in cars**, Lyon, Yole Développement, 2006
- [19] OOKUBO, S., **Lexus First to Use White LED Headlight, Made by Koito**, Tokyo, Nikkei Electronics Asia Magazine, 2007
- [20] WHITAKER, T., **LED headlamps illuminate the way forward**, Upshire, LEDs Magazine, 2007, Issue 17
- [21] LAVIOLETTE, B., **Simply illuminating: Cadillac introduces its first all-LED headlight system**, Michigan, The Flint Journal, 2008
- [22] MURPHY, T., **Suppliers Get LED Out**, WardsAuto.com, www.wardsauto.com, 2005
- [23] VISNIC, B., **LED Headlamp's Future Bright in U.S.**, WardsAuto.com, www.wardsauto.com, 2005
- [24] POPE, B., **LED Lighting to Gain Ground in Europe, Hella Says**, WardsAuto.com, www.wardsauto.com, 2007
- [25] DIEM, W., **Halogen Lights Still Have Future, Analyst Says**, WardsAuto.com, www.wardsauto.com, 2005
- [26] MORAY, T., **LED Outlook: Still too hot to trot**, Automotive News, www.automotivenews.com, 2007
- [27] HIROSHI, E., **Distorções do mercado**, Interpress Motor, www.interpressmotor.com.br, 2007
- [28] GRUPO IBOPE, **Investimento na mídia marca início de 2005 para setor automobilístico**, www.ibope.com.br, 2005