



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

JOSÉ ROMÃO PIMENTEL NETO

**A INOVADORA ILUMINAÇÃO A LED, A REVOLUÇÃO NO
CONCEITO DE ILUMINAÇÃO E UM ESTUDO DE VIABILIDADE**

Campina Grande, Paraíba
Março de 2012

JOSÉ ROMÃO PIMENTEL NETO

A INOVADORA ILUMINAÇÃO A LED, A REVOLUÇÃO NO
CONCEITO DE ILUMINAÇÃO E UM ESTUDO DE VIABILIDADE

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Orientador:

Prof. Genoilton João de Carvalho Almeida

Campina Grande, Paraíba
Março de 2012

J. R. PIMENTEL NT

JOSÉ ROMÃO PIMENTEL NETO

A INOVADORA ILUMINAÇÃO A LED, A REVOLUÇÃO NO CONCEITO DE ILUMINAÇÃO E UM ESTUDO DE VIABILIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado dia ____ de março de 2012

BANCA EXAMINADORA

Prof. Genoilton João de Carvalho Almeida
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

Prof. Edson Guedes da Costa
Universidade Federal de Campina Grande
Convidado

Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos que me apoiaram e acreditaram que eu era capaz.

J. R. PIMENTEL NT

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado sabedoria, coragem e determinação para superar todos os desafios e dificuldades encontradas nessa caminhada.

Ao professor Genoilton João de Carvalho Almeida pela oportunidade de orientação e contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Edson Guedes da Costa e Tarso Vilela Ferreira pela ajuda complementar no desenvolvimento deste trabalho.

Ao pessoal da coordenação, Adail Ferreira da Silva Paes, Tchaikovsky Oliveira e Talvanes Meneses Oliveira pelo apoio e incentivo.

A todos os meus amigos e colegas de curso, em especial a Antenor, Tito, Aldo, Rafael, Anderson, Alberto, Joale, Bruno, Kaio, Eduardo, Lavnis, Antônio Neto, Danilo, Luciano, Balbino, Ramón, Marcílio e Marcelo, pela companhia agradável e alguns, também, pelas noites de estudos compartilhadas e pelo apoio durante a graduação.

E por fim, ao meu pai João Teixeira, a minha mãe Maria de Lourdes, a minha madrinha Maria José, a minha tia Tercília Rosa, aos meus irmãos Rosivelto, Ranielle e Rosival, além de outros parentes por toda a paciência, carinho e constante incentivo.

“O impossível existe até quando alguém duvide dele e prove o contrário.”

Albert Einstein.

RESUMO

Este trabalho apresenta a inovadora iluminação feita com LEDs, depois expõe o novo conceito da teoria de iluminação e por fim faz um estudo de viabilidade econômica utilizando luminárias LED para um ginásio. Inicialmente, são feitas considerações teóricas importantes que devem ser avaliadas em qualquer fonte luminosa como uma lâmpada, em seguida mostra a história, estrutura e funcionamento do LED, além de expor seus tipos de lâmpadas, luminárias e o drives, que é um equipamento necessário para o funcionamento das mesmas, em seguida, faz um comparativo com os outros tipos de lâmpadas antes utilizadas, além de fazer um histórico sobre o avanço da iluminação a LED no Brasil e no mundo; logo após é apresentado o novo conceito de iluminação baseado no real comportamento do olho humano diante a luz, implicando na necessidade da correção na leitura de instrumentos relacionados a ela e, por fim, tem um estudo de viabilidade econômica de duas luminárias LED para o ginásio da UFCG – Campus de Campina Grande.

Palavras-chave: LED, novo conceito de iluminação, histórico de iluminação a LED, iluminação de um ginásio, estudo de viabilidade econômica.

ABSTRACT

This work presents the lighting innovative made with LED after exposes the new concept of lighting theory and finally do a feasibility study using LED fixtures for a gym. Initially, are made important theoretical considerations that must be evaluated in any light source like a lamp, then shows the history, structure and operation of the LED, also of to expose its range of lamps, fixtures and drives, which is a necessary equipment for their operation, then makes a comparison with other types of lamps used before, also do a historic on the advancement of LED lighting in Brazil and worldwide, after is presented the new lighting concept based on the actual behavior of the human eye on the light, implying the need of correction in the reading of instruments related to it and, finally, have a economic feasibility study of two LED fixtures to the UFCG gym - Campina Grande Campus.

Keywords: LED, new lighting concept, historic of LED lighting, lighting a gym, economic feasibility study.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Espectro eletromagnético. | 4 |
| Figura 2. Fluxo luminoso de uma lâmpada. | 5 |
| Figura 3. Esfera de Ulbricht. | 5 |
| Figura 4. Intensidade luminosa de um corpo luminoso. | 6 |
| Figura 5. Iluminância proporcionada por um corpo luminoso. | 6 |
| Figura 6. Luxímetro. | 7 |
| Figura 7. Luminância de uma superfície refletora. | 7 |
| Figura 8. Temperatura de cor de fontes luminosas. | 9 |
| Figura 9. Escala de temperatura de cor. | 9 |
| Figura 10. Diferentes IRC's. | 9 |
| Figura 11. CDL de três lâmpadas diferentes. | 10 |
| Figura 12. Ângulo de fecho de uma lâmpada. | 10 |
| Figura 13. Ângulos de fecho de lâmpadas. | 11 |
| Figura 14. Diagrama isolux de uma fonte luminosa. | 11 |
| Figura 15. Triângulo de potência. | 12 |
| Figura 16. Formas de onda da componente fundamental e da terceira harmônica. | 14 |
| Figura 17. Forma de onda resultante da soma da fundamental com a terceira harmônica. | 14 |
| Figura 18. Estrutura de um LED. | 18 |
| Figura 19. Formatos de LEDs. | 19 |
| Figura 20. Feixes no interior de um LED. | 19 |
| Figura 21. Ligação de um diodo a uma fonte de alimentação. | 20 |
| Figura 22. Órbitas de um elétron. | 21 |
| Figura 23. Relação entre frequências (ou comprimentos de ondas) e cores. | 21 |
| Figura 24. Emissões de luz em um LED tricolor. | 22 |
| Figura 25. As cores primárias da luz e suas combinações. | 23 |
| Figura 26. LEDs para a emissão de luz branca. | 23 |
| Figura 27. LED StrawHat. | 24 |
| Figura 28. Lâmpadas LED StrawHat automotivas. | 25 |
| Figura 29. Lâmpada e luminária LED StrawHat para iluminação pública. | 25 |
| Figura 30. Lâmpadas LED StrawHat que imitam o formato de lâmpadas comuns. | 26 |

| | |
|--|----|
| Figura 31. Lâmpada LED StrawHat 166/5 (CornBulb) que imita o formato de LFC..... | 26 |
| Figura 32. LED SMD modelo 5050 (chip múltiplo). | 27 |
| Figura 33. Lâmpadas LED SMD automotivas. | 28 |
| Figura 34. Lâmpada, luminária, refletor e módulo LED SMD para iluminação pública..... | 29 |
| Figura 35. Lâmpadas LED SMD que imitam o formato de lâmpadas comuns..... | 29 |
| Figura 36. Lâmpada LED SMD 60/5050 (CornBulb) que imita o formato de LFC. | 29 |
| Figura 37. Circuito elétrico de um drive utilizado em lâmpadas LED..... | 31 |
| Figura 38. Drive interno de uma lâmpada LED. | 31 |
| Figura 39. Drive externo para refletores com módulo LED..... | 31 |
| Figura 40. Componentes do olho humano..... | 32 |
| Figura 41. Concentração de cones e bastonetes na retina..... | 32 |
| Figura 42. Espectros de luz dos três tipos de cones..... | 33 |
| Figura 43. Espectro de luz da visão fotópica..... | 33 |
| Figura 44. Espectro de luz da visão escotópica. | 34 |
| Figura 45. Espectros de luz da visão mesópica. | 34 |
| Figura 46. Razões S/P para diferentes lâmpadas. | 36 |
| Figura 47. Espectros de luz das lâmpadas vapor de sódio e LED..... | 37 |
| Figura 48. Espectros das lâmpadas vapor de sódio e LED juntos ao espectro mesópico. | 37 |
| Figura 49. Antes e depois da iluminação a LED na Rua do Arouche. | 38 |
| Figura 50. Lâmpada LED versus lâmpada incandescente. | 39 |
| Figura 51. Lâmpada LED versus lâmpada halógena..... | 40 |
| Figura 52. Lâmpada LED versus lâmpada fluorescente tubular. | 41 |
| Figura 53. Lâmpada LED versus lâmpada fluorescente compacta. | 42 |
| Figura 54. Luminária LED versus lâmpada vapor de mercúrio. | 43 |
| Figura 55. Luminária LED versus lâmpada vapor de sódio..... | 44 |
| Figura 56. Luminária LED versus lâmpada vapor metálico..... | 45 |
| Figura 57. Lâmpada LED versus lâmpada mista..... | 46 |
| Figura 58. Antes e depois da iluminação a LED do Túnel 2 do rodoanel Mario Covas..... | 47 |
| Figura 59. Catedral de Pedra de Canela. | 48 |
| Figura 60. Poste autônomo com luminária LED. | 49 |
| Figura 61. Antes e depois da iluminação a LED na Rua do Arouche. | 49 |
| Figura 62. Poste com luminárias LED instalado em Ede na Holanda..... | 50 |
| Figura 63. Uma rua em Los Angeles antes e depois das luminárias LED. | 51 |
| Figura 64. Parque Nabana-no-Sato iluminado por LEDs..... | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 65. Uma rua do centro histórico antes e depois das luminárias LED. | 52 |
| Figura 66. Dimensões da quadra de esportes. | 53 |
| Figura 67. Disposição das luminárias na quadra de esportes. | 54 |
| Figura 68. Pontos para a leitura com o luxímetro e determinação da iluminância média. | 54 |
| Figura 69. Disposição dos pontos de leitura para o luxímetro na quadra. | 55 |
| Figura 70. Modelo do refletor utilizado no ginásio. | 57 |
| Figura 71. Luminária LED EK-LG de 120 W. | 58 |
| Figura 72. Iluminação com luminária LED EK-LG e Maracanãzinho. | 59 |
| Figura 73. Módulo LED de 120 W. | 60 |
| Figura 74. Drive para módulo LED de 120 W. | 60 |
| Figura 75. Aparência da adaptação proposta. | 61 |
| Figura 76. Diferentes bases de lâmpadas. | 69 |
| Figura 77. Espectro de leitura do luxímetro. | 69 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Faixas dos comprimentos de onda do espectro visível..... | 4 |
| Tabela 2. Características das lâmpadas atuais..... | 16 |
| Tabela 3. Algumas características de LEDs comuns..... | 23 |
| Tabela 4. Características elétricas e fotométricas do LED StrawHat de 5 mm..... | 25 |
| Tabela 5. Algumas características da lâmpada LED StrawHat 166/5 (CornBulb). | 26 |
| Tabela 6. Características elétricas e fotométricas do LED SMD 5050. | 28 |
| Tabela 7. Algumas características da lâmpada LED SMD 60/5050 (CornBulb)..... | 30 |
| Tabela 8. Razões S/P e os diferentes tipos de eficiência luminosa para as lâmpadas. | 36 |
| Tabela 9. Características da iluminação da quadra..... | 56 |
| Tabela 10. Características da uma lâmpada LED..... | 57 |
| Tabela 11. Características da luminária LED EK-LG 120 W. | 59 |
| Tabela 12. Características do módulo LED 120 W. | 60 |
| Tabela 13. Características do drive para módulo LED 120 W..... | 60 |
| Tabela 14. Viabilidade da luminária LED modelo EK-LG..... | 61 |
| Tabela 15. Viabilidade do projeto próprio com módulo LED..... | 63 |
| Tabela 16. Diferentes valores do kWh na tarifação horo-sazonal verde da Energisa. | 70 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AC | Alternate Current (Corrente Alternada) |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| CCI | Clinton Climate Initiative (Iniciativa Climática de Clinton) |
| CDL | Curva de Distribuição Luminosa |
| CG | Campina Grande |
| CIE | Commission International de l'Eclairage (Comissão Internac. de Iluminação) |
| DC | Direct Current (Corrente Direta ou Contínua) |
| DHT | Distorção Harmônica Total |
| EVE | Estudo de Viabilidade Econômica |
| FP | Fator de Potência |
| IES | Illuminating Engineering Society (Sociedade da Engenharia da Iluminação) |
| IRC | Índice de Reprodução de Cor |
| LED | Light Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz) |
| LFC | Lâmpada Fluorescente Compacta |
| NBR | Norma Brasileira Regulamentadora |
| RGB | Red-Green-Blue (Vermelho-Verde-Azul) |
| SI | Sistema Internacional de unidades |
| SMD | Surface Mount Diode (Diodo de Montagem em Superfície) |
| TCC | Temperatura de Cor Correlata |
| UFCG | Universidade Federal de Campina Grande |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Motivação | 1 |
| 1.2 | Objetivos | 3 |
| 1.2.1 | Objetivos Gerais | 3 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 3 |
| 2 | Revisão Bibliográfica Básica..... | 4 |
| 2.1 | Espectro Eletromagnético..... | 4 |
| 2.2 | Fotometria | 5 |
| 2.2.1 | Fluxo Luminoso | 5 |
| 2.2.2 | Intensidade Luminosa | 5 |
| 2.2.3 | Iluminância ou Iluminamento..... | 6 |
| 2.2.4 | Luminância | 7 |
| 2.2.5 | Eficiência Luminosa | 8 |
| 2.2.6 | Temperatura de Cor Correlata | 8 |
| 2.2.7 | Índice de Reprodução de Cor..... | 9 |
| 2.2.8 | Curva de Distribuição Luminosa ou Fotométrica..... | 10 |
| 2.2.9 | Ângulo de Facho | 10 |
| 2.2.10 | Diagrama de Isolux | 11 |
| 2.2.11 | Vida Útil ou Média | 12 |
| 2.3 | Outras Características Importantes..... | 12 |
| 2.3.1 | Fator de Potência | 12 |
| 2.3.2 | Distorção Harmônica | 13 |
| 2.3.3 | Resistência, Presença de Produtos Tóxicos e Emissão de CO ₂ | 15 |
| 2.4 | Características das Lâmpadas Atuais | 16 |
| 3 | A Inovadora Iluminação a LED | 17 |
| 3.1 | O LED | 17 |
| 3.1.1 | História..... | 17 |
| 3.1.2 | Estrutura..... | 17 |
| 3.1.3 | Funcionamento..... | 19 |
| 3.2 | Lâmpadas LED..... | 24 |
| 3.2.1 | Lâmpada LED StrawHat..... | 24 |
| 3.2.2 | Lâmpada LED SMD | 27 |
| 3.2.3 | Drive para Lâmpadas LED / AC..... | 30 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | A Revolução no Conceito de Iluminação | 32 |
| 4.1 | Conceitos de Visão Fotópica, Escotópica e Mesópica | 32 |
| 4.2 | Razão S/P e Eficiência Luminosa Efetiva | 34 |
| 4.3 | Exemplificação e Aplicação Real..... | 37 |
| 5 | Comparativo com Outras Lâmpadas..... | 39 |
| 5.1 | Método para Encontrar a Lâmpada LED Equivalente | 39 |
| 5.2 | Lâmpada LED Versus Lâmpada Incandescente..... | 39 |
| 5.3 | Lâmpada LED Versus Lâmpada Halógena | 40 |
| 5.4 | Lâmpada LED Versus Lâmpada Fluorescente Tubular | 41 |
| 5.5 | Lâmpada LED vs Lâmpada Fluorescente Compacta | 42 |
| 5.6 | Lâmpada LED Versus Lâmpada Vapor de Mercúrio..... | 43 |
| 5.7 | Lâmpada LED Versus Lâmpada Vapor de Sódio | 44 |
| 5.8 | Lâmpada LED Versus Lâmpada Vapor Metálico | 45 |
| 5.9 | Lâmpada LED Versus Lâmpada Mista | 46 |
| 6 | Histórico de Iluminação a LED | 47 |
| 6.1 | Iluminação a LED no Brasil | 47 |
| 6.1.1 | São Paulo/SP – Túnel 2 do Rodoanel Mario Covas | 47 |
| 6.1.2 | Canela/RS – Catedral de Pedra de Canela | 48 |
| 6.1.3 | Fortaleza/CE – Palácio Iracema..... | 48 |
| 6.1.4 | São Paulo/SP – Rua do Arouche..... | 49 |
| 6.2 | Iluminação a LED no Mundo | 50 |
| 6.2.1 | Holanda – Primeira Iluminação a LED no Mundo em Ede | 50 |
| 6.2.2 | Estados Unidos da América – Ruas em Los Angeles..... | 50 |
| 6.2.3 | Japão – Parque Nabana-no-Sato em Kuwana | 51 |
| 6.2.4 | Portugal – Iluminação do Centro Histórico em Arraiolos | 52 |
| 7 | Estudo de Viabilidade Econômica para o Ginásio da UFCG – Campus CG..... | 53 |
| 7.1 | Situação da Iluminação Atual..... | 53 |
| 7.2 | Cálculo da Lâmpada LED Equivalente | 57 |
| 7.3 | Opções de Lâmpadas | 58 |
| 7.3.1 | Luminária LED Modelo EK-LG de 120 W da Technosol..... | 58 |
| 7.3.2 | Projeto Próprio com Módulo LED de 120 W | 59 |
| 7.4 | Estudo de Viabilidade Econômica..... | 61 |
| 7.4.1 | EVE da Luminária LED Modelo EK-LG | 61 |
| 7.4.2 | EVE do Projeto Próprio com Módulo LED | 63 |
| 8 | Conclusão..... | 65 |
| | Bibliografia..... | 66 |
| | Anexos..... | 69 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O significativo papel da luz na vida e no desenvolvimento do ser humano é inquestionável. Desde que o homem dominou o fogo, ainda na pré-história, sentiu-se a necessidade de se criar um mecanismo que iluminasse pessoas e objetos após o pôr do sol.

A ânsia por uma tecnologia melhor fez pesquisadores tentarem, desde o século XVIII, criar o que conhecemos hoje como lâmpada. A primeira tentativa com resultados notáveis foi apresentada em 1802 em Londres, pelo químico do Royal Institution, Humphry Davy. Já em 1820, também na Inglaterra, foi desenvolvida uma lâmpada de descarga de baixa pressão a vapor de mercúrio, mas também sem resultados satisfatórios. Foi somente no final do século XIX que teve início o desenvolvimento tecnológico das lâmpadas que segue até hoje. Baseado em um experimento de 1860 do físico e químico Joseph Swan, Thomas Alva Edison criou a lâmpada incandescente em outubro de 1879.

A lâmpada *incandescente* deu origem a diversas outras, como a *halógena*, a *fluorescente tubular* e a *fluorescente compacta*. Algumas são adequadas a apenas algumas situações, como as de *descarga em alta pressão* (*vapor de mercúrio*, *de sódio*, *metálica e mista*) e lâmpadas que usam princípios diferenciados e são inovadoras, como as *lâmpadas LED* que é o foco desse trabalho. Essencial em nossas vidas, a lâmpada está de tal forma incorporada em nosso dia a dia, que muitas vezes só sentimos falta, quando queimam.

O crescente consumo de energia elétrica possui aspectos negativos como, o esgotamento dos recursos para produção de energia, impacto ao meio ambiente produzido por essa atividade. Uma maneira de conter esta expansão do consumo de energia elétrica, sem comprometer a qualidade de vida e desenvolvimento econômico sustentável, tem sido o estímulo ao uso eficiente desse insumo.

Em iluminação a eficiência energética passa então pela utilização de uma menor quantidade de energia elétrica sem comprometer qualitativa e quantitativamente os níveis de iluminação desejados. De uma forma simples, baseia-se na utilização de sistemas de iluminação eficientes.

Podemos racionalizar o uso da energia elétrica através de uma menor utilização de equipamentos elétricos e de um maior controle no uso de lâmpadas. Este maior controle passa

pela escolha mais adequada, da potência e do número de lâmpadas, para iluminar cada ambiente e evitar o hábito de deixar lâmpadas acesas desnecessariamente.

O mercado de iluminação e, mais especificamente o de lâmpadas, passa por momentos de transição e muitas novidades. A busca contínua por eficiência tem gerado o desenvolvimento de novas tecnologias e provocado a substituição de fontes de luz consideradas ineficientes por outras universalmente reconhecidas como eficientes, como é o caso das lâmpadas fluorescentes compactas e de LED.

Com o desenvolvimento da tecnologia de materiais e a descoberta de novas técnicas de fabricação, os LEDs vêm sendo produzidos com custos cada vez menores, proporcionando uma diversidade de aplicações, como sinalização e iluminação de efeito. Por suas características, os LEDs vêm se tornando uma grande preferência por parte dos arquitetos e lighting designers, que assim passaram a dispor de um novo recurso, capaz de proporcionar concepções de iluminação mais eficientes, funcionais e artísticas.

Os LEDs oferecem uma iluminação inigualável ao ambiente urbano de uma maneira interessante e prática. Eles são altamente adaptáveis, permitindo que os designers abandonem a iluminação estática do passado e se animem a criar ambientes flexíveis que possam, por exemplo, mudar com a hora, tempo ou a estação, e ofereçam uma cor especialmente festiva em feriados públicos. E tudo isso com um consumo de energia bem reduzido.

Adicionalmente, ao assegurar uma maior eficiência e desempenho em termos energéticos, a tecnologia LED reduz direta e indiretamente o consumo e, conseqüentemente, as emissões de CO₂ para a atmosfera, um fator preponderante para se alcançar a necessária sustentabilidade energética.

Apesar de ser uma tecnologia relativamente recente, o consenso é geral, a tecnologia LED está cada vez mais presente no nosso ambiente e, devido às suas inúmeras vantagens e por questões de eficiência energética, esta tecnologia veio desafiar e questionar as fontes de luz tradicionais em aplicações de iluminação.

Há pouco tempo se pensava que as lâmpadas LED eram menos eficientes que as lâmpadas de vapor de sódio, no entanto, com as recentes descobertas sobre o funcionamento do olho humano diante de uma iluminação em um ambiente de trabalho, ou seja, onde realmente necessita-se de uma fonte de luz artificial, essa afirmação tornou-se errônea. A lâmpada LED é efetivamente mais eficiente que qualquer outra lâmpada antes inventada.

Iluminação a LED é indiscutivelmente a mudança mais profunda vivida pela indústria de iluminação desde a invenção da luz elétrica. Os LEDs estão transformando a natureza da iluminação abrindo novas oportunidades para melhorar a vida e a experiência das pessoas.

1.2 OBJETIVOS

A seguir, são descritos os objetivos da proposta deste trabalho tanto em caráter geral quanto específico.

1.2.1 OBJETIVOS GERAIS

O estudo luminotécnico das lâmpadas LED comparando-as com outros tipos de lâmpadas já comercialmente utilizadas; apresentação do novo e revolucionário conceito de iluminação e estudo de viabilidade econômica para a iluminação do ginásio da UFCG (Campus de Campina Grande) com lâmpadas LED.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Expor conceitos importantes sobre a iluminação através do estudo fotométrico para se ter uma base teórica necessária para a comparação entre os diferentes tipos de lâmpadas já atualmente utilizadas e as lâmpadas LED. Expor a história, estrutura e funcionamento do LED e das lâmpadas LED detalhando suas vantagens e desvantagens em comparação com outras lâmpadas. Mostrar uma equação para se fazer a equivalência entre lâmpadas LED e outras. Além de ilustrar algumas aplicações com lâmpadas LED que já existem no Brasil e no mundo.
- Apresentar o novo e revolucionário conceito de iluminação baseado em recentes estudos sobre o funcionamento do olho humano diante de uma iluminação em um ambiente de trabalho, ou seja, onde realmente necessita-se de uma fonte de luz artificial.
- Verificar a iluminância no ginásio através da norma NBR-5382 e comparar com os valores adequados para a iluminação do mesmo através da norma NBR-5413 e finalizar com cálculos para encontrar a lâmpada LED equivalente e um estudo de viabilidade econômica para iluminar com elas o ginásio da UFCG (Campus de Campina Grande).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA BÁSICA

Neste capítulo será visto grande parte do embasamento teórico deste trabalho. Mais precisamente, apresentará o espectro eletromagnético, a teoria fotométrica, algumas outras características importantes e, por fim, o detalhamento dos tipos de lâmpadas atuais com suas características fotométricas, elétricas e aplicações.

2.1 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Uma fonte de radiação emite ondas eletromagnéticas com diferentes comprimentos de onda. O sol, como exemplo, emite todos os comprimentos de onda do espectro visível.

Para o estudo da iluminação, são importantes os comprimentos de onda variando de 380 a 780 nm, pois eles são capazes de estimular a retina do olho humano (espectro visível). As radiações com comprimento de onda entre 100 e 380 nm são chamadas de radiação ultravioleta e entre 780 e 1000 nm são chamadas de radiação infravermelha.

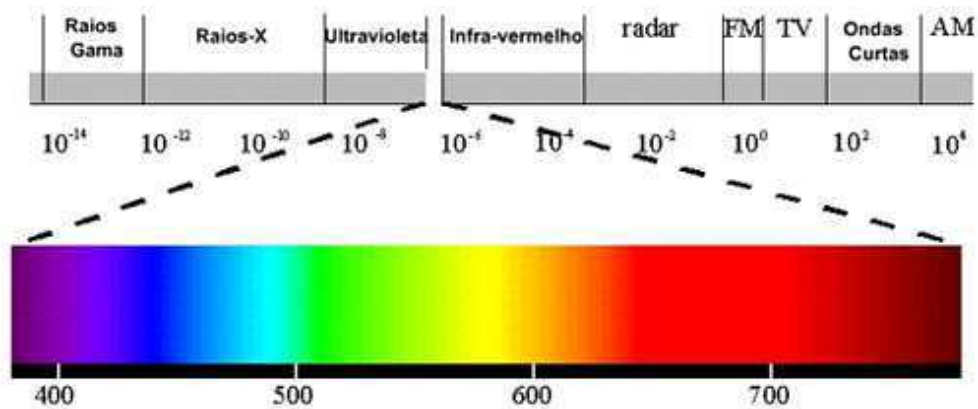


Figura 1. Espectro eletromagnético.

Fonte: Eduscaping – Espectro Eletromagnético, Brasil, 2011.

Tabela 1. Faixas dos comprimentos de onda do espectro visível.

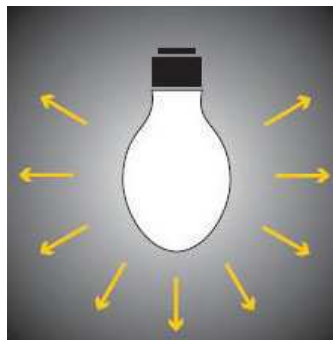
| Comprimento de Onda | Cor |
|---------------------|----------|
| De 380 a 436 nm | Violeta |
| De 436 a 495 nm | Azul |
| De 495 a 566 nm | Verde |
| De 566 a 589 nm | Amarelo |
| De 589 a 627 nm | Laranja |
| De 627 a 780 nm | Vermelho |

2.2 FOTOMETRIA

A fotometria estuda as medições das grandezas relativas a emissão, recepção e absorção da luz. A seguir, serão vistas as grandezas relacionadas à mesma.

2.2.1 FLUXO LUMINOSO

O *fluxo luminoso* (Φ) é a quantidade total de luz emitida por um corpo luminoso cujo comprimento de onda do espectro eletromagnético varia entre 380 e 780 nm. A sua unidade de medida no SI é o *lúmen* (lm).



*Figura 2. Fluxo luminoso de uma lâmpada.
Fonte: Avant SP – Compêndio Técnico, Brasil, 2011.*

A *Esfera de Ulbricht* é o equipamento utilizado para medir o fluxo luminoso de uma fonte luminosa. A fonte luminosa é colocada no centro da esfera.



*Figura 3. Esfera de Ulbricht.
Fonte: Heraeus Noblelight, 2011.*

2.2.2 INTENSIDADE LUMINOSA

A *intensidade luminosa* (I) é a medida da percepção da potência emitida por uma fonte luminosa em uma dada direção. A sua unidade de medida no SI é a *candela* (cd).

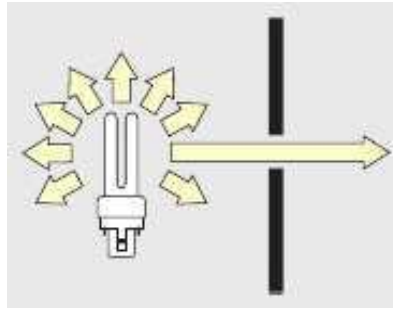


Figura 4. Intensidade luminosa de um corpo luminoso.
Fonte: OSRAM – Manual Luminotécnico Prático, Brasil, 2007.

A intensidade luminosa também é definida como o fluxo luminoso compreendido na unidade de ângulo sólido (ω) (em esferorradianos - sr) no qual é emitido, pressupondo-se que a fonte luminosa é pontual.

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \quad (2.1)$$

2.2.3 ILUMINÂNCIA OU ILUMINAMENTO

A *iluminância* (E) é a relação entre o fluxo luminoso que incide na direção perpendicular a uma superfície e a sua área. A sua unidade de medida no SI é o *lux* (lx).

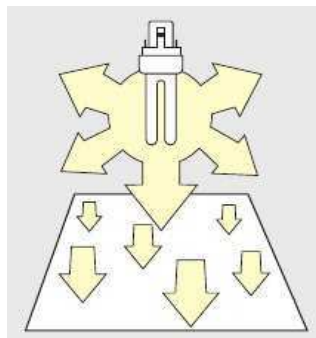


Figura 5. Iluminância proporcionada por um corpo luminoso.
Fonte: OSRAM – Manual Luminotécnico Prático, Brasil, 2007.

A ABNT define como sendo a razão do fluxo luminoso recebido pela superfície em torno de um ponto considerado para a área de superfície quando esta tende para o zero.

$$E = \frac{\Phi}{S} \quad (2.2)$$

Em um determinado ponto, a iluminância é calculada por:

$$E = \frac{I \cdot \cos^3 \alpha}{h^2} \quad (2.3)$$

Onde α é o ângulo de abertura do ponto específico e h é a altura do ponto luminoso com relação à superfície iluminada.

O *Luxímetro* é o instrumento utilizado para a leitura da iluminância em um determinado ponto, que na técnica de iluminação esta superfície é, na maioria dos casos, um plano horizontal situado a 1 m acima do solo e a ele se dá o nome de plano de trabalho ou útil.



Figura 6. Luxímetro.

Fonte: Instrutemp – Instrumentos de Medição, 2011.

2.2.4 LUMINÂNCIA

A *luminância* (L) é a quociente entre a intensidade luminosa I emitida por uma fonte luminosa ou por uma superfície refletora e a sua área aparente S . Ela depende do tamanho aparente da superfície e da intensidade luminosa emitida pela superfície na direção do olho, é através da luminância que o homem enxerga, ela depende tanto do nível de iluminação quanto das características da reflexão das superfícies. A sua unidade de medida no SI é a *candela por metro quadrado* (cd/m^2).

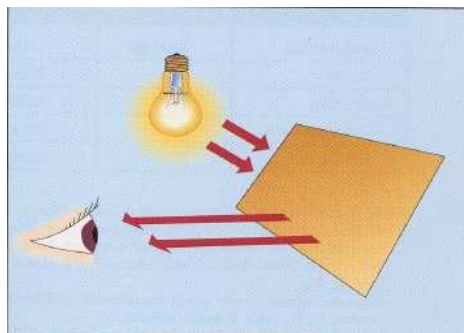


Figura 7. Luminância de uma superfície refletora.

Fonte: Scribd – Bases Gerais da Luminotecnia, 2007.

Em um determinado ponto de visualização, a luminância é calculada por:

$$L = \frac{I}{S \cdot \cos \alpha} \quad (2.4)$$

Onde α é o ângulo de abertura do ponto específico e S é a área da superfície refletora.

Como é difícil medir-se a intensidade luminosa que provém de um corpo não radiante (através de reflexão), pode-se recorrer a outra fórmula, a saber:

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi} \quad (2.5)$$

Onde ρ é a refletância ou coeficiente de reflexão. O mesmo é a relação entre o fluxo luminoso refletido e o fluxo luminoso incidente em uma superfície, sendo esse coeficiente geralmente dado em tabelas, cujos valores são função das cores e dos materiais utilizados.

2.2.5 EFICIÊNCIA LUMINOSA

A *eficiência luminosa* (η) é o quociente entre o fluxo luminoso Φ total emitido por uma fonte luminosa e a potência por ela consumida P . A sua unidade de medida no SI é o *lúmen por Watt* (lm/W).

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \quad (2.6)$$

As lâmpadas se diferenciam entre si não só pelos diferentes fluxos luminosos que elas irradiam, mas também pelas diferentes potências que consomem. Para poder compará-las é necessário que se saiba quantos lúmens são gerados por watt absorvido, daí a eficiência.

2.2.6 TEMPERATURA DE COR CORRELATA

A *temperatura de cor correlata* (TCC) é um parâmetro para classificar a tonalidade da luz. Assim como um corpo metálico que, em seu aquecimento, passa desde o vermelho até o branco e depois o azulado. A sua unidade de medida é o *Kelvin* (K).

Como referência, tem-se a luz amarelada de uma lâmpada incandescente que está em torno de 2700 K e a luz solar do meio dia que está em torno de 5700 K. É importante destacar que a temperatura de cor da fonte luminosa não está relacionada à temperatura física.

Quando se diz que um sistema de iluminação apresenta “luz quente” significa que apresenta uma tonalidade mais amarelada (2700 K, por exemplo); já quando se diz “luz fria” seria uma tonalidade mais branca azulada (6500 K, por exemplo). Uma luz neutra seria um valor intermediário em torno de 5000 K. Em inglês costuma-se falar em branco-quente (warm-white), branco-neutro (white) e branco-frio (cool-white). A Figura 8 mostra isso.

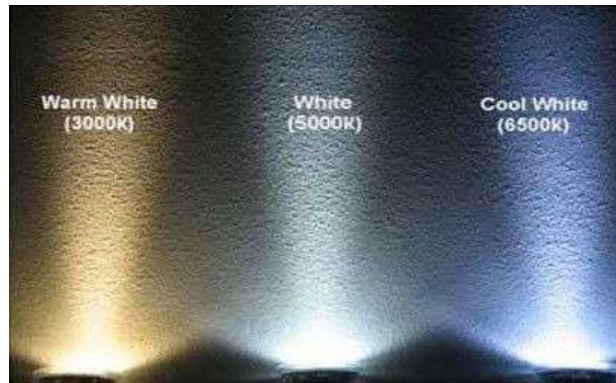


Figura 8. Temperatura de cor de fontes luminosas.
Fonte: LEDLight – Information on LED Lighting, 2011.

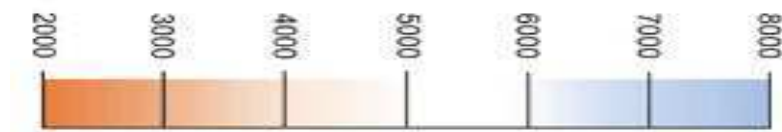


Figura 9. Escala de temperatura de cor.
Fonte: Ponto de Ouro – Um Pouco de Luz, 2011.

2.2.7 ÍNDICE DE REPRODUÇÃO DE COR

O *índice de reprodução de cor* (IRC) é um parâmetro que se refere à correspondência entre a cor real de um objeto ou superfície (iluminado pelo sol) e sua aparência diante de uma fonte de luz artificial. É adimensional e comumente representado em *porcentagem* (%).

Lâmpadas com IRC igual a 100% apresentam as cores com total fidelidade e precisão. Quanto mais baixo esse índice, mais deficiente é a reprodução das cores.

Um IRC em torno de 60% pode ser considerado razoável, 80% é bom e acima de 90% é excelente. Claro que tudo irá depender da exigência da aplicação que uma lâmpada deve atender. Observe na Figura 10 um mesmo ambiente para lâmpadas com IRC's diferentes.

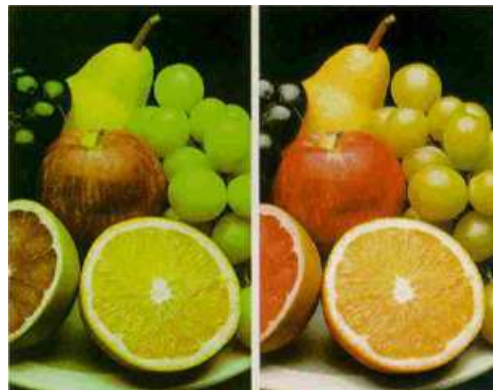


Figura 10. Diferentes IRC's.
Fonte: Philips – Guia Prático Philips Iluminação, Brasil, 2003.

2.2.8 CURVA DE DISTRIBUIÇÃO LUMINOSA OU FOTOMÉTRICA

A *curva de distribuição luminosa* (CDL) é a representação da intensidade luminosa em todos os ângulos em que ela é direcionada num determinado plano. Para a uniformização dos valores das curvas, geralmente essas são referidas a 1000 lm. Nesse caso, é necessário multiplicar o valor encontrado na CDL pelo fluxo luminoso da lâmpada em questão e dividir o resultado por 1000 lm.

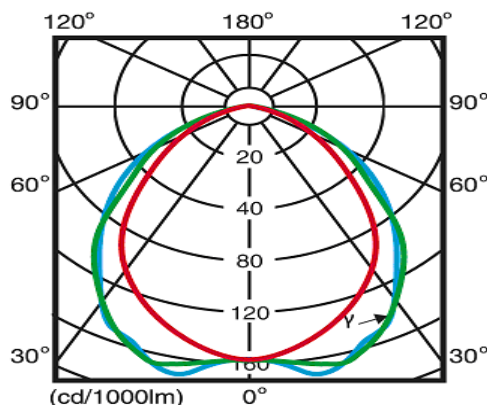


Figura 11. CDL de três lâmpadas diferentes.
Fonte: Ilusyon – Productos, 2011.

2.2.9 ÂNGULO DE FACHO

O *ângulo de fecho* (θ) é o ângulo entre duas direções nas quais a intensidade luminosa decai a 50% do seu máximo valor na linha central da CDL. O ângulo de fecho de uma lâmpada nos dá a idéia de como o fecho de luz se espalha à medida que se distancia do fecho central. A sua unidade de medida é o grau ($^{\circ}$).

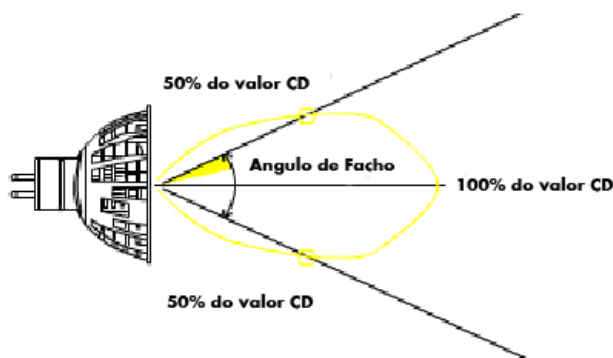


Figura 12. Ângulo de fecho de uma lâmpada.
Fonte: Leddepot – Conceitos Básicos, 2011.

O ângulo de fecho de uma fonte luminosa pode ser alterado a partir de uma luminária com o intuito de concentrar mais o fecho em um determinado local (ver Figura 13).

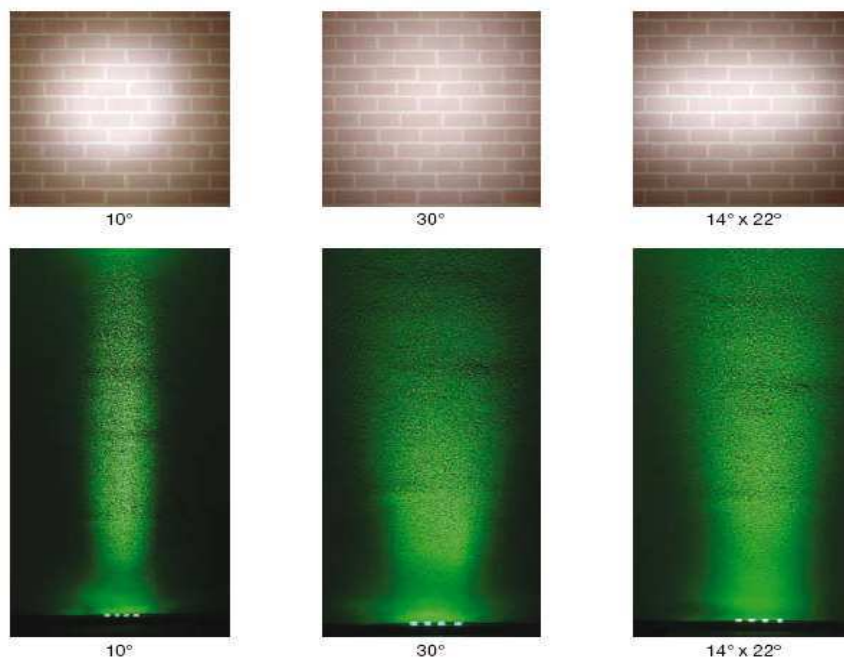


Figura 13. Ângulos de fecho de lâmpadas.
Fonte: OSRAM – Catálogo de Módulos de LED, 2011.

Uma equação importante que envolve ângulo de fecho e ângulo sólido é vista abaixo.

$$\omega = 2\pi \cdot \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right) \quad (2.7)$$

2.2.10 DIAGRAMA DE ISOLUX

O *diagrama de isolux* é um conjunto de curvas isolux, sendo esse último uma linha traçada em um plano, referida a um sistema de coordenadas apropriadas, ligando pontos de uma mesma superfície que têm iluminamentos iguais. Para a uniformização dos valores das curvas, geralmente essas são referidas a 1000 lm e altura de montagem de 1 m.

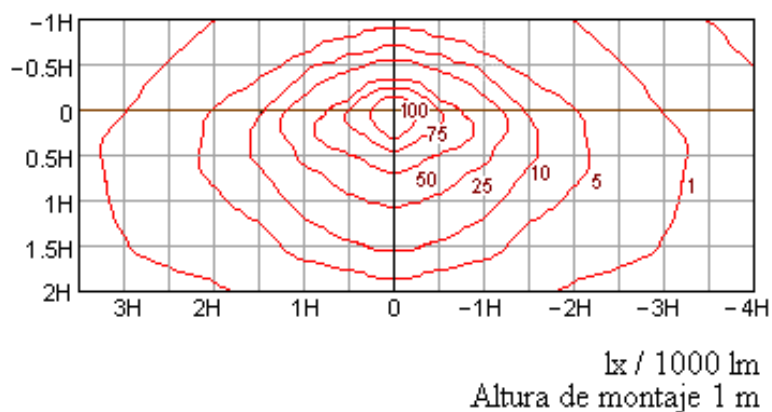


Figura 14. Diagrama isolux de uma fonte luminosa.
Fonte: UPC – Fotometria, 2011.

2.2.11 VIDA ÚTIL OU MÉDIA

A *vida útil* de uma lâmpada é definida por critérios pré-estabelecidos, considerando sempre um grande lote testado sob condições controladas e de acordo com as normas pertinentes. Essa medida não é muito precisa porque dependendo do tipo de lâmpada e de como será usada. Por exemplo, uma lâmpada fluorescente compacta que tem partidas freqüentes, encurta a sua vida útil, da mesma forma, se tem poucas partidas, prolonga sua vida útil. A sua unidade de medida é a *hora* (h).

2.3 OUTRAS CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES

Existem outras características provenientes das lâmpadas que são de suma importância, dentre elas há o fator de potência, as harmônicas e os produtos tóxicos utilizados na produção da mesma e que precisão de um fim adequado. A seguir, trataremos dessas três características adicionais.

2.3.1 FATOR DE POTÊNCIA

Fator de potência (FP) é definido como a relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (N) utilizadas por um dispositivo ou equipamento, independentemente das formas que as ondas de tensão e corrente apresentem. A energia elétrica é composta de duas partes: energia ativa (trabalho) e energia reativa (magnetizante) proveniente da potência reativa (Q). A energia ativa realiza o trabalho útil. A energia reativa não, sua única função é fornecer campos magnéticos requeridos pelas cargas indutivas. Na Figura 15, a seguir, vê-se o triângulo de potência e a equação do fator de potência.

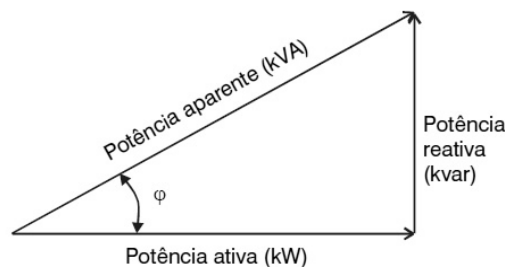


Figura 15. Triângulo de potência.
Fonte: Engéletrica – Fator de Potência, 2011.

$$FP = \frac{P}{N} = \text{Cos}(\varphi) \quad (2.8)$$

A concessionária de energia elétrica precisa fornecer a potência aparente para os seus consumidores, no entanto, um valor elevado de potência reativa é desvantagem para ela porque diminui a capacidade do sistema de transmissão e distribuição de conduzir mais blocos de potência ativa, que é a que exerce trabalho, e aumenta as perdas por efeito Joule.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL estabelece que o fator de potência nas unidades consumidoras deve ser superior a 0,92 capacitivo durante 6 horas da madrugada e 0,92 indutivo durante as outras 18 horas do dia. Esse limite é determinado pelo Artigo nº 95 da Resolução ANEEL nº 414 de 09 de setembro de 2010, e quem descumprir está sujeito a uma multa que leva em conta o fator de potência medido e a energia consumida ao longo do mês da ocorrência.

A mesma resolução estabelece que a exigência de medição do fator de potência pelas concessionárias é obrigatória para unidades consumidoras de alta tensão (supridas com mais de 1 kV) e facultativa para unidades consumidoras de baixa tensão (abaixo de 1 kV, como residências em geral). A cobrança em baixa tensão, na prática, raramente seria necessária, pois o fator de potência deste tipo de unidade consumidora geralmente está acima de 0,92. Não compensa, pois demanda a instalação de medidores de energia reativa.

É importante destacar aqui que lâmpadas com maior eficiência luminosa, mas com fator de potência baixo pode implicar em um maior consumo que pode ou não ser constatado dependendo se for um consumidor de alta ou baixa tensão. Para o consumidor de baixa tensão, o valor da sua conta no final do mês realmente diminui utilizando estas lâmpadas com maior eficiência luminosa, mas dependendo do fator de potência o mesmo não estará contribuindo com a economia energética do país.

2.3.2 DISTORÇÃO HARMÔNICA

De uma maneira ideal, a forma de onda da tensão fornecida pela concessionária aos seus consumidores é uma senóide, cuja frequência, dita frequência fundamental, vale 60 Hz. As harmônicas são componentes senoidais de frequências múltiplas da frequência fundamental. As inter-harmônicas são componentes senoidais, cujas frequências não são múltiplas da fundamental. Tanto as harmônicas como as inter-harmônicas são causadas por elementos não lineares do sistema elétrico. Por elementos não lineares, entendem-se as cargas em que a relação entre os valores de tensão e de corrente não é linear, ou seja, não obedecem à lei de Ohm. Na Figura 16 pode ser vista as formas de onda da frequência fundamental e da terceira harmônica (possui três vezes o valor da frequência fundamental).

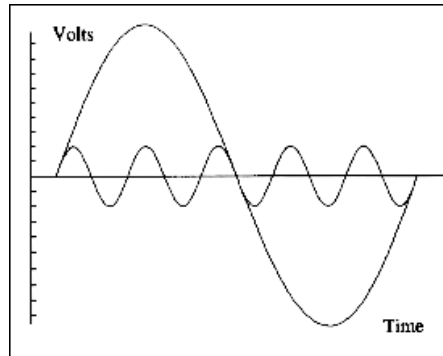


Figura 16. Formas de onda da componente fundamental e da terceira harmônica.
 Fonte: ENGEL – Distorção harmônica, 2011.

Já na Figura 17, ver-se o resultado proveniente da presença simultânea delas na rede elétrica. Esta curva resultante mostra bem a distorção harmônica da curva de tensão.

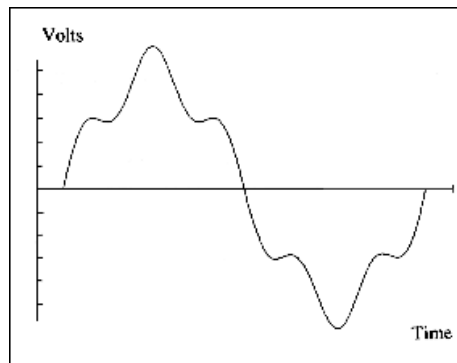


Figura 17. Forma de onda resultante da soma da fundamental com a terceira harmônica.
 Fonte: ENGEL – Distorção harmônica, 2011.

Os principais equipamentos causadores das harmônicas são: reatores, retificadores, inversores de frequência, variadores de velocidade, acionamentos tiristorizados, acionamentos em corrente contínua ou alternada, conversores eletrônicos de potência, entre outros.

As características principais apresentadas num sistema elétrico, que está submetido à presença de distorção harmônica, são:

- Queda de tensão e diminuição do fator de potência na instalação elétrica;
- Aquecimento excessivo nos fios condutores e nos equipamentos;
- Ruídos em equipamentos de áudio e vídeo, tais como rádios e televisores.

Os efeitos causados pela distorção harmônica em alguns componentes e equipamentos ligados a essa rede são:

- Motores: redução da vida útil e impossibilidade de atingir potência máxima;
- Fusíveis/Disjuntores: operação falsa/errônea e componentes danificados;
- Transformadores: aumento de perdas no ferro e cobre e redução de capacidade;

- Medidores: medições errôneas e possibilidade de maiores contas;
- Telefones, rádios e televisores: interferências e ruídos;
- Acionamentos / Fontes: operações errôneas devido a múltiplas passagens por zero e falha na comutação de circuitos.

Segundo a publicação *Power Electronics Handbook*, de M. H. Rashid, uma forma de mensurar o grau de distorção harmônica é mediante o cálculo da Distorção Harmônica Total (DHT), definida como:

$$DHT = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (2.9)$$

Os subscritos (1, 2, ..., n) indicam a ordem da harmônica e as incógnitas V_i representam os valores de tensão de pico para cada harmônica, sendo V_1 a tensão de pico nominal.

Distorções harmônicas causam muitos prejuízos a plantas industriais como perda de produtividade e de vendas devido a paradas de produção causadas por inesperadas falhas em motores, acionamentos, fontes ou simplesmente "repicar" de disjuntores.

No Brasil, ainda não existe legislação para regulamentar os limites das distorções harmônicas nas instalações elétricas.

2.3.3 RESISTÊNCIA, PRESENÇA DE PRODUTOS TÓXICOS E EMISSÃO DE CO₂

Uma característica também importante com relação à produção de lixo e degradação do meio ambiente é a resistência física das lâmpadas, pois quando construídas com materiais resistentes ou que sua estrutura seja de tal forma resistente a pancadas, vibrações e intempéries durarão mais tempo e conseqüentemente menor quantidade de lixo é emitido na natureza. Além disso, uma lâmpada que dura mais implicará em economia na manutenção.

O mercúrio tem uma grande capacidade de se acumular nos organismos vivos ao longo da cadeia alimentar, processo esse conhecido como biomagnificação. Sua toxicidade já é conhecida de longa data, sendo que não se conhece qualquer função do mercúrio que seja essencial ao organismo humano. O acúmulo do mercúrio, em especial do metilmercúrio em peixes de águas contaminadas, pode resultar em risco para o homem, além dos pássaros e mamíferos que se alimentam dos peixes.

A emissão de dióxido de carbono (CO₂) é o principal causador do efeito estufa na atmosfera. Usar lâmpadas que sejam mais eficientes e que emitam menos calor colaborará para a redução da emissão desse gás na atmosfera.

2.4 CARACTERÍSTICAS DAS LÂMPADAS ATUAIS

Tabela 2. Características das lâmpadas atuais.

| TIPO DA LÂMPADA | Incandescente | Halógena | Fluorescente Tubular | Fluorescente Compacta |
|------------------------|--|--|--|--|
| CARACTERÍSTICA |  |  |  |  |
| Eficiência Efetiva | | | | |
| Eficiência Fotópica | 7 a 16 lm/W | 12 a 25 lm/W | 50 a 80 lm/W | 40 a 70 lm/W |
| Potências Usuais | 15 a 1500 W | 20 a 1000 W | 8 a 110 W | 3 a 85 W |
| Temperatura de Cor | 2300 a 2700 K | 2700 a 4000 K | 4000 a 6500 K | 2700 a 6500 K |
| IRC | 100 % | 100 % | 70 a 90 % | 75 a 90 % |
| Vida Útil | 600 a 1000 h | 2000 a 3000 h | 7000 a 10000 h | 6500 a 9500 h |
| Fator de Potência | ~1 | ~1 | 0,5 a 0,6 e até 0,95 | 0,5 a 0,6 e até 0,95 |
| Aplicações | Residencial, comercial e de destaque. | Residencial, comercial e de destaque. | Residencial, comercial e repartições públicas. | Residencial, comercial e repartições públicas. |
| TIPO DA LÂMPADA | Vapor de Mercúrio | Vapor de Sódio | Vapor Metálico | Mista |
| CARACTERÍSTICA |  |  |  |  |
| Eficiência Efetiva | | | | |
| Eficiência Fotópica | 45 a 55 lm/W | 80 a 125 lm/W | 65 a 95 lm/W | 20 a 28 lm/W |
| Potências Usuais | 80 a 1000 W | 70 a 1000 W | 70 a 2000 W | 160 a 500 W |
| Temperatura de Cor | 3900 a 4300 K | 1900 a 2000 K | 3000 a 6000 K | 3500 a 4000 K |
| IRC | 40 a 50 % | 20 a 40 % | 65 a 85 % | 50 a 70 % |
| Vida Útil | 14000 a 18000 h | 16000 a 24000 h | 7000 a 13000 h | 6000 a 9000 h |
| Fator de Potência | 0,5 a 0,6 e até 0,97 | 0,5 a 0,6 e até 0,95 | 0,5 a 0,6 e até 0,95 | 0,9 a 0,95 |
| Aplicações | Iluminação Pública, galpões e fábricas. | Iluminação Pública, galpões e fábricas. | Iluminação Pública, fábricas e estádios. | Áreas residencial, comercial e pública. |

3 A INOVADORA ILUMINAÇÃO A LED

Neste capítulo será apresentado o LED (Diodo Emissor de Luz) que é um dos objetivos gerais desse trabalho. Mais precisamente, tomar conhecimento do LED através de sua história, estrutura e funcionamento; depois será visto os diferentes tipos de lâmpadas LED fabricadas para substituir qualquer tipo de lâmpada atualmente utilizada.

3.1 O LED

Nas três subseções seguintes será conhecido o LED, através de sua história, estrutura e funcionamento.

3.1.1 HISTÓRIA

Quando o engenheiro Nick Holonyak Jr., da General Electric (GE), produziu o primeiro LED da história, em 1962, eles só eram capazes de emitir luz vermelha. LEDs verdes e amarelos não demoraram muito a aparecer, mas a tecnologia ficou limitada a esses três tons durante décadas, sendo os mesmo utilizados apenas em produtos de microeletrônica como sinalizador de aviso luminoso.

A revolução dos LEDs só começaria mesmo em 1993, quando o pesquisador japonês Shuji Nakamura conseguiu produzir o primeiro LED azul comercialmente viável. Essa tecnologia resultou ainda nos LEDs brancos que revolucionaram o mercado dos LEDs.

Hoje podem ser encontrados em diferentes formatos e tamanhos, sendo aplicados em alguns modelos de semáforos, iluminação automotiva, placares eletrônicos, televisores, lâmpadas e luminárias, dentre outras.

3.1.2 ESTRUTURA

Atualmente existem vários formatos de LED, no entanto, suas estruturas internas são similares ao LED mais comum. Na Figura 18 pode ser observada a estrutura do LED com relação aos materiais utilizados em sua confecção. Logo após a figura é explicado com detalhes o uso de cada um desses materiais.

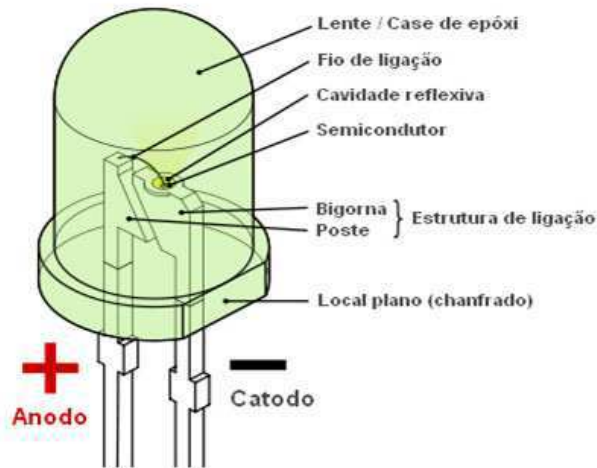


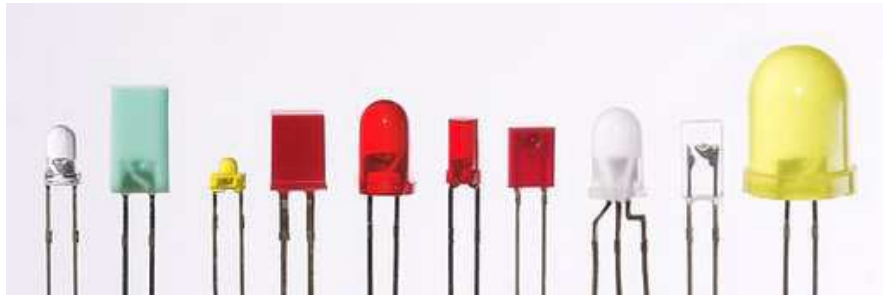
Figura 18. Estrutura de um LED.

Fonte: BootBlock Bios Info – Diodos emissores de luz, Brasil, 2011.

Materiais utilizados:

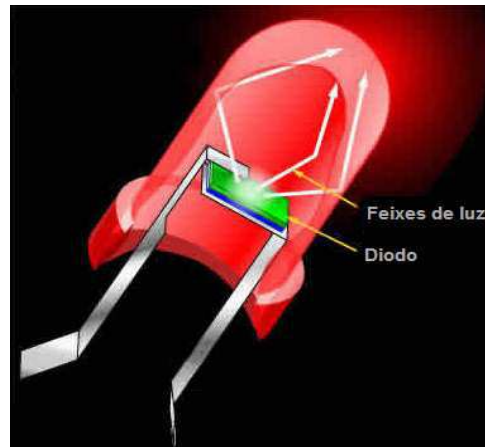
- Lente / case de epóxi: é uma cobertura que serve para a proteção e fixação do semicondutor além de promover a propagação da luz de uma forma específica que depende do seu formato. A luz do LED não vem do plástico que o envolve, mas sim da pastilha do material semicondutor usado. Se um LED usa plástico vermelho, é porque este plástico tem a mesma cor da luz emitida (para facilitar a identificação quando desligado) e não é ele que determina a cor. LEDs com plástico transparente ou branco podem emitir luz de diversas cores. A parte chanfrada dessa estrutura plástica indica o lado do catodo (-);
- Fio de ligação: o mesmo serve apenas para fazer a ligação entre o anodo (poste) e uma extremidade do semicondutor;
- Cavidade refletiva: além de servir como cavidade para comportar o semicondutor a mesma também tem revestimento refletivo para concentrar a luz emitida em certa direção;
- Semicondutor: é o material responsável pela emissão de luz que dependendo do qual seja, emitirá uma luz de cor específica;
- Estrutura de ligação: composta por dois condutores chamados de poste e bigorna devido ao seu formato; servem para fazer a ligação com o meio externo. O poste é o anodo (+) e normalmente tem o terminal maior que o lado da bigorna, que é o catodo (-).
- Local plano (chanfrado): facilita a identificação do terminal do catodo.

Alguns formatos de LEDs são mostrados na Figura 19 a seguir.



*Figura 19. Formatos de LEDs.
Fonte: Wikipédia – Light Emitting Diode, 2011.*

De uma forma geral a estrutura do LED é construída de tal maneira que o feixe de luz seja direcionado de uma forma adequada. No caso de LED comum, por exemplo, a maior parte da luz ricocheteia pelas laterais do bulbo, viajando na direção da ponta arredondada.



*Figura 20. Feixes no interior de um LED.
Fonte: BootBlock Bios Info – Diodos emissores de luz, Brasil, 2011.*

3.1.3 FUNCIONAMENTO

O principal componente para o funcionamento do LED é o semicondutor que é um material com capacidade variável de conduzir corrente elétrica. A maioria dos semicondutores é feito de um “condutor pobre” que teve impurezas (átomos de outro material) adicionadas a ele. O processo de adição de impurezas é chamado de dopagem.

No silício e no germânio, que são os elementos básicos dos diodos e transistores, entre outros componentes eletrônicos, a maior parte da energia é liberada na forma de calor, sendo insignificante a luz emitida devido à opacidade do material. Os componentes que trabalham com maior capacidade de corrente chegam a precisar de irradiadores (dissipadores) de calor.

Já em outros materiais, como o arsenieto de gálio (GaAs) ou o fosfeto de gálio (GaP), o número de fótons emitido é suficiente para constituir fontes de luz bastante eficientes.

A forma simplificada de uma junção P-N de um LED demonstra seu processo de eletroluminescência. O material dopante de uma área do semicondutor contém átomos com um elétron a menos na banda de valência (Índio ou Alumínio, por exemplo) em relação ao material semicondutor. Na ligação, os íons desse material dopante (íons "aceitadores") removem elétrons de valência do semicondutor, deixando "lacunas" (ou buracos), portanto, o semicondutor torna-se do tipo P. Na outra área do semicondutor, o material dopante contém átomos com um elétron a mais (Fósforo e Nitrogênio, por exemplo) do que o semicondutor puro em sua faixa de valência. Portanto, na ligação esse elétron fica disponível sob a forma de elétron livre, formando o semicondutor do tipo N.

Para que haja uma corrente através do semicondutor deve-se polarizá-lo diretamente, ou seja, o anodo (lado do material do Tipo-P) deve ser ligado ao pólo positivo da fonte de alimentação, enquanto o catodo (lado do material do Tipo-N) deve ser ligado ao pólo negativo (ver Figura 21). A interação entre elétrons e buracos nesta configuração, que terá uma explicação detalhada posteriormente, gera a luz.

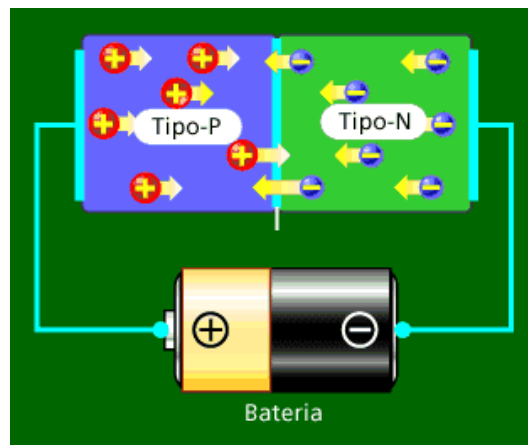


Figura 21. Ligação de um diodo a uma fonte de alimentação.
Fonte: Boot Block Bios Info – Diodos emissores de luz, Brasil, 2011.

A luz é uma forma de energia que pode ser liberada por um átomo. Ela é feita de uma grande quantidade de pequenos pacotes tipo partículas que têm energia e momento, mas nenhuma massa. Essas partículas, chamadas de fótons, são as unidades básicas da luz.

Os fótons são liberados como um resultado do movimento de elétrons. Em um átomo, os elétrons se movem em orbitais ao redor do núcleo. Elétrons em orbitais diferentes têm quantidades diferentes de energia. De maneira geral, os elétrons com mais energia se movem em orbitais mais distantes do núcleo.

Para um elétron pular de um orbital mais baixo para um mais alto, algo deve aumentar seu nível de energia. No LED isso é feito aplicando uma diferença de potencial entre os seus

terminais. Inversamente, um elétron libera energia quando “cai” de um orbital mais alto para um mais baixo. Essa energia é liberada na forma de um fóton (luz).



Figura 22. Órbitas de um elétron.

Fonte: HowStuffWorks – Como os Átomos Emitem Luz, Brasil, 2001.

Quanto maior for a queda orbital maior será a frequência da radiação emitida, ou seja, inicia na infravermelha, passa pela luz visível (vermelha, amarela, verde, azul e violeta, por exemplo) e chega a ultravioleta.

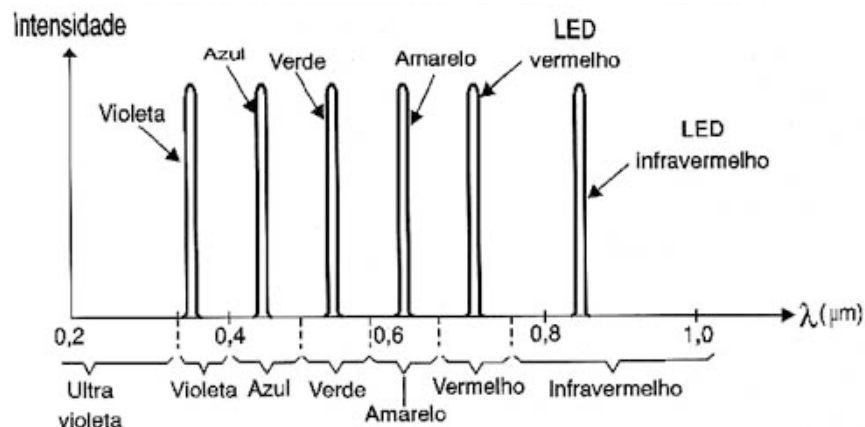


Figura 23. Relação entre frequências (ou comprimentos de ondas) e cores.

Fonte: Instituto Newton Braga – A Cor dos LEDs, 2011.

Como anteriormente dito, a cor da luz emitida pelo LED é determinada pelo material semicondutor e não pela cor da cápsula plástica que o envolve. Além disso, cada cor exige uma tensão mínima que deve ser imposta aos terminais do LED para que o mesmo funcione. A seguir, há uma relação de algumas cores de LED e os materiais semicondutores e dopantes utilizados para obtê-los juntamente com as tensões de funcionamento.

- Vermelho: Arsenieto de Gálio + Alumínio (AlGaAs). 1,6 V;
- Amarelo: Fosfoarsenieto de Gálio (GaAsP). 1,8 V;

- Verde: Fosfeto de Gálio + Nitrogênio (PGaN) ou (InGaN). 2,1 V;
- Azul: Carbeto de Silício (SiC) ou Nitreto de Gálio + Índio (InGaN). 2,7 V;
- Violeta: Nitreto de Silício (SiN). 2,8 V.

Além dos LEDs comuns de uma cor e de dois terminais, pode-se encontrar também:

- Bicolores: São compostos por dois LEDs em antiparalelo;
- Tricolores: São compostos por dois LEDs ligados com cátodo comum;
- Intermitentes: Usam um circuito integrado interno que provoca a intermitência;

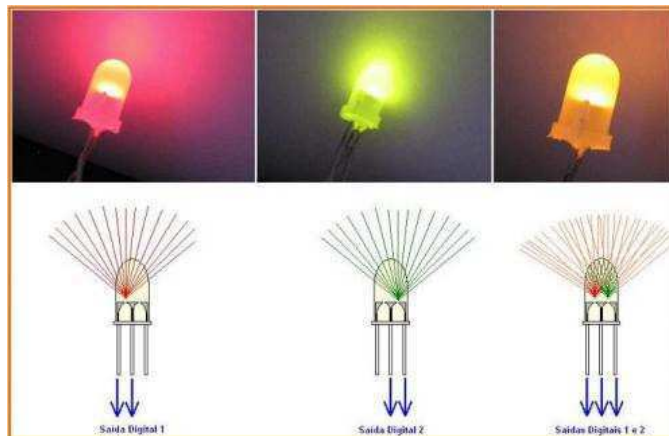


Figura 24. Emissões de luz em um LED tricolor.

Fonte: FSBUS Blog – Mini manual das placas, Antonio Augusto, 2009.

O LED branco lançado em 1995 passou por uma importante transição com relação a sua matéria prima. Inicialmente era construído com cristais de safira que sintetizados artificialmente era um procedimento caro que elevava o preço para LEDs de altas potências, mas com a descoberta que o mesmo podia ser obtido por camadas de fósforo amarelo sobreposto ao semicondutor de nitreto de gálio (dopado de índio ou alumínio) (também utilizado na fabricação do LED azul), o mesmo pôde atingir preços bem mais acessíveis e consequentemente serem mais comercializados e difundidos em aplicações.

A luz branca de um LED pode ser obtida de duas formas:

- Por camada fosfórica em LED azul: A camada de fósforo converte em luz amarelo claro, parte da luz azul do LED. A luz azul remanescente, quando misturado com esse amarelo claro, resulta em luz branca;
- Por LED RGB: Um LED composto por um anodo comum e três catodos com três semicondutores, um responsável pela cor vermelha (R de red), outro pela cor verde (G de green) e o terceiro pela cor azul (B de blue). Quando todos são ligados com as tensões adequadas se obtém a cor branca;

Na Figura 25, a seguir, encontra-se os círculos das cores primárias da luz para melhor entender os fenômenos supracitados.

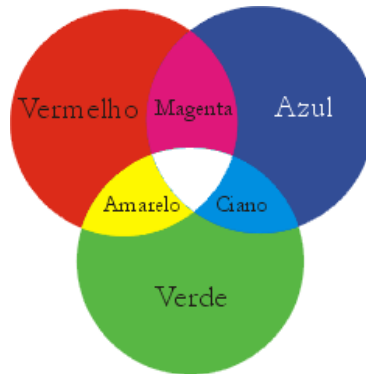


Figura 25. As cores primárias da luz e suas combinações.
Fonte: Só Biologia – Cores primárias de luz, 2011.

Os dois tipos de LED branco podem ser vistos na Figura 26. Em “A” o composto por camada fosfórica e em “B” o LED RGB.

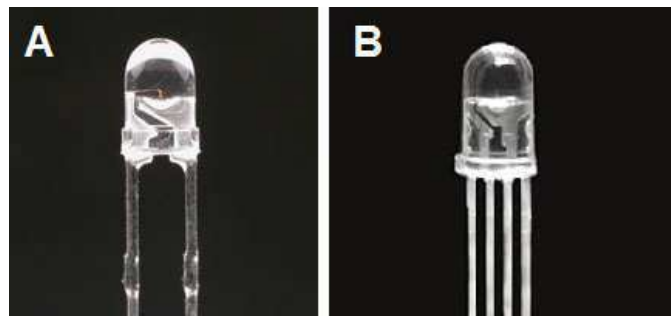


Figura 26. LEDs para a emissão de luz branca.
Fonte: NKC Electronics – Catálogo, 2011.

Uma lâmpada normalmente é caracterizada por seu fluxo luminoso (em lúmens), no entanto o LED é comumente caracterizado pela intensidade luminosa (em milicandelas). Isso ocorre porque a candela é relacionada a um ângulo sólido (em esferorradianos) e como o LED funciona como um *spot* emitindo um “cone de luz”, a mesma se torna uma medida adequada. Porém, o valor do ângulo de fecho que varia com a lente de epóxi deve ser informado.

Na Tabela 3 há algumas características dos LEDs mais comuns que não são utilizados em lâmpadas devido aos baixos valores de fluxos luminosos e eficiências luminosas.

Tabela 3. Algumas características de LEDs comuns.

| Tipo do LED | I (milicandela) | θ (graus) | ϕ (lúmens) |
|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Vermelho de 5 mm | 400 | 12 | 0,014 |
| Vermelho de 5 mm | 16 | 60 | 0,014 |
| Branco de 5 mm | 1800 | 15 | 1 |

3.2 LÂMPADAS LED

As lâmpadas LED são construídas a partir da associação de vários LEDs em paralelo (ou série e paralelo) firmados em uma estrutura normalmente plástica e tem seu formato variado de acordo com a necessidade. Tais lâmpadas, também têm diferentes bases (ver em anexo) como o E27, comumente encontrado em residências. Uma lâmpada LED pode não ter base, daí chama-se luminária LED, sendo essas normalmente utilizadas para a iluminação pública ou de grandes áreas, mas ambas podem ser chamadas de lâmpada, para simplificar.

Os LEDs utilizados nas lâmpadas são conhecidos como super LEDs e podem ser divididos em dois tipos: o *StrawHat* e o SMD. A seguir, será detalhado cada um deles com suas características estruturais, elétricas e fotométricas; depois serão apresentados alguns modelos de lâmpadas construídas a partir dos dois tipos de LED supracitados.

3.2.1 LÂMPADA LED STRAWHAT

A. Apresentação

O LED StrawHat do inglês “chapéu de palha” é assim chamado devido a sua aparência proporcionada pela camada fosfórica colocada em cima do semicondutor cobrindo a cavidade refletiva. O LED de 5 mm é o mais utilizado na fabricação de lâmpadas. A lente de epóxi vai definir o ângulo de fecho e consequentemente a intensidade luminosa do LED. O valor do fluxo luminoso pode ser obtido a partir das equações 2.1 e 2.7 desse trabalho.



Figura 27. LED StrawHat.
Fonte: Vivalux – Products Catalog, 2011.

B. Características Elétricas e Fotométricas

Individualmente os LEDs necessitam de uma tensão específica para o funcionamento, ao mesmo tempo em que tensões reversas acima do limite podem danificar o mesmo. Na Tabela 4 estão as características elétricas do LED de 5 mm mais utilizados em lâmpadas.

Tabela 4. Características elétricas e fotométricas do LED StrawHat de 5 mm.

| Característica | Valor |
|-----------------------|-----------------|
| Tensão Direta | 2,8 a 3,6 V |
| Corrente Mínima | 20 mA |
| Corrente Usual | 20 a 25 mA |
| Potência | 56 a 72 mW |
| Tensão Reversa Máxima | 5 V |
| Intensidade Luminosa | 1200 a 1700 mcd |
| Ângulo de Facho | 120° |
| Fluxo Luminoso | 4 a 6 lm |
| Eficiência Luminosa | 75 a 90 lm/W |
| Temperatura de Cor | 2700 a 9000 K |
| IRC | 70 a 85 % |
| Vida Útil | 50000 a 80000 h |
| Fator de Potência | 0,92 a 0,97 |

C. Modelos de Lâmpadas LED StrawHat

Vários são os formatos das lâmpadas de LED feitas de modo a se adequar as lâmpadas antes utilizadas ou a um ambiente específico. Nas figuras que seguem pode-se ver algumas dessas lâmpadas que foram confeccionadas com o LED StrawHat.



Figura 28. Lâmpadas LED StrawHat automotivas.
Fonte: FGA Automotive – Catálogo de lâmpadas automotivas, 2011.



Figura 29. Lâmpada e luminária LED StrawHat para iluminação pública.
Fonte: Elétrica.Info – Copel testa LEDs em iluminação pública, 2010.



Figura 30. Lâmpadas LED StrawHat que imitam o formato de lâmpadas comuns.
Fonte: Luz&etc – Catálogo de lâmpadas LED, 2011.



Figura 31. Lâmpada LED StrawHat 166/5 (CornBulb) que imita o formato de LFC.
Fonte: Ebay – Vendedor, 2011.

Essa última lâmpada foi adquirida através do site Ebay. Os valores teóricos oferecidos pelo vendedor não são muito confiáveis porque para essa mesma lâmpada, tais valores variam muito entre vendedores. Desta forma, os valores apresentados na Tabela 5 são uma mistura entre valores médios e valores de moda obtidos através de 100 amostras.

Tabela 5. Algumas características da lâmpada LED StrawHat 166/5 (CornBulb).

| Característica | Valor | Característica | Valor |
|-----------------------|----------|--------------------|-----------|
| Potência | 9 W | Fator de Potência | > 0,90 |
| Tensão de Alimentação | 220 V/AC | Vida Útil | 60000 h |
| Fluxo Luminoso | 675 lm | Base (casquilho) | E27 |
| Eficiência Luminosa T | 75 lm/W | Quantidade de LEDs | 166 |
| Ângulo de Facho | 360° | Dimensões | 12 x 5 cm |
| Temperatura de Cor | 5700 K | Peso | 80 g |
| IRC | > 80 % | Preço | US\$ 8 |

D. Aplicações e Peculiaridades

As lâmpadas LED StrawHat, como foram destacadas anteriormente, são bastante versáteis com relação ao seu formato, ângulo de fecho e temperatura de cor. Dessa forma, podem ser utilizadas em qualquer ambiente como o residencial, comercial e público em geral.

Como peculiaridades têm:

- Alta eficiência luminosa;
- Grande vida útil;
- Substituição direta à incandescente ou outra qualquer;
- Várias temperaturas de cor;
- Alto fator de potência;
- Baixa emissão de calor;
- Alto custo;
- Quantidade alta de LEDs para atingir maiores fluxos luminosos;
- Potências usuais com base E27 entre 1,5 W (28 LEDs) e 18 W (330 LEDs).

3.2.2 LÂMPADA LED SMD

A. Apresentação

O LED SMD do inglês “Surface Mounted Diode” (Diodo Montado em Superfície) é mais comumente chamado de LED de superfície. Esse LED tem por objetivo reduzir o espaço ocupado por um LED convencional (StrawHat) e tem como característica a possibilidade de atingir uma maior potência e conseqüentemente um maior fluxo luminoso. Os LEDs SMD mais utilizados em lâmpadas são os de modelo 5050 (5 x 5 mm), o 5630 (5,6 x 3 mm) e o 3528 (3,5 x 2,8 mm). Pode ser formado por um chip único ou chip múltiplo. Também possui uma camada fosfórica misturada a resina ou silicone para obtermos a luz branca.



Figura 32. LED SMD modelo 5050 (chip múltiplo).
Fonte: Shoptronica – Products Catalog, 2011.

B. Características Elétricas e Fotométricas

Da mesma forma que os LED StrawHat, os LED SMD necessitam de uma tensão específica para o funcionamento ao mesmo tempo em que tensões reversas acima do limite podem danificar o mesmo. Na Tabela 6 estão as características elétricas e fotométricas do LED SMD 5050, que é um dos mais utilizados em lâmpadas.

Tabela 6. Características elétricas e fotométricas do LED SMD 5050.

| Característica | Valor |
|-----------------------|-----------------|
| Tensão Direta | 3,0 a 3,6 V |
| Corrente Mínima | 50 mA |
| Corrente Usual | 50 a 65 mA |
| Potência | 150 a 250 mW |
| Tensão Reversa Máxima | 4 V |
| Intensidade Luminosa | 3500 a 6000 mcd |
| Ângulo de Facho | 120° |
| Fluxo Luminoso | 12 a 18 lm |
| Eficiência Luminosa | 80 a 100 lm/W |
| Temperatura de Cor | 2700 a 9000 K |
| IRC | 70 a 85 % |
| Vida Útil | 50000 a 80000 h |
| Fator de Potência | 0,92 a 0,97 |

C. Modelos de Lâmpadas LED SMD

Como dito anteriormente, vários são os formatos das lâmpadas de LED feitas de modo a se adequar as lâmpadas antes usadas ou a um ambiente específico. Nas figuras que seguem pode-se ver algumas dessas lâmpadas que foram confeccionadas com o LED SMD.



*Figura 33. Lâmpadas LED SMD automotivas.
Fonte: 4 Import – Catálogo de lâmpadas automotivas, 2011.*



Figura 34. Lâmpada, luminária, refletor e módulo LED SMD para iluminação pública.
 Fonte: LIL – Produtos Catálogo - Luminárias para iluminação pública, 2011.



Figura 35. Lâmpadas LED SMD que imitam o formato de lâmpadas comuns.
 Fonte: Leto Lighting – Product List, 2011.



Figura 36. Lâmpada LED SMD 60/5050 (CornBulb) que imita o formato de LFC.
 Fonte: Ebay – Vendedor, 2011.

Essa última lâmpada foi adquirida através do site Ebay. Os valores teóricos oferecidos pelo vendedor não são muito confiáveis porque para essa mesma lâmpada, tais valores variam muito entre vendedores. Desta forma, os valores apresentados na Tabela 7 são uma mistura entre valores médios e valores de moda obtidos através de 100 amostras.

Tabela 7. Algumas características da lâmpada LED SMD 60/5050 (CornBulb).

| Característica | Valor | Característica | Valor |
|-----------------------|----------|--------------------|-----------|
| Potência | 11 W | Fator de Potência | > 0,90 |
| Tensão de Alimentação | 220 V/AC | Vida Útil | 60000 h |
| Fluxo Luminoso | 880 lm | Base (casquilho) | E27 |
| Eficiência Luminosa T | 80 lm/W | Quantidade de LEDs | 60 |
| Ângulo de Facho | 360° | Dimensões | 12 x 5 cm |
| Temperatura de Cor | 5700 K | Peso | 70 g |
| IRC | > 80 % | Preço | US\$ 13 |

D. Aplicações e Peculiaridades

As lâmpadas LED SMD, da mesma forma que as StrawHat, são bastante versáteis com relação ao seu formato, ângulo de fecho e temperatura de cor. Dessa forma, podem ser utilizadas em qualquer ambiente como o residencial, comercial e público em geral.

Como peculiaridades têm:

- Alta eficiência luminosa;
- Grande vida útil;
- Substituição direta à incandescente ou outra qualquer;
- Várias temperaturas de cor;
- Alto fator de potência;
- Baixa emissão de calor;
- Atinge maiores fluxos luminosos com menos LEDs que a lâmpada StrawHat;
- Alto custo (maior que as feitas de StrawHat);
- Quantidade alta de LEDs para atingir maiores fluxos luminosos;
- Potências usuais com base E27 entre 1,5 W (7 LEDs) e 16 W (86 LEDs).

3.2.3 DRIVE PARA LÂMPADAS LED / AC

Sabe-se que o LED funciona em corrente contínua (DC), daí surge a necessidade de um dispositivo para as lâmpadas que serão ligadas a nossa rede elétrica em que a corrente é

alternada (AC), além disso, o nível de tensão deve ser reduzido para poder ligar os LEDs em paralelo ou série/paralelo. Esse dispositivo se chama Drive LED, que nada mais é que um retificador de onda senoidal encontrado em muitos equipamentos eletrônicos. Por conter indutores e capacitores o drive é responsável por gerar uma pequena distorção harmônica e uma diminuição no fator de potência. A seguir, tem-se um circuito elétrico de um drive.

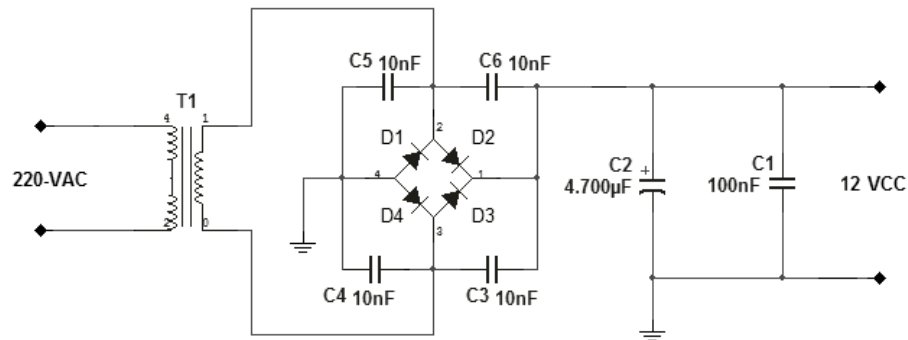


Figura 37. Circuito elétrico de um drive utilizado em lâmpadas LED.
Fonte: Xtronic – Power Supply, 2010.

O drive pode ser interno ou externo a lâmpada ou módulo LED. Para lâmpadas de uso residencial ou luminárias normalmente o drive é interno, enquanto para os refletores com módulos LED o drive é externo. A seguir, têm-se imagens de drives internos e externos.

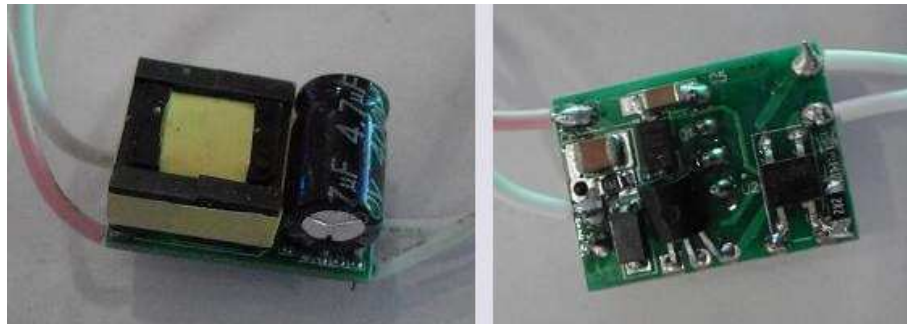


Figura 38. Drive interno de uma lâmpada LED.
Fonte: Tradeage – 3W Lamp Light LED Drive, 2011.

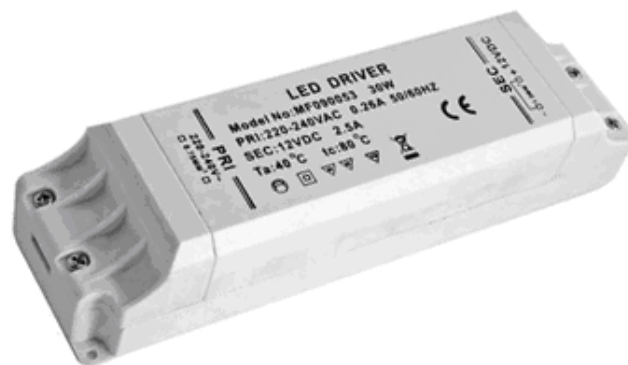


Figura 39. Drive externo para refletores com módulo LED.
Fonte: Aliexpress – LED Transformerdr Drive, 2011.

4 A REVOLUÇÃO NO CONCEITO DE ILUMINAÇÃO

Este capítulo trata da revolução no conceito da iluminação, mas precisamente do novo conceito de eficiência luminosa de uma fonte de luz. Nele encontram-se conceitos importantes da visão humana, a definição e explicação da eficiência efetiva e, por fim, uma aplicação real.

4.1 CONCEITOS DE VISÃO FOTÓPICA, ESCOTÓPICA E MESÓPICA

O olho humano é um sistema de percepção de luz formado por um agente fotorreceptor (retina) e um obturador (pupila).

A retina é composta de dois tipos de fotorreceptores chamados de cones, que ficam em maior parte na fóvea e mácula e os bastonetes, que ficam na mácula e fora dela.

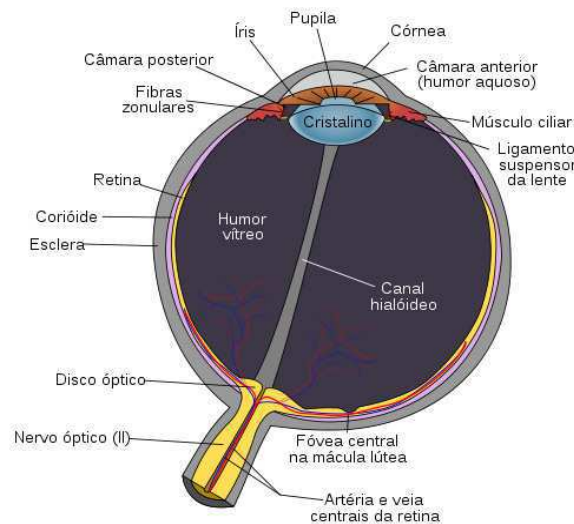


Figura 40. Componentes do olho humano.
Fonte: Wikipédia – Olho Humano, 2011.

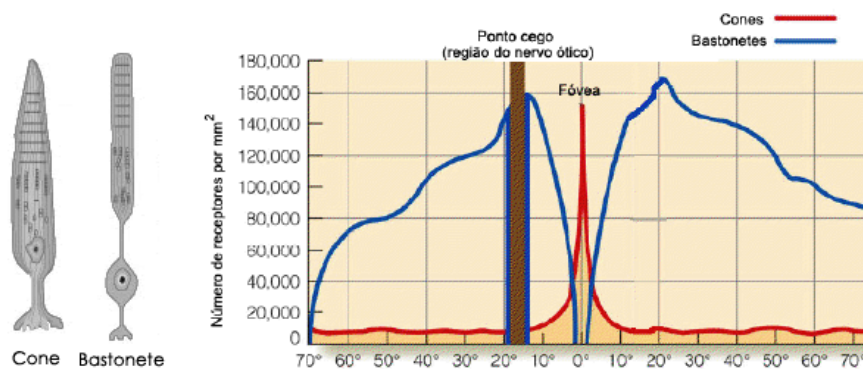


Figura 41. Concentração de cones e bastonetes na retina.
Fonte: João Barcelos – Combinação de Cores para o Artista, 2011.

Existem três tipos de cones que são os azuis, verdes e vermelhos. Os nomes se dão devido à maior sensibilidade de tais cones nos comprimentos de onda correspondentes as cores de cada um. Na Figura 42 pode-se ver um gráfico com os espectros de luz correspondente a cada tipo de cone.

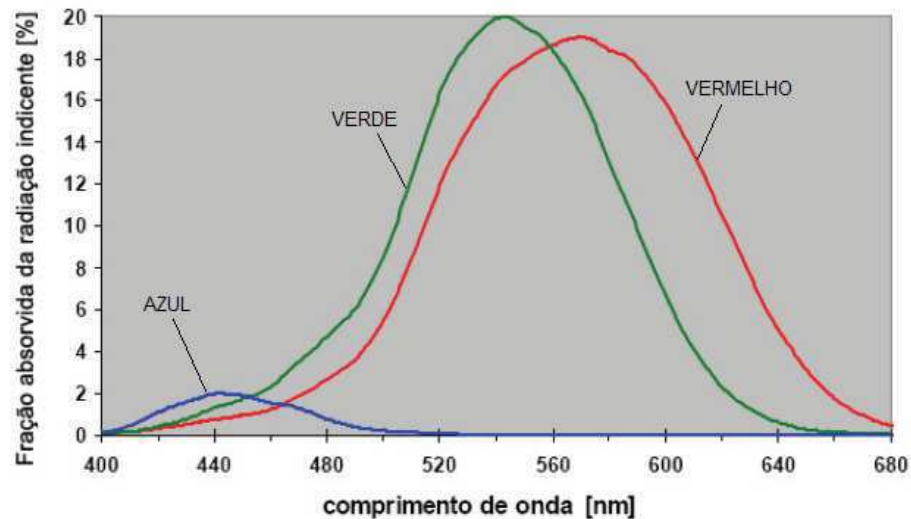


Figura 42. Espectros de luz dos três tipos de cones.
Fonte: João Barcelos – *Combinação de Cores para o Artista*, 2011.

A resultante dessas três curvas nos dá a chamada visão fotópica, cujo espectro com pico em 555 nm (comprimento de onda correspondente a cor verde amarelada) é mostrado na Figura 43 a seguir. A maior eficiência alcançável nessa região é de 683 lm/W.

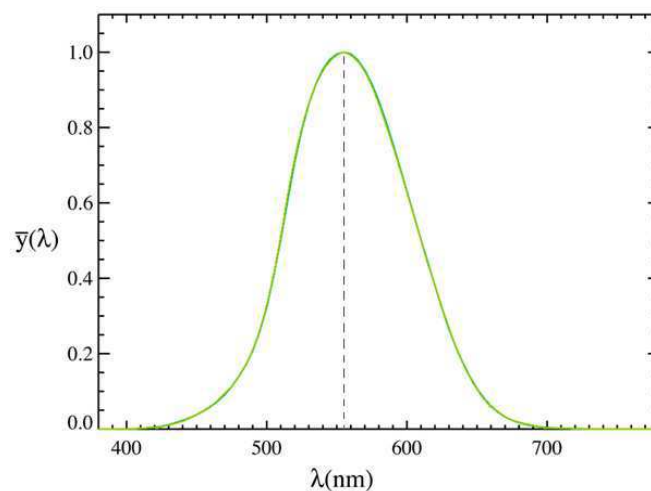


Figura 43. Espectro de luz da visão fotópica.
Fonte: Montagem por Wikipédia – *Visão Fotópica*, 2011.

Já os bastonetes, são responsáveis pela chamada visão escotópica, cujo espectro com pico em 507 nm (comprimento de onda correspondente a cor verde azulada) é mostrado na Figura 44 a seguir. A maior eficiência alcançável nessa região é de 1.700 lm/W.

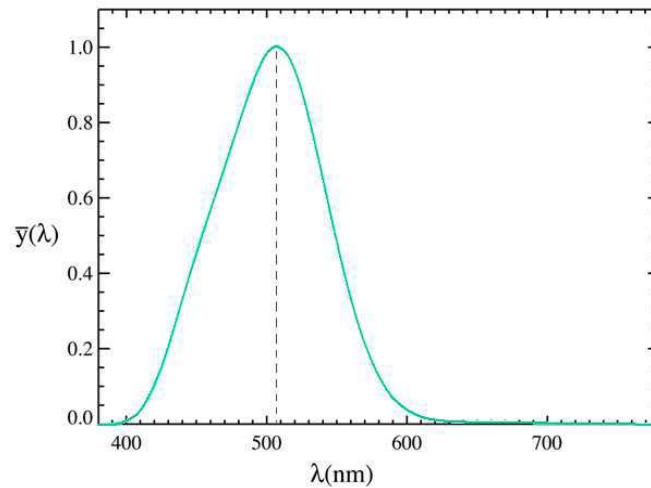


Figura 44. Espectro de luz da visão escotópica.
 Fonte: Montagem por Wikipédia – Visão Escotópica, 2011.

A visão mesópica é a designação dada a combinação dos espectros de luz das visões fotópica e escotópica. O resultado disso pode ser visto na Figura 45 abaixo.

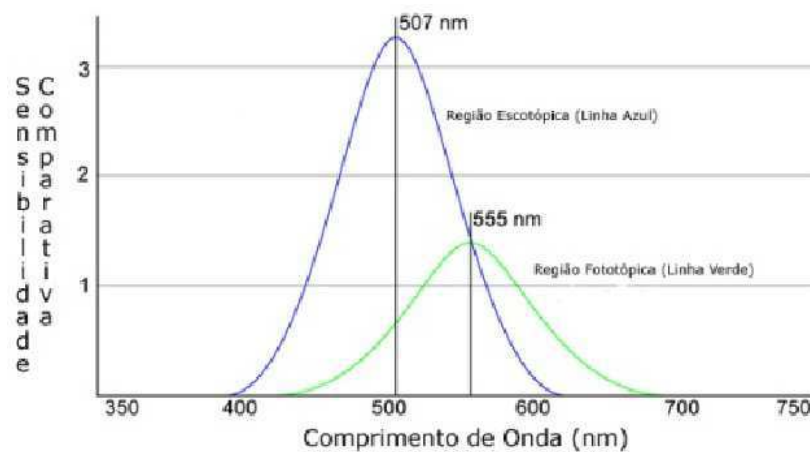


Figura 45. Espectros de luz da visão mesópica.
 Fonte: Leddepot – LED ou Vapor de Sódio, 2011.

4.2 RAZÃO S/P E EFICIÊNCIA LUMINOSA EFETIVA

Há pouco tempo se considerava apenas o espectro da visão fotótípica (ver Figura 43) para o cálculo do fluxo luminoso emitido por uma fonte luminosa e isso se deve aos estudos realizados pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE) em 1924, no entanto, essa ideia vem sendo mudada devido, também, aos estudos publicados pelo jornal IES nos últimos anos.

Foram 13 anos desde os primeiros estudos que demonstram atividade significativa dos bastonetes em típicos níveis de iluminação em ambiente de trabalho, juntamente com argumentos de consequências significativas na prática de iluminação.

Dr. Sam Berman, físico e cientista emérito e Dr. Don Jewett, neurofisiologista e professor emérito fizeram um estudo sobre o comportamento dos bastonetes em condições de iluminação típica em ambiente de trabalho no Laboratório Nacional de Lawrence Berkeley (laboratório do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América – DOE, responsável pela política de energia e segurança nuclear que leva a cabo a investigação científica não-secreta, sendo gerida e operada pela Universidade da Califórnia na cidade de Berkeley).

Primeiramente eles mostraram que os bastonetes controlavam a abertura e o fechamento da pupila do olho e isso se deu tomando diferentes níveis de iluminação para uma mesma fonte luminosa. Posteriormente, demonstraram que o tamanho da pupila também variava com o espectro da fonte luminosa, ou seja, fontes luminosas diferentes, mesmo com fluxos luminosos (fotópicos) iguais proporcionavam diferentes percepções de iluminação.

Desta forma, o espectro da visão humana não deveria considerar apenas a visão fotópica, mas também, a escotópica, ou seja, a influência da iluminação de um ambiente para a visão humana deveria levar em consideração a visão mesópica.

Dos dados coletados nesse experimento para diversos tipos de lâmpadas, os cientistas obtiveram os chamados “S/P ratio” ou “razão S/P” (S de scotopic e P de photopic) que determinam a partir da eficiência luminosa fotópica, determinada pelos instrumentos atualmente utilizados (ver espectro do luxímetro em anexo) ou por catálogos de fabricantes, a eficiência escotópica, como pode ser visto na equação a seguir.

$$\eta_S = \eta_P \cdot (S/P) \quad (4.1)$$

No entanto, como foi dito, a visão humana em um ambiente normal de trabalho deve levar em consideração a visão mesópica, daí uma relação entre as eficiências fotópica e escotópica foi determinada e chamada de eficiência efetiva (ou de pupila) a qual é vista a seguir. Nessa equação, o expoente 0,78 foi determinado empiricamente no experimento.

$$\eta_{EF} = \eta_P \cdot (S/P)^{0,78} \quad (4.2)$$

Ainda em 2010, o engenheiro Donald Klipstein, dono da empresa de consultoria em engenharia e design, que leva o seu nome, na cidade de Upper Darby no estado da Pensilvânia, notando uma falta de razões S/P para algumas fontes de luz como o LED e também de certas potências de outras lâmpadas, decidiu realizar um experimento em seu laboratório para determinar tais valores.

Unindo os resultados obtidos pelos engenheiros da Califórnia e o da Pensilvânia obtém-se a Tabela 8 onde se encontra as razões S/P de alguns modelos das lâmpadas citadas nesse trabalho, além das eficiências luminosas fotópica, escotópica e efetiva (ou de pupila).

Tabela 8. Razões S/P e os diferentes tipos de eficiência luminosa para as lâmpadas.

| Tipo da Lâmpada | S/P | η fotópica (lm _p /W) | η escotópica (lm _s /W) | η efetiva (lm _{EF} /W) |
|--------------------------------------|------|--------------------------------------|--|--------------------------------------|
| Incandescente – 100 W / 2700 K | 1,41 | 13,5 | 19,0 | 17,6 |
| Halógena – 50 W / 3000 K | 1,50 | 15 | 22,5 | 20,6 |
| Fluorescente Tubular – 20 W / 5000 K | 1,96 | 55 | 107,8 | 93,0 |
| LFC – Luz do dia – 20 W / 6500 K | 1,46 | 55 | 80,3 | 73,9 |
| Vapor de Mercúrio – 400 W / 3900 K | 1,09 | 55 | 60,0 | 58,8 |
| Vapor de Sódio – 400 W / 2000 K | 0,66 | 118 | 77,9 | 85,3 |
| Vapor Metálico – 400 W / 4300 K | 1,49 | 77,5 | 115,5 | 105,8 |
| Luz Mista – 500 W / 3400 K | 1,16 | 28 | 32,5 | 31,4 |
| LED – 20 W / 6000 K (com drive) | 2,05 | 80 | 164,0 | 140,0 |
| LED – 100 W / 6000 K (sem drive) | 2,05 | 90 | 184,5 | 157,5 |

Na Figura 46, a seguir, há um gráfico que contém Razões S/P para alguns modelos de lâmpadas incluindo as já mencionadas na Tabela 8.

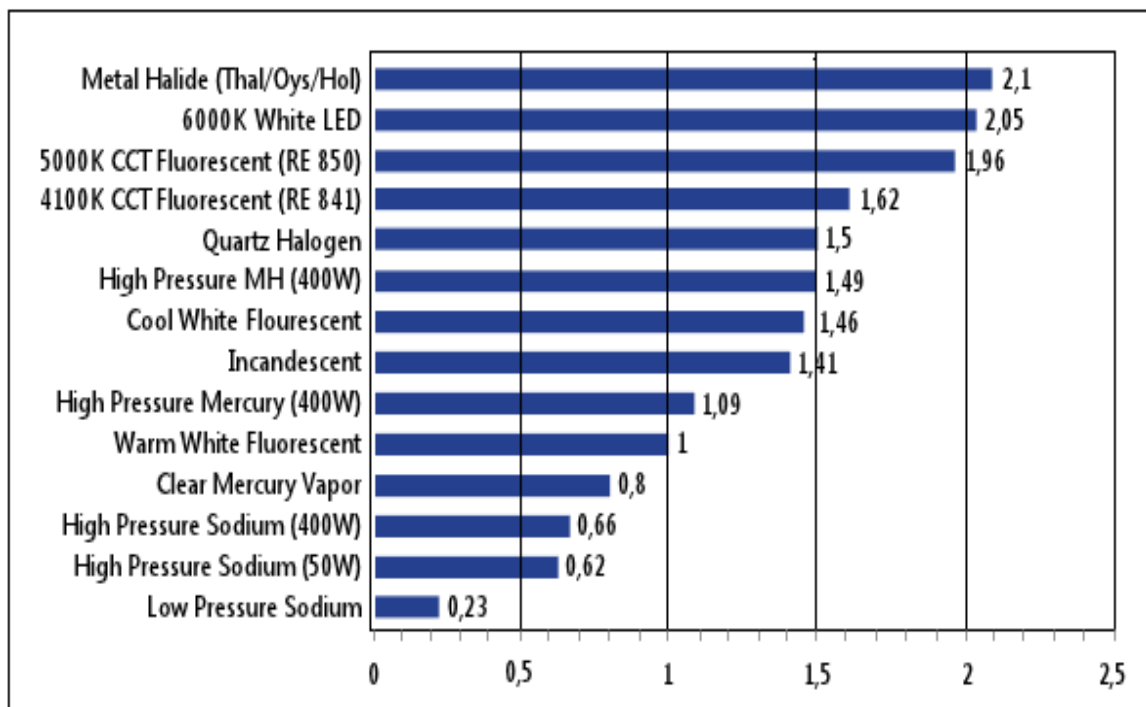


Figura 46. Razões S/P para diferentes lâmpadas.

Fonte: Lighting Design & Application / Don Klipstein – S/P Ratios, 2010.

4.3 EXEMPLIFICAÇÃO E APLICAÇÃO REAL

Para exemplificar a idéia da melhor iluminação ao se considerar a visão mesópica, faz-se uma análise dos espectros de luz das lâmpadas tipo vapor de sódio de alta pressão e de LED branco. Inicialmente observe os espectros de cada tipo de lâmpada na Figura 47.

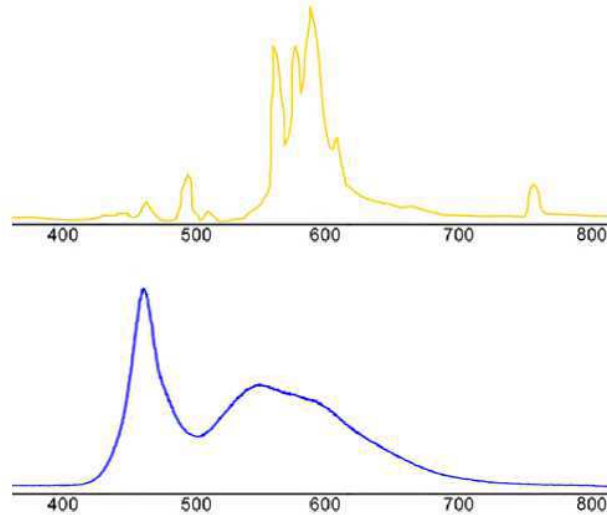


Figura 47. Espectros de luz das lâmpadas vapor de sódio e LED.
Fonte: Leddepot / Wikipédia – LED ou Vapor de Sódio / Light-Emitting Diode, 2011.

Agora sobrepondo esses espectros nos espectros da visão mesópica e destacando a área em comum entre eles, obtém-se:

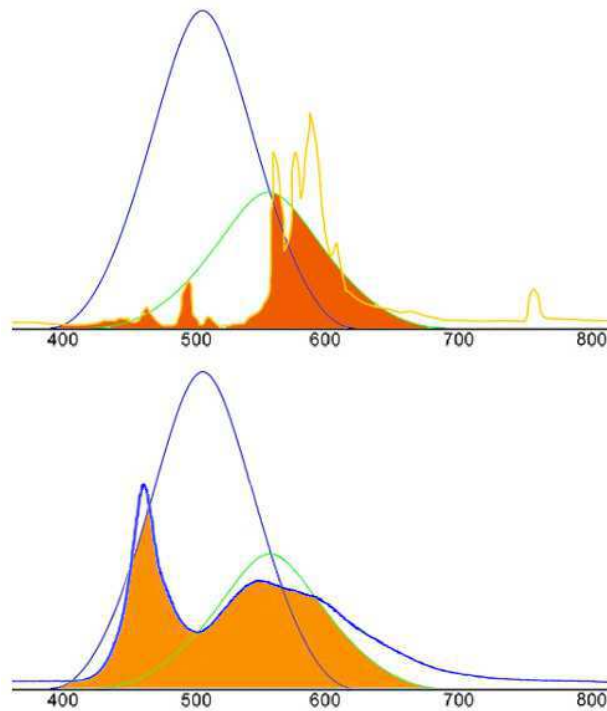


Figura 48. Espectros das lâmpadas vapor de sódio e LED juntos ao espectro mesópico.
Fonte: Leddepot / Wikipédia – LED ou Vapor de Sódio / Light-Emitting Diode, 2011.

A pesar da lâmpada vapor de sódio ter maior eficiência fotópica, devido aos picos de seu espectro luminoso estar próximos ao pico do espectro da visão fotópica, quase nada ela tem no espectro da visão escotópica, enquanto o LED tem valores significativos em ambos os espectros. De fato, a eficiência luminosa efetiva da lâmpada LED é de 157,5 lm/W enquanto da lâmpada vapor de sódio é de 85,3 lm/W.

Uma aplicação dessa teoria pode ser vista na Rua do Arouche na cidade de São Paulo. As lâmpadas de 250 W vapor de sódio foram trocadas por luminárias LED de 140 W. O resultado dessa substituição pode ser visto abaixo.



Figura 49. Antes e depois da iluminação a LED na Rua do Arouche.
Fonte: Blog Parques Sustentáveis – LED: Boa visibilidade, 2011.

Os cálculos aproximados para a substituição provavelmente foram feitos como segui:

Vale a ressalva que a eficiência da lâmpada vapor de sódio que deve ser utilizada nesses cálculos deve ser a da luminária (refletor), uma vez que existem perdas de reflexão. A luminária LED não usa refletor e conseqüentemente não tem perdas de reflexão.

– Um valor típico de eficiência de luminária é 80%, então: $\eta_{L-SOD} = 0,80 \cdot 85,3 = 68,2$

– Razão entre eficiências das lâmpadas: $R_{EQU} = \frac{\eta_{LED}}{\eta_{L-SOD}} = \frac{157,5}{68,2} = 2,31$

– Potência da luminária LED substituta: $P_{LED} = \frac{P_{SOD}}{R_{EQU}} = \frac{250}{2,31} = 108,2W$

No entanto, para tornar a visibilidade ainda melhor (nesse caso 15,5%) foi implantada luminárias LED de 140 W (sendo 15 W do drive).

5 COMPARATIVO COM OUTRAS LÂMPADAS

Neste capítulo serão comparados os diferentes tipos de lâmpadas atuais com as lâmpadas LED, ou seja, serão mostradas as vantagens e desvantagens das lâmpadas LED com relação às outras lâmpadas comumente utilizadas. Mas, antes disso, será apresentado o método que deve ser utilizado para encontrar a lâmpada LED equivalente.

5.1 MÉTODO PARA ENCONTRAR A LÂMPADA LED EQUIVALENTE

Partindo do pressuposto que os fluxos luminosos eficazes devem ser iguais e aplicando as equações 2.6 e 4.2, encontra-se o seguinte:

$$\phi_{EF-LED} = \phi_{EF-LAMP} \quad \Rightarrow \quad \eta_{EF-LED} \cdot P_{LED} = \eta_{EF-LAMP} \cdot P_{LAMP}$$

$$P_{LED} = \frac{\eta_{FOT-LAMP}}{\eta_{FOT-LED}} \left[\frac{(S/P)_{LAMP}}{(S/P)_{LED}} \right]^{0,78} \cdot P_{LAMP} \quad (5.1)$$

Inicialmente não se sabe a potência da lâmpada LED para obter suas características, no entanto, tem-se que partir de uma suposição para encontrar algum valor, daí se refaz os cálculos até que a diferença entre a potência suposta e a encontrada seja aceitável.

5.2 LÂMPADA LED VERSUS LÂMPADA INCANDESCENTE

Nesse caso tem-se a comparação entre lâmpadas normalmente utilizadas para a iluminação residencial, comercial e decorativa.

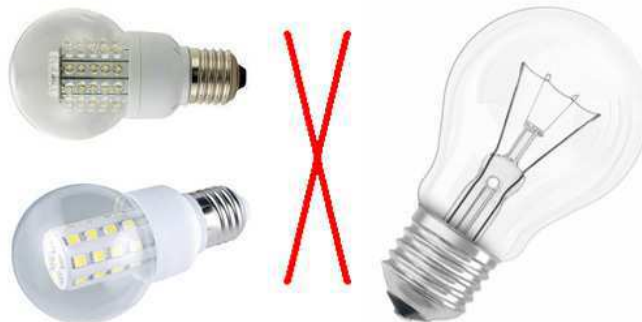


Figura 50. Lâmpada LED versus lâmpada incandescente.
Fontes: Catálogo Sylvania e montagem com as figuras 38 e 43, 2012.

Como vantagens têm:

- Maior eficiência luminosa efetiva (140 versus 17,6 lm/W);
- Entre 80 e 90% mais econômica;
- Maior vida útil (60000 versus 1000 h);
- Várias temperaturas de cor (2700 a 9000 versus 2300 a 2700 K);
- Maior resistência física;
- Menor emissão de calor.

Como desvantagens têm:

- Menor fator de potência (0,90 versus 1,00);
- Maior custo (US\$15 ou R\$27 versus R\$2)*¹ (13 versus 100 W);
- Menor IRC (85 versus 100).

Obs.: O tamanho da lâmpada LED pode ser maior ou menor que a incandescente dependendo do fluxo luminoso requerido.

5.3 LÂMPADA LED VERSUS LÂMPADA HALÓGENA

Nesse caso tem-se a comparação entre lâmpadas normalmente utilizadas para a iluminação residencial e comercial com ênfase na iluminação de destaque.



*Figura 51. Lâmpada LED versus lâmpada halógena.
Fontes: Catálogo Sylvania e montagem com as figuras 38 e 43, 2012.*

Como vantagens têm:

- Maior eficiência luminosa efetiva (140 versus 20,6 lm/W);
- Entre 75 e 85% mais econômica;
- Maior vida útil (60000 versus 3000 h);
- Várias temperaturas de cor (2700 a 9000 versus 2700 a 4000 K);
- Maior resistência física;

- Menor emissão de calor;
- Não sensível ao toque.

Como desvantagens têm:

- Menor fator de potência (0,90 versus 0,95);
- Maior custo (US\$12 ou R\$22 versus R\$6)*¹ (7 versus 50 W);
- Menor IRC (85 versus 100).

Obs.: O tamanho da lâmpada LED pode ser maior ou menor que a halógena dependendo do fluxo luminoso requerido.

5.4 LÂMPADA LED VERSUS LÂMPADA FLUORESCENTE TUBULAR

Nesse caso tem-se a comparação entre lâmpadas normalmente utilizadas para a iluminação residencial, comercial e repartições públicas.



*Figura 52. Lâmpada LED versus lâmpada fluorescente tubular.
Fontes: Catálogo Sylvania e montagem com as figuras 38 e 43, 2012.*

Como vantagens têm:

- Maior eficiência luminosa efetiva (140 versus 93,0 lm/W);
- Entre 25 e 40% mais econômica (sem contar com o refletor);
- Maior vida útil (60000 versus 10000 h);
- Várias temperaturas de cor (2700 a 9000 versus 4000 a 6500 K);
- Maior fator de potência (0,90 versus 0,60);
- Indiferente a situação on/off constante;
- Não contém material tóxico;
- Maior resistência física.

Como desvantagens têm:

- Maior custo (US\$35 ou R\$63 versus R\$5)*¹ (13 => 11 versus 20 W)*².

Obs.: A necessidade de equipamentos auxiliar vai depender da lâmpada LED utilizada, se for um módulo LED há a necessidade de um drive. O IRC é similar para ambas as tecnologias.

5.5 LÂMPADA LED VS LÂMPADA FLUORESCENTE COMPACTA

Nesse caso tem-se, também, a comparação entre lâmpadas normalmente utilizadas para a iluminação residencial, comercial e repartições públicas.



*Figura 53. Lâmpada LED versus lâmpada fluorescente compacta.
Fontes: Catálogo Sylvania e montagem com as figuras 38 e 43, 2012.*

Como vantagens têm:

- Maior eficiência luminosa efetiva (140 versus 73,9 lm/W);
- Entre 35 e 50% mais econômica;
- Maior vida útil (60000 versus 9500 h);
- Várias temperaturas de cor (2700 a 9000 versus 2700 a 6500 K);
- Maior fator de potência (0,90 versus 0,60);
- Indiferente a situação on/off constante;
- Não contém material tóxico;
- Maior resistência física.

Como desvantagens têm:

- Maior custo (US\$12 ou R\$22 versus R\$8)*¹ (11 versus 20 W).

Obs.: O tamanho da lâmpada LED pode ser maior ou menor que a LFC dependendo do fluxo luminoso requerido. A necessidade de equipamentos auxiliares vai depender da lâmpada LED utilizada, se for um módulo LED, há a necessidade de um drive. O IRC é similar para ambas.

5.6 LÂMPADA LED VERSUS LÂMPADA VAPOR DE MERCÚRIO

Nesse caso tem-se uma comparação entre lâmpadas normalmente utilizadas para a iluminação pública, de galpões e fábricas.



*Figura 54. Luminária LED versus lâmpada vapor de mercúrio.
Fontes: Catálogo Philips e montagem com as figuras 36 e 41, 2012.*

Como vantagens têm:

- Maior eficiência luminosa efetiva (157,5 versus 58,8 lm/W);
- Entre 55 e 65% mais econômica (sem contar com o refletor);
- Maior vida útil (50000 versus 18000 h);
- Várias temperaturas de cor (2700 a 9000 versus 3900 a 4300 K);
- Maior fator de potência (0,90 versus 0,60);
- Maior IRC (85 versus 50);
- Reacendimento instantâneo versus 5 min (mais 15 para estabilizar);
- Não contém material tóxico;
- Maior resistência física.

Como desvantagens têm:

- Maior custo (US\$80 ou R\$144 vs R\$25)*¹ (149 => 119~120 vs 400 W)*²;
- Maior tamanho (tem que adaptá-la ao poste).

Obs.: Para as menores potências, a lâmpada LED pode ter o tamanho aproximado a lâmpada vapor de mercúrio e possuírem base E27 podendo, desta forma, ser colocadas diretamente no bocal da lâmpada vapor de mercúrio.

5.7 LÂMPADA LED VERSUS LÂMPADA VAPOR DE SÓDIO

Nesse caso tem-se, também, uma comparação entre lâmpadas normalmente utilizadas para a iluminação pública, de galpões e fábricas.



*Figura 55. Luminária LED versus lâmpada vapor de sódio.
Fontes: Catálogo Philips e montagem com as figuras 36 e 41, 2012.*

Como vantagens têm:

- Maior eficiência luminosa efetiva (157,5 versus 85,3 lm/W);
- Entre 40 e 50% mais econômica (sem contar com o refletor);
- Maior vida útil (50000 versus 24000 h);
- Luz branca;
- Várias temperaturas de cor (2700 a 9000 versus 1900 a 2000 K);
- Maior fator de potência (0,90 versus 0,60);
- Maior IRC (85 versus 40);
- Reacendimento instantâneo versus 5 minutos;
- Estabiliza seu fluxo luminoso instantaneamente versus 15 minutos;
- Não contém material tóxico;
- Maior resistência física.

Como desvantagens têm:

- Maior custo (US\$120 ou R\$216 vs R\$31)*¹ (217 => 173~200 vs 400 W)*²;
- Maior tamanho (tem que adaptá-la ao poste).

Obs.: Essa lâmpada é a única que possui eficiência luminosa fotópica maior que a da lâmpada LED, mas foi provado em estudos apresentado nesse trabalho que o que realmente vale na avaliação da iluminação de uma determinada lâmpada é a eficiência luminosa efetiva.

5.8 LÂMPADA LED VERSUS LÂMPADA VAPOR METÁLICO

Da mesma forma que as duas lâmpadas anteriores, a comparação é feita entre lâmpadas normalmente utilizadas para a iluminação pública, de galpões e fábricas. Além disso, é muito utilizada na iluminação de estádios de futebol e afins.



*Figura 56. Luminária LED versus lâmpada vapor metálico.
Fontes: Catálogo Philips e montagem com as figuras 36 e 41, 2012.*

Como vantagens têm:

- Maior eficiência luminosa efetiva (157,5 versus 105,8 lm/W);
- Entre 25 e 35% mais econômica (sem contar com o refletor);
- Maior vida útil (50000 versus 13000 h);
- Várias temperaturas de cor (2700 a 9000 versus 3000 a 6000 K);
- Maior fator de potência (0,90 versus 0,60);
- Reacendimento instantâneo versus 5 minutos;
- Estabiliza seu fluxo luminoso instantaneamente versus 15 minutos;
- Não contém material tóxico;
- Maior resistência física.

Como desvantagens têm:

- Maior custo (US\$140 ou R\$252 vs R\$43)*¹ (269 => 215~250 vs 400 W)*²;
- Maior tamanho (tem que adaptá-la ao poste).

Obs.: A eficiência luminosa fotópica pode ser maior ou menor dependendo da potência da lâmpada, com uma pequena vantagem para a lâmpada LED, mas para a eficiência efetiva a lâmpada LED sempre está à frente. O IRC é similar para ambas as tecnologias.

5.9 LÂMPADA LED VERSUS LÂMPADA MISTA

Nesse caso teremos a comparação entre lâmpadas normalmente usadas para a iluminação residencial, comercial, pública e de fábricas.



*Figura 57. Lâmpada LED versus lâmpada mista.
Fontes: Philips e montagem com as figuras 36 e 41, 2012.*

Como vantagens têm:

- Maior eficiência luminosa efetiva (140 versus 31,4 lm/W);
- Entre 70 e 80% mais econômica (sem contar com o refletor);
- Maior vida útil (50000 versus 9000 h);
- Várias temperaturas de cor (2700 a 9000 versus 3500 a 4000 K);
- Reacendimento instantâneo versus 5 minutos;
- Maior IRC (85 versus 70);
- Maior resistência física.

Como desvantagens têm:

- Menor fator de potência (0,90 versus 0,95);
- Maior custo (US\$70 ou R\$126 vs R\$25)*¹ (111 => 89~100 vs 500 W)*²;

Obs.: O tamanho da lâmpada LED pode ser maior ou menor que a lâmpada mista dependendo do fluxo luminoso requerido. Se for maior, tem que adaptá-la ao poste.

*¹: O primeiro valor, em dólar, é referente à compra da lâmpada LED em sites de importação com o frete incluso e cotação de R\$1,80. O segundo valor, em real, é para compra da lâmpada comum no Brasil, mas sem o frete.

*²: Foi considerado um refletor com eficiência de luminária de 80% para o cálculo da potência necessária e foi tomado o módulo LED mais próximo e superior ao valor acima encontrado no caso das lâmpadas de alta pressão.

6 HISTÓRICO DE ILUMINAÇÃO A LED

A iluminação com LED é uma tecnologia relativamente nova, mas sua evolução e disseminação foram rápidas. Hoje em dia já existem muitos casos de iluminação a LED no Brasil e no mundo. Nas seções posteriores será visto exemplos de onde, quando e como foram aplicadas as lâmpadas LED. Destacam-se também as vantagens proporcionadas por elas no ponto de vista e cálculos dos responsáveis por cada implementação.

6.1 ILUMINAÇÃO A LED NO BRASIL

6.1.1 SÃO PAULO/SP – TÚNEL 2 DO RODOANEL MARIO COVAS

A CCR RodoAnel, responsável pela administração do trecho oeste do Rodoanel Mário Covas, em São Paulo, SP, adotou em 2010 esse novo sistema de iluminação para o túnel 2 da rodovia. O local tornou-se o primeiro a contar com a tecnologia a LED na América Latina.



Figura 58. Antes e depois da iluminação a LED do Túnel 2 do rodoanel Mario Covas.
Fonte: Lumilândia – Rodoanel em São Paulo com lâmpadas de LED, 2011.

Segundo CCR RodoAnel, após a substituição da iluminação de vapor de sódio pelas 652 luminárias LED, registrou-se uma redução de 65% no consumo diário do túnel 2. O consumo de 1130 kWh foi reduzido para 394 kWh.

Mais tarde, os túneis 1 e 3 também foram implementados com luminárias LED. A substituição completa terminou em setembro de 2011 e teve um investimento final em torno de 6 milhões de reais.

6.1.2 CANELA/RS – CATEDRAL DE PEDRA DE CANELA

A igreja Matriz Nossa Senhora de Lourdes – conhecida como Catedral de Pedra de Canela – ganhou um atrativo a mais. Construída em estilo gótico inglês, o monumento é um dos pontos turísticos mais visitados da cidade. Lâmpadas de LED proporcionam sete cores diferentes alternadas a cada minuto.



Figura 59. Catedral de Pedra de Canela.

Fonte: Brocker Turismo – Catedral de Pedras de Canela é premiada pela Abilux, 2011.

Segundo o projetista José Antonio Tomazewski, a iluminação a LED proporciona muita economia no consumo de energia elétrica e por ser uma iluminação colorida, atrai a curiosidade de turistas tornando a igreja ainda mais visitada.

6.1.3 FORTALEZA/CE – PALÁCIO IRACEMA

Em meados da década passada o fortalezense e empresário Fernando Alves Ximenes elaborou um poste autônomo que funcionava com energia eólica e solar com o intuito de promover a substituição dos postes convencionais de energia elétrica existentes em rodovias e praças públicas. Como pode ser visto na Figura 60-A, o poste é composto por duas placas solares, um aerogerador, uma bateria e uma luminária LED.

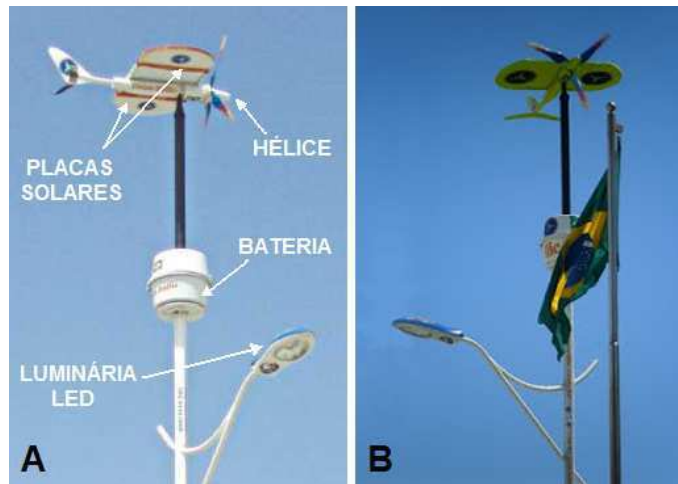


Figura 60. Poste autônomo com luminária LED.

Fonte: Diário do Nordeste – Poste Gera Energia Eólica e Solar, 2010.

A bateria do poste tem autonomia de 70 horas e pode alimentar outras três unidades.

Em 2010 o poste híbrido foi testado pelo Governo e hoje ajuda a iluminar o Palácio Iracema, sede do Governo do Ceará (ver Figura 60-B). "O governador está apoiando o projeto e já sinalizou a utilização nos empreendimentos do Estado. Já foram feitos todos os testes e o poste está pronto para viabilizar a iluminação", disse Ximenes ao Jornal Diário do Nordeste.

6.1.4 SÃO PAULO/SP – RUA DO AROUCHE

A prefeitura de São Paulo investiu em dez postes que tiveram suas lâmpadas de vapor de sódio 250 W substituídas por de LED de 140 W na Rua do Arouche, no centro da cidade.



Figura 61. Antes e depois da iluminação a LED na Rua do Arouche.
Fonte: Blog Parques Sustentáveis – LED: Boa visibilidade, 2011.

Segundo a Osram, a nova iluminação, além de acarretar em uma economia de 44% no consumo de energia elétrica, proporciona uma melhor reprodução das cores.

6.2 ILUMINAÇÃO A LED NO MUNDO

6.2.1 HOLANDA – PRIMEIRA ILUMINAÇÃO A LED NO MUNDO EM EDE

A Philips instalou em 2005 os primeiros postes de iluminação pública com tecnologia LED. Isso ocorreu na cidade de Ede na Holanda. A luminária contém 18 LEDs, sendo 6 brancos de 3 W e 12 amarelos de 1 W totalizando 30 W, que permitem tons mais claros ou mais suaves, de acordo com a diferença das estações e o horário. As temperaturas de cor variam entre 2700 e 4000 K e com uma altura de 4 m proporciona no chão uma iluminância de 10 lux. A seguir, veem-se imagens de um poste com luminárias LED em Ede.



*Figura 62. Poste com luminárias LED instalado em Ede na Holanda.
Fonte: LEDs Magazine – Philips installs LED streetlights in Dutch town of Ede, 2005.*

Segundo a Philips, os quatro postes com duas luminárias cada, foram instalados e monitorados em Ede para se ganhar experiência para futuros sistemas de iluminação a LED. Diz ainda que a luminária LED com uma vida útil de 50 mil horas contra 12 mil horas das outras lâmpadas proporcionariam uma menor necessidade de manutenção, implicando em menos riscos e custos com a troca.

6.2.2 ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA – RUAS EM LOS ANGELES

O programa “Los Angels LED Streetlight” foi o produto de uma parceria entre a cidade de Los Angeles e da Clinton Climate Initiative (CCI). Em conclusão prevista para 2013, será a maior modernização de ruas realizada por uma cidade até a data, substituindo 140 mil postes com lâmpadas tradicionais por postes com luminárias LED.



*Figura 63. Uma rua em Los Angeles antes e depois das luminárias LED.
Fonte: CleanTech Los Angeles – Los Angeles LED Streetlight Program, 2011.*

Segundo os projetistas, a nova iluminação será paga em sete anos inteiramente através de poupanças nos custos de energia e manutenção. A partir do oitavo ano a cidade já vai economizar 10 milhões de dólares anualmente através da iluminação mais eficiente e moderna LED. Além disso, as novas luzes da rua estarão equipadas com um sistema de monitoramento remoto que recolhe e centralmente relata dados em tempo real do desempenho. Falhas de equipamentos são controladas, registradas e sincronizadas pelo escritório de Los Angeles que ordena o serviço de manutenção da iluminação pública.

6.2.3 JAPÃO – PARQUE NABANA-NO-SATO EM KUWANA

Ao se enveredar pelo Parque Nabana-no-Sato nos surpreendemos com seus campos floridos e por vezes temáticos, no entanto, todos os anos, de dezembro a março, o Parque é cenário de um fantástico Festival de Luzes, onde são utilizados milhões de luzes LED de cores variadas que se mesclam à Natureza e paisagismo do Parque proporcionando ao telespectador um maravilhoso cenário iluminado de grande beleza.



*Figura 64. Parque Nabana-no-Sato iluminado por LEDs.
Fonte: Japaoemfoco – Jardim de flores iluminado no parque Nabana no Sato, 2011.*

Segundo os projetistas, a utilização das lâmpadas LED tornou o ambiente muito mais versátil e gerou grande economia no consumo de energia elétrica.

6.2.4 PORTUGAL – ILUMINAÇÃO DO CENTRO HISTÓRICO EM ARRAIOLOS

Sustentabilidade, segurança e conforto eram os objetivos perseguidos pelo município de Arraiolos quando pensaram na renovação da iluminação do seu centro histórico. Conhecida mundialmente pela sua tapeçaria, as autoridades locais queriam preservar o patrimônio da vila e melhorar a qualidade de vida da população considerando ao mesmo tempo as preocupações ambientais. O Plano de Iluminação do Centro Histórico de Arraiolos foi desenhado em colaboração com os lighting designers da ECLIPZ, um gabinete português de lighting design. Arraiolos é o primeiro grande plano de iluminação, totalmente conseguida com tecnologia LED associada a um inteligente sistema de telegestão, concretizado em Portugal.



*Figura 65. Uma rua do centro histórico antes e depois das luminárias LED.
Fonte: Schröder – O Centro Histórico de Arraiolos, em Portugal, iluminado com LED, 2011.*

Segundo a Schröder, este novo plano de iluminação permite aproximadamente 50% de redução de consumo energético por luminária e reduz drasticamente os custos de manutenção.

As luminárias estão ainda equipadas com um sistema de telegestão para adaptar os níveis de iluminação durante a noite. Cada luminária pode ser controlada individualmente a partir de um sistema centralizado permitindo economias adicionais de 30%.

7 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA O GINÁSIO DA UFCG – CAMPUS CG

Neste capítulo não há um projeto de iluminação do ginásio da UFCG (Campus de Campina Grande), pois se tomou o atual como correto. O que será visto é um estudo de viabilidade econômica (EVE) da troca da iluminação atual feita com lâmpadas vapor de mercúrio de 400 W por lâmpadas LED que proporcionem a mesma iluminância efetiva na quadra. Inicialmente será apresentada a situação atual, depois será feito os cálculos para encontrar a lâmpada LED equivalente, daí será exposta as opções de lâmpadas LED e, por fim, será feito o estudo de viabilidade econômica da substituição.

7.1 SITUAÇÃO DA ILUMINAÇÃO ATUAL

As dimensões da quadra de esportes do ginásio podem ser vista na Figura 66.

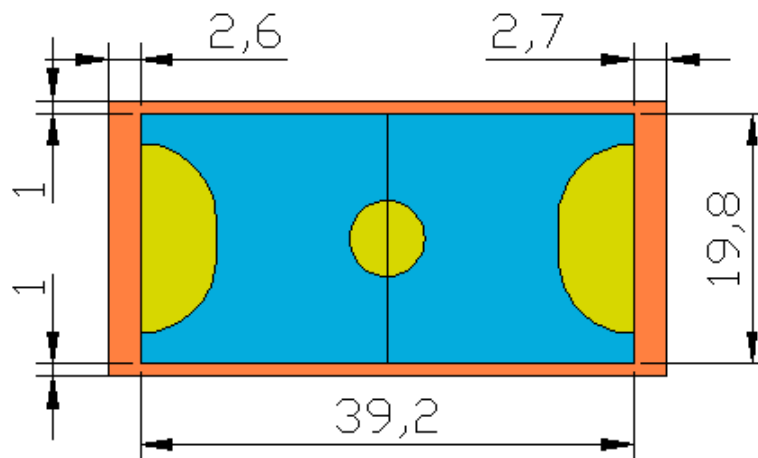


Figura 66. Dimensões da quadra de esportes.
Fonte: Imagem própria, 2012.

A iluminação atual do ginásio para a quadra de esportes é feita por 30 luminárias (tipo industrial com eficiência de 74,4%) com lâmpadas vapor de mercúrio com potência de 400 W (22000 lúmens fotópicos). Na Figura 67, a seguir, há a disposição dessas luminárias, onde os pontos brancos representam as luminárias onde a lâmpada está em funcionamento e os pontos pretos representam as luminárias onde a lâmpada não se encontra em funcionamento (treze) devido provavelmente a queima das mesmas.

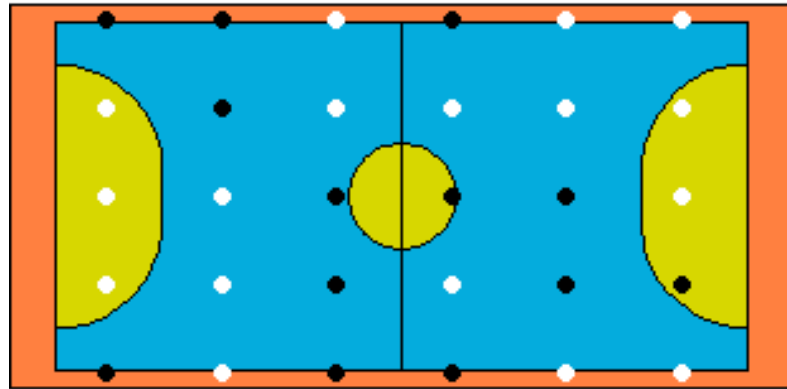


Figura 67. Disposição das luminárias na quadra de esportes.
Fonte: Imagem própria, 2012.

A fim de verificar a iluminância atual na superfície da quadra de esportes, foram feitas leituras com o luxímetro seguindo as normas da ABNT NBR-5382 (Verificação de Iluminância de Interiores). O método apresentado na norma simplifica a verificação e garante que o valor encontrado para a iluminância média terá um erro máximo de 10% comparado ao método da divisão da área total em áreas de 50x50 cm, medir a iluminância nessas áreas e fazer uma média aritmética desses valores.

No caso específico usa-se o método da seção 4.1 da norma em que se trata: *Campo de trabalho retangular, iluminado com fontes de luz em padrão regular, simetricamente espaçadas em duas ou mais fileiras*. A figura encontrada no arquivo da norma pode ser vista na Figura 68 a seguir.

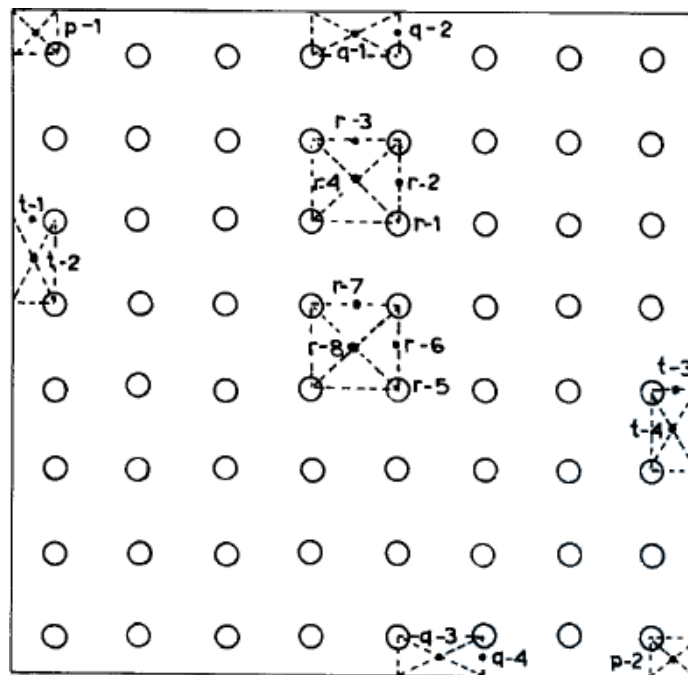


Figura 68. Pontos para a leitura com o luxímetro e determinação da iluminância média.
Fonte: ABNT NBR-5382, Verificação de Iluminância de Interiores, 1985.

Os pontos representados por letras seguidas de número na Figura 68 representam lugares onde o luxímetro deve ser colocado para medir o iluminamento. Os 18 lugares onde foram colocados o luxímetro no ginásio são apresentados na Figura 69 a seguir.

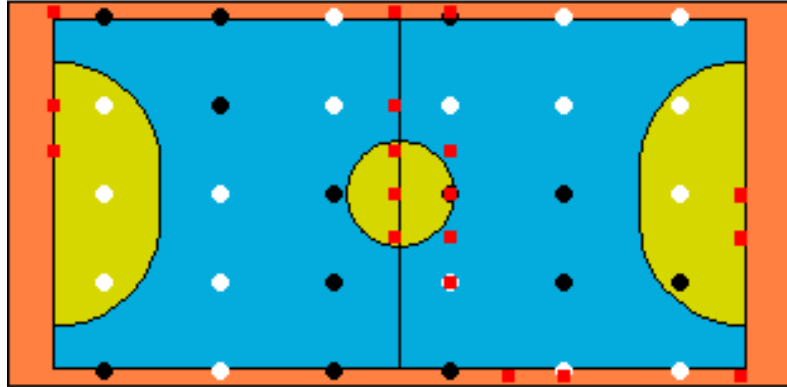


Figura 69. Disposição dos pontos de leitura para o luxímetro na quadra.
Fonte: Imagem própria, 2012.

A seguir, ao mesmo tempo em que forem apresentados os passos para encontrar a iluminância indicado pela norma, serão feitos os cálculos.

PASSO 1:

Fazer leituras nos lugares r-1, r-2, r-3, r-4, r-5, r-6, r-7 e r-8 (área central da quadra). Calcular a média aritmética das oito medições e atribuir a letra R.

$$R = \frac{r1+r2+r3+r4+r5+r6+r7+r8}{8}$$

$$R = \frac{106+124+120+106+128+113+94+97}{8} = \frac{889}{8} \Rightarrow R = 111,13 \text{ lx}$$

PASSO 2:

Fazer leituras nos lugares q-1, q-2, q-3 e q-4 (áreas laterais da quadra). Calcular a média aritmética das quatro medições e atribuir a letra Q.

$$Q = \frac{q1+q2+q3+q4}{4} = \frac{114+87+93+138}{4} = \frac{432}{4} \Rightarrow Q = 108,00 \text{ lx}$$

PASSO 3:

Fazer leituras nos lugares t-1, t-2, t-3 e t-4 (áreas de fundo da quadra). Calcular a média aritmética das quatro medições e atribuir a letra T.

$$T = \frac{t1+t2+t3+t4}{4} = \frac{68+90+75+64}{4} = \frac{297}{4} \Rightarrow T = 74,25 \text{ lx}$$

PASSO 4:

Fazer leituras nos lugares p-1 e p-4 (áreas de canto da quadra). Calcular a média aritmética das duas medições e atribuir a letra P.

$$P = \frac{p1 + p2}{2} = \frac{33 + 74}{2} = \frac{107}{2} \quad \Rightarrow P = 53,50 \text{ lx}$$

PASSO 5:

Determinar a iluminância média na quadra, com a seguinte equação:

$$E_{MED} = \frac{R(M-1)(N-1) + Q(N-1) + T(M-1) + P}{MN}$$

$$E_{MED} = \frac{111,13(5-1)(6-1) + 108(6-1) + 74,25(5-1) + 53,5}{5 \cdot 6} \quad \Rightarrow E_{MED} = 103,8 \text{ lx}$$

Onde: M é o número de filas (na horizontal) e N é o número de luminárias por fila.

A norma da ABNT NBR-5413 (Iluminância de Interiores) estabelece que iluminância média em uma quadra de futebol de salão deve ser de 200 lx, no entanto, pode assumir valores próximos de 150 lx quando a precisão não for importante. Nesse caso é obvio que o valor encontrado foi abaixo da média devido à grande quantidade de lâmpadas queimadas.

O cálculo da iluminância média foi apenas para a verificação e não para a correção caso fosse necessário. O principal objetivo dessa seção é destacar as características da lâmpada utilizada na iluminação atual, dessa forma, essas informações são melhores observadas na Tabela 9 abaixo.

Tabela 9. Características da iluminação da quadra.

| Característica | Valor |
|-----------------------------|--------------------|
| Tipo da Lâmpada | Vapor de Mercúrio |
| Potência Unitária | 400 W |
| Potência do Reator | 60 W (15%) |
| Potência do Conjunto | 460 W |
| Fluxo Luminoso Fot. | 22000 lm |
| Eficiência Fotópica | 55 lm/W |
| Eficiência Efetiva | 58,82 lm/W |
| Eficiência Efetiva do Refl. | 43,76 lm/W (74,4%) |
| Ângulo de fecho do Refl. | 120° |
| Vida Útil | 16000 h |
| IRC | 40 % |

O modelo de refletor atualmente utilizado no ginásio pode ser visto na Figura 70.



Figura 70. Modelo do refletor utilizado no ginásio.
Fonte: Catálogo Elgo – Modelo Mitra New Smooth, 2008.

7.2 CÁLCULO DA LÂMPADA LED EQUIVALENTE

Como foi explicado na seção 5.1, inicialmente não se sabe a potência da lâmpada LED para obter suas características e comparar, no entanto tem-se que partir de uma suposição e depois se adequar aos dados corretos. Tomando uma lâmpada LED de 100 W com típicos 6000 K de temperatura de cor, tem-se a seguinte Tabela 10.

Tabela 10. Características da uma lâmpada LED.

| Característica | Valor |
|----------------------|-------------|
| Potência Unitária | 100 W |
| Potência do Drive | 20 W |
| Potência do Conjunto | 120 W |
| Fluxo Luminoso Fot. | 9.000 lm |
| Eficiência Fotópica | 90 lm/W |
| Eficiência Efetiva | 157,55 lm/W |
| Ângulo de fecho | 120° |
| Vida Útil | 60.000 h |
| IRC | 80 % |

Uma vez com as características em mãos, serão feito os cálculos para obter a lâmpada LED equivalente.

– Razão entre eficiências das lâmpadas:

$$R_{EQU} = \frac{\eta_{LED}}{\eta_{L-MER}} = \frac{157,55}{43,76} = 3,6$$

Esse valor nos dá a informação de quanto a eficiência luminosa efetiva da lâmpada LED é superior a luminária vapor de mercúrio. Com isso pode-se calcular a potência equivalente para a lâmpada LED como segue.

– Potência da lâmpada LED substituta:
$$P_{LED} = \frac{P_{MER}}{R_{EQU}} = \frac{400}{3,6} = 111,1W$$

Encontrou-se uma potência de 111,1 W que é diferente dos 100 W suposto no início do cálculo, dessa forma, deviam-se pegar as características de uma lâmpada LED de potência próxima aos 111,1 W e refazer os cálculos. Esse processo se repetiria até que a diferença entre a potência suposta e a encontrada fosse percentualmente aceitável. No entanto, a razão S/P ainda não é de fácil acesso e a diferença não seria grande devido à razão S/P não se alterar consideravelmente com a potência. Assim sendo, adota-se a potência como correta.

No entanto, a potência de 111,1 W é referente apenas a lâmpada LED não incluindo o drive, desta forma o correto é fazer a busca pela lâmpada com o mesmo fluxo luminoso, seja ele fotópico ou efetivo. Vamos calcular o fluxo luminoso fotópico que é mais natural encontrar nas informações fornecidas pelo fabricante.

$$\phi_{LED-FOT} = P_{LED} \cdot \eta_{LED-FOT} = 111,1 \cdot 90 = 10.000 \text{ lm}$$

7.3 OPÇÕES DE LÂMPADAS

7.3.1 LUMINÁRIA LED MODELO EK-LG DE 120 W DA TECHNOSOL

A luminária EK-LG é um produto da Technosol encontrada em catálogo. As suas aparência e características podem ser vistas na Figura 71 e na Tabela 11, a seguir.



Figura 71. Luminária LED EK-LG de 120 W.
Fonte: Technosol – Catálogo de Produtos, 2011.

Tabela 11. Características da luminária LED EK-LG 120 W.

| Característica | Valor |
|----------------------|-----------|
| Potência sem Drive | 105 W |
| Potência do Drive | 15 W |
| Potência do Conjunto | 120 W |
| Fluxo Luminoso Fot. | 9.700 lm |
| Eficiência Fotópica | 92,4 lm/W |
| Temperatura de Cor | 6.000 K |
| Ângulo de fecho | 120° |
| Vida Útil | 50.000 h |
| Fator de Potência | 0,96 |
| DHT | < 9% |
| IRC | 80 % |

Refletores desse modelo já são utilizados em galpões e provavelmente serão utilizados no Maracanãzinho devido a um projeto da General Electrics aprovado pela secretária de Estado de Esporte e Lazer do Rio de Janeiro em janeiro de 2012.



Figura 72. Iluminação com luminária LED EK-LG e Maracanãzinho.
Fonte: Technosol – Catálogo de Produtos, 2011.

7.3.2 PROJETO PRÓPRIO COM MÓDULO LED DE 120 W

Diferente do caso anterior em que os dados apresentados são confiáveis, pois foram informados pelo fabricante e provavelmente passaram por testes para obtê-los, esse módulo LED de 120 W é encontrado a venda na internet com grandes variações na eficiência luminosa (entre 60 e 110 lm/W), desta forma, seria necessária a obtenção do mesmo para testes fotométricos, no entanto, a fim de exemplificar toma-se a eficiência como 85 lm/W.

O módulo LED de 120 W pode ser obtido pela internet, assim como o drive para o seu funcionamento em 220 V/AC. As suas aparências e características podem ser vistas a seguir.

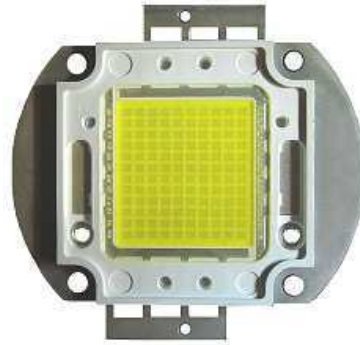


Figura 73. Módulo LED de 120 W.
Fonte: Plasma LED – High Power LEDs, 2011.

Tabela 12. Características do módulo LED 120 W.

| Característica | Valor |
|---------------------|-----------|
| Potência Unitária | 120 W |
| Fluxo Luminoso Fot. | 10.200 lm |
| Eficiência Fotópica | 85 lm/W |
| Temperatura de Cor | 6.000 K |
| Ângulo de fecho | 120° |
| Vida Útil | 50.000 h |



Figura 74. Drive para módulo LED de 120 W.
Fonte: Ebay – Vendedor Boyatech, 2011.

Tabela 13. Características do drive para módulo LED 120 W.

| Característica | Valor |
|-------------------------|----------------|
| Potência Dissipada | ~ 20 W |
| Tensão de Entrada | 100 ~ 264 V/AC |
| Tensão de Saída | 36 V/DC |
| Corrente de Saída | 3,6 A |
| Fator de Potência | 0,85 |
| Proteção de Sobrecarga | 130~150% |
| Proteção de Sobretensão | 115~135% |
| Grau de Proteção | IP67 |

Fixando ao módulo LED um bom dissipador de calor, a montagem da luminária poderia ser uma adaptação no refletor atual ficando parecida com a Figura 75.



Figura 75. Aparência da adaptação proposta.
Fonte: Ecoxotic – LED Cannons, 2011.

Nesse caso, como se fosse uma lâmpada, só o módulo LED precisaria ser trocado em caso de queima e não a luminária por completo o que tornaria mais barata a manutenção.

7.4 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Nesta seção será feito o estudo de viabilidade econômica (EVE) das duas luminárias LED propostas na seção anterior. O período utilizado para os cálculos será o da lâmpada com maior vida útil, ou seja, o período em que uma lâmpada LED levaria para se queimar.

7.4.1 EVE DA LUMINÁRIA LED MODELO EK-LG

Tabela 14. Viabilidade da luminária LED modelo EK-LG.

| Característica | Vapor de Mercúrio | Luminária LED |
|------------------------------|-------------------|----------------|
| Preço da Lâmpada / Luminária | R\$ 25,00 | R\$ 1.180,00 |
| Preço do Reator / Drive | R\$ 50,00 | incluso acima |
| Preço da Luminária | R\$ 100,00 | incluso acima |
| Gasto Inicial das 30 Lamps. | R\$ 5.250,00 | R\$ 35.400,00 |
| Vida Útil da Lâmpada | 16.000 h | 50.000 h |
| Lâmpadas Substituídas | 63,75 | 0 |
| Gasto com Novas Lâmpadas | R\$ 1.593,75 | R\$ 0 |
| Potência do Conjunto | 460 W | 120 W |
| Tempo Ligada Mensal | 180 | 180 |
| Consumo Mensal das 30 Lamps | 2.484 kWh | 648 kWh |
| Preço do kWh* ¹ | R\$ 0,637 | R\$ 0,637 |
| Gasto no Consumo Mensal | R\$ 1.582,31 | R\$ 412,78 |
| Gasto Total na Vida do LED | R\$ 446.373,75 | R\$ 150.060,00 |

Como pontos importantes a destacar se tem:

- As luminárias LED proporcionam uma redução de 74% no consumo mensal;

$$Redução_{LED} = 1 - \frac{(Consumo_Mensal)_{LED}}{(Consumo_Mensal)_{MER}} = 1 - \frac{648}{2.484} = 74\%$$

- Durabilidade de 23 anos das luminárias LED versus 7,5 anos das de mercúrio;

$$Durabilidade_{LED} = \frac{(Vida_Útil)_{LED}}{12 \cdot (Uso_Mensal)} = \frac{50000}{12 \cdot 180} = 23,15 \text{ anos}$$

$$Durabilidade_{MER} = \frac{(Vida_Útil)_{MER}}{12 \cdot (Uso_Mensal)} = \frac{16000}{12 \cdot 180} = 7,41 \text{ anos}$$

- Payback das 30 luminárias LED em 2 anos, caso considere ambos os projetos iniciais, ou 2 anos e 5 meses, caso considere só a substituição;

$$Payback_{LED} = \frac{(Gasto_Inicial + Substituições)_{LED} - (Gasto_Inicial + Substituições)_{MER}}{12 \cdot [(Gasto_Consumo_Mensal)_{MER} - (Gasto_Consumo_Mensal)_{LED}]}$$

$$Payback_{LED} = \frac{(35.400,00 + 0) - (5.250,00 + 1.593,75)}{12 \cdot [1.582,31 - 412,78]} = \frac{28.556,25}{12 \cdot [1.169,53]} = 2,03 \text{ anos}$$

$$Payback_{LED} = \frac{(Gasto_Inicial + Substituições)_{LED} - (Gasto_Substituições)_{MER}}{12 \cdot [(Gasto_Consumo_Mensal)_{MER} - (Gasto_Consumo_Mensal)_{LED}]}$$

$$Payback_{LED} = \frac{(35.400,00 + 0) - (1.593,75)}{12 \cdot [1.582,31 - 412,78]} = \frac{33.806,25}{12 \cdot [1.169,53]} = 2,41 \text{ anos}$$

- Após as luminárias LED serem quitadas a economia mensal devido ao consumo é de aproximadamente R\$1.170 até completar a vida útil da mesma.

$$Economia_{LED} = (Gasto_Consumo_Mensal)_{MER} - (Gasto_Consumo_Mensal)_{LED}$$

$$Economia_{LED} = 1.582,31 - 412,78 = R\$1.169,53$$

- Economia de mais de 291 mil Reais no final da vida útil da luminária LED ao considerar apenas a substituição das lâmpadas;

$$Economia_Final = (Gasto_Total)_{MER} - (Gasto_Total)_{LED}$$

$$Economia_{LED} = (446.373,75 - 5.250,00) - 150.060,00 = R\$291.063,75$$

- O custo com transporte e mão de obra para substituição das lâmpadas vapor de mercúrio não foram inclusos;
- Supôs-se não ser necessária a troca do reator da lâmpada vapor de mercúrio no período da vida útil da luminária LED.

7.4.2 EVE DO PROJETO PRÓPRIO COM MÓDULO LED

Tabela 15. Viabilidade do projeto próprio com módulo LED.

| Característica | Vapor de Mercúrio | Luminária LED |
|-----------------------------|-------------------|---------------------------|
| Preço da Lâmpada / Módulo | R\$ 25,00 | R\$ 144,00 * ² |
| Preço do Reator / Drive | R\$ 50,00 | R\$ 72,00 * ³ |
| Luminária / Adaptação | R\$ 100,00 | R\$ 150,00 * ⁴ |
| Gasto Inicial das 30 Lamps. | R\$ 5.250,00 | R\$ 10.980,00 |
| Vida Útil da Lâmpada | 16.000 h | 50.000 h |
| Lâmpadas Substituídas | 63,75 | 0 |
| Gasto com Novas Lâmpadas | R\$ 1.593,75 | R\$ 0 |
| Potência do Conjunto | 460 W | 140 W |
| Tempo Ligada Mensal | 180 | 180 |
| Consumo Mensal das 30 Lamps | 2.484 kWh | 756 kWh |
| Preço do kWh* ¹ | R\$ 0,637 | R\$ 0,637 |
| Gasto no Consumo Mensal | R\$ 1.582,31 | R\$ 481,57 |
| Gasto Total na Vida do LED | R\$ 446.373,75 | R\$ 133.770,00 |

Como pontos importantes a destacar se tem:

- As luminárias LED proporcionam uma redução de 70% no consumo mensal;

$$Redução_{LED} = 1 - \frac{(Consumo_Mensal)_{LED}}{(Consumo_Mensal)_{MER}} = 1 - \frac{756}{2.484} = 70\%$$

- Durabilidade de 23 anos das luminárias LED versus 7,5 anos das de mercúrio;

$$Durabilidade_{LED} = \frac{(Vida_Útil)_{LED}}{12 \cdot (Uso_Mensal)} = \frac{50000}{12 \cdot 180} = 23,15 \text{ anos}$$

$$Durabilidade_{MER} = \frac{(Vida_Útil)_{MER}}{12 \cdot (Uso_Mensal)} = \frac{16000}{12 \cdot 180} = 7,41 \text{ anos}$$

- Payback das 30 luminárias LED em menos de 4 meses, caso considere ambos os projetos iniciais, ou 8 meses e meio, caso considere só a substituição;

$$Payback_{LED} = \frac{(Gasto_Inicial + Substituições)_{LED} - (Gasto_Inicial + Substituições)_{MER}}{12 \cdot [(Gasto_Consumo_Mensal)_{MER} - (Gasto_Consumo_Mensal)_{LED}]}$$

$$Payback_{LED} = \frac{(10.980,00 + 0) - (5.250,00 + 1.593,75)}{12 \cdot [1.582,31 - 481,57]} = \frac{4.136,25}{12 \cdot [1.100,74]} = 0,31 \text{ ano}$$

$$Payback_{LED} = \frac{(Gasto_Inicial + Substituições)_{LED} - (Gasto_Substituições)_{MER}}{12 \cdot [(Gasto_Consumo_Mensal)_{MER} - (Gasto_Consumo_Mensal)_{LED}]}$$

$$Payback_{LED} = \frac{(10.980,00 + 0) - (1.593,75)}{12 \cdot [1.582,31 - 481,57]} = \frac{9.386,25}{12 \cdot [1.100,74]} = 0,71 \text{ ano}$$

- Após as luminárias LED serem quitadas a economia mensal devido ao consumo é de mais de R\$1.100 até completar a vida útil da mesma.

$$Economia_{LED} = (Gasto_Consumo_Mensal)_{MER} - (Gasto_Consumo_Mensal)_{LED}$$

$$Economia_{LED} = 1.582,31 - 481,57 = R\$1.100,74$$

- Economia de mais de 307 mil Reais no final da vida útil da luminária LED ao considerar apenas a substituição das lâmpadas;

$$Economia_Final = (Gasto_Total)_{MER} - (Gasto_Total)_{LED}$$

$$Economia_{LED} = (446.373,75 - 5.250,00) - 133.770,00 = R\$307.353,75$$

- O custo com transporte e mão de obra para substituição das lâmpadas vapor de mercúrio não foram inclusos;
- Supôs-se não ser necessária a troca do reator da lâmpada vapor de mercúrio no período da vida útil da luminária LED.

*¹: O preço médio do kWh para a tarifação horo-sazonal verde adotada pela UFCG foi calculado em anexo.

*²: O preço do Módulo LED 120 W encontrado no site Ebay foi de US\$80, daí com a cotação do dólar em R\$1,80 implica em R\$144,00. Impostos não inclusos pela incerteza da cobrança.

*³: O preço do Drive LED 120 W encontrado no site Ebay foi de US\$40, daí com a cotação do dólar em R\$1,80 implica em R\$72,00. Impostos não inclusos pela incerteza da cobrança.

*⁴: Os gastos incluem a compra de um bom dissipador de calor e a mão-de-obra para montar uma unidade de luminária LED.

8 CONCLUSÃO

A inovadora iluminação a LED veio para ficar. Devido a sua flexibilidade para tomar a forma dos diversos tipos de lâmpadas atuais as mesmas podem substituí-las. No entanto, o fator mais importante nas lâmpadas LED é sua economia proporcionada pela redução no consumo de energia elétrica. Além disso, possui características adicionais vantajosas como a sua longa vida útil, alta eficiência luminosa, IRC e resistência física, bom fator de potência, baixa distorção harmônica e, também, flexibilidade nas cores e temperaturas de cor. Tirando o fator de potência e o IRC na comparação com as lâmpadas que usam a incandescência para emitir luz, a desvantagem parece ser apenas o seu alto custo, no entanto, isso se deve a tecnologia ser relativamente nova e, daí a tendência é diminuir com o tempo como sempre aconteceu no mundo da tecnologia.

Nesse trabalho, ainda, pôde-se ver o novo e revolucionário conceito de iluminação em que estudos recentes mostraram o real comportamento do olho humano em níveis de iluminação em um ambiente de trabalho, onde se entende como um local que se necessita de iluminação artificial. No entanto, por se tratar de um tema ainda muito recente, devem-se ter estudos ainda mais profundos para descobrir novas razões S/P e com mais precisão para as diversas lâmpadas existentes no mercado.

Já na parte do estudo de viabilidade econômica desse trabalho, pode-se ver que o fluxo luminoso emitido pela luminária LED escolhida para a substituição da lâmpada vapor de mercúrio foi menor (9.700 versus 10.000 lm), no entanto, essa diferença é de apenas 3%. Além disso, deve-se levar em consideração a depreciação do fluxo luminoso da lâmpada vapor de mercúrio (30% em sua vida útil), assim seu fluxo luminoso logo ficaria menor que o da luminária LED que tem uma depreciação muito menor (entre 5 e 10% em sua vida útil).

Indo além da economia financeira, tem-se que a iluminação feita com LEDs proporciona uma grande redução na potência instalada e isso é necessário para a sustentabilidade do nosso planeta. Além do que, cada vez mais cargas são instaladas e, com essa redução, as concessionárias ficariam menos sobrecarregadas e poderiam fornecer potência para mais consumidores.

Em fim, foi de grande proveito a realização deste trabalho, pois através das pesquisas realizadas e estudo de viabilidade econômica, foi possível constatar que as lâmpadas LED são mais eficientes e versáteis que qualquer outra lâmpada antes existente.

BIBLIOGRAFIA

ABNT. NBR 5382 - Verificação de Iluminância de Interiores. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1985.

ABNT. NBR 5413 - Iluminância de Interiores. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1992.

BERMAN, Dr. Sam et al. Vertical Scotopic Illuminance Predicts Pupil Size. Berkeley-CA, 1997. Disponível em: <<http://gaia.lbl.gov/btech/papers/40903.pdf>>. Acesso em: 02 jan. 2012.

BERMAN, Dr. Sam. Scotopic Enhanced Lighting: The Coming Revolution in Lighting Practice. Vector, Berkeley-CA: fev. 2010, p. 18 - 22. Disponível em: <<http://www.eepublishers.co.za/images/upload/Vector%202010/Scotopic%20lighting.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2012.

Boot Block Bios Info. LED – Diodos Emissores de Luz. Disponível em: <<http://bootblockbios.com/eletronica/led-diodos-emissores-de-luz/>>. Acesso em: 09 nov. 2011.

BRAGA, Newton Carvalho. Como Funcionam os LEDs (ART553). Instituto Newton C. Braga. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/4076-art553.html>>. Acesso em: 09 nov. 2011.

Casual Mecatrónica. Lâmpadas Low Cost Led. Disponível em: <<http://www.casualmecatronica.com/>>. Acesso em: 15 nov. 2011.

Clean Tech Los Angeles. Los Angeles LED Streetlight Program. Los Angeles-CA: 05 abr. 2011. Disponível em: <<http://cleantechlosangeles.org/projects/article.asp?parentid=1308>>. Acesso em: 20 nov. 2011.

Compu Phase. Candela, Lumen, Lux: The Equations. Disponível em: <http://www.compu-phase.com/electronics/candela_lumen.htm#APEX_ANGLE>. Acesso em: 03 nov. 2011.

COSTA, Edson Guedes; MOREIRA, Vicente Delgado; FERREIRA, Tarso Vilela. Laboratório de Instalações Elétricas - Guia Experimental de Fotometria. Campina Grande: GSE-UFCG, 2008.

DECKMANN, Sigmar Maurer; POMÍLIO, José Antenor. Distorção Harmônica: Causas, Efeitos e Soluções. DSCE – FEEC – UNICAMP. Disponível em: <<http://www.grupozug.com.br/ENGEL/IHA2.htm>>. Acesso em: 05 nov. 2011.

Electrónica. LED (Light Emitting Diode, ou Díodo Emissor de luz). Disponível em: <<http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/126/37/>>. Acesso em: 09 nov. 2011.

ELGO. Specifications - Mitra New Smooth. Disponível em: <http://cd.brilux.pl/ENCD_BRI/DOC/PROFESJONALNE/PLEN/104_107.PDF>. Acesso em: 21 nov. 2011.

Energisa. Tarifa Horo-sazonal Verde. Disponível em: <<http://www.energisa.com.br/borborema/paginas%20internas/tarifas.aspx>>. Acesso em: 22 nov. 2011.

ENGEL - Engenharia Elétrica. Considerações Iniciais / O que são harmônicas? Disponível em: <<http://www.grupozug.com.br/ENGEL/IHA2.htm>>. Acesso em: 05 nov. 2011.

GE Iluminação. Glossário. Disponível em: <<http://www.gelampadas.com.br/solucoes/glossario.asp>>. Acesso em: 02 nov. 2011.

GOEKING, Weruska. Lâmpadas e Leds. O Setor Elétrico: ed. 46. de nov. 2009. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/176-lampadas-e-leds.html>>. Acesso em: 20 dez. 2011.

INMETRO. Unidades Legais de Medida. Inmetro, 2010. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/unidLegaisMed.asp?iacao=imprimir>>. Acesso em: 12 ago. 2010.

International Commission on Illumination. CIE and Mesopic Photometry. Disponível em: <<http://www.cie.co.at/index.php/LEFTMENU/About+us/CIE+Newsletter/Artikel+1+Oktob+er>>. Acesso em: 01 jan. 2012.

KLIPSTEIN, Donald. S/P Ratios of Various Light Sources. Upper Darby-PA, 1997. Disponível em: <<http://donklipstein.com/spratio.html>>. Acesso em: 02 jan. 2012.

Ledepot. Luminária em LED Alto Brilho vs. Vapor de Sódio. Disponível em: <<http://leddepot.com.br/duvidas/led-ou-vapor-de-sodio.html>>. Acesso em: 13 nov. 2011.

LUCIANO, Benedito Antônio et al. O Setor Elétrico - Lâmpadas Fluorescentes e Distorções Harmônicas: Eficiência Energética e qualidade de Energia. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/254-.html>>. Acesso em: 04 nov. 2011.

LUZ, Jeanine Marchiori. Luminotécnica. Disponível em: <www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Livros/Luminotecnica.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2011.

MAMEDE FILHO, João. Instalações Elétricas Industriais. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

NISKIER, Julio; MACINTYRE, Archibald Joseph. Instalações Elétricas. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

Noribachi. It's what meets the eye. Disponível em: <http://www.noribachi.com/images/uploads/whitepapers/what_meets_the_eye.pdf>. Acesso em: 02 jan. 2012.

O Setor Elétrico. O Espectro das Fontes de Luz e os Níveis Baixos de Iluminação: O Básico. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/component/content/article/58-artigos-e-materias-relacionadas/326-.html>>. Acesso em: 14 nov. 2011.

Óptica Teoria da Cor. Determinação dos Lúmens das Lâmpadas e Lumens Eficientes. Disponível em: <<http://opticateoriadacor.blogspot.com/2010/01/determinacao-dos-lumens-das-lampadas-e.html>>. Acesso em: 13 nov. 2011.

OSRAM. Glossário de Iluminação. Osram, 2011. Disponível em: <www.osram.com.br/osram_br/Ferramentas_&_Catlogos/_pdf/Arquivos/Iluminacao_Geral/Catlogo_Geral_2011-2012/AF_10_glossario.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2011.

OSRAM. Manual Luminotécnico Prático. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/7086192/Manual-de-Luminotecnica-Osram>>. Acesso em: 20 out. 2011.

PEER. Manual Técnico Iluminación. Programa de Eficiência Energética Regional. Disponível em: <<http://bun-ca.org/publicaciones/manuales/ManualesTecnicos03Agosto2011/Iluminacion.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2011.

Philips. Guia Prático Philips Iluminação - Lâmpadas, Reatores, Luminárias e LEDs. Disponível em: <http://www.lighting.philips.com.br/pwc_li/br_pt/connect/Assets/pdf/GuiaBolso_Sistema_09_final.pdf>. Acesso em: 20 out. 2011.

Philips. Método dos Lumens. Disponível em: <http://www.luz.philips.com/latam/archives/metodo_lumens.htm>. Acesso em: 23 nov. 2011.

SÃO PAULO. Prefeitura Municipal. Ilume Moderniza Iluminação da Rua do Arouche. 23 mar. 2011. Disponível em: <<http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/servicos/noticias/?p=26385>>. Acesso em: 18 nov. 2011.

Schorsch. Lighting Design Glossary - Scotopic Vision. Disponível em: <<http://www.schorsch.com/en/kbase/glossary/scotopic-vision.html>>. Acesso em: 12 nov. 2011.

Scribd. Grandezas Usadas em Luminotecnia. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/55458894/BasesGerais-Luminoteca>>. Acesso em: 22 out. 2011.

SENAI - Unidade Pato Branco. Tipos de Lâmpadas. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAPOIAE/tipos-lampadas>>. Acesso em: 06 nov. 2011.

VITÓRIA, Renato. Nova Tecnologia Aponta Para a Redução de Custo do LED. Portal do LED: 2011. Disponível em: <<http://www.portaldoled.com/2011/03/nova-tecnologia-aponta-para-a-reducao-de-custo-do-led/>>. Acesso em: 10 nov. 2011.

Vivalux. China LED Manufacturer - Products Catalog. Disponível em: <<http://www.china-led-manufacturer.com/china/led-component.htm>>. Acesso em: 10 nov. 2011.

Wikipédia. Fator de Potência. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Fator_de_potência>. Acesso em: 04 nov. 2011.

Wikipédia. Visão Escotópica. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Visão_escotópica>. Acesso em: 12 nov. 2011.

ANEXOS

BASES DE LÂMPADAS

Na Figura 76, a seguir, vê-se bases de alguns tipos de lâmpadas para que as mesmas possam se conectar aos soquetes adequados. As medidas são feitas em milímetro.

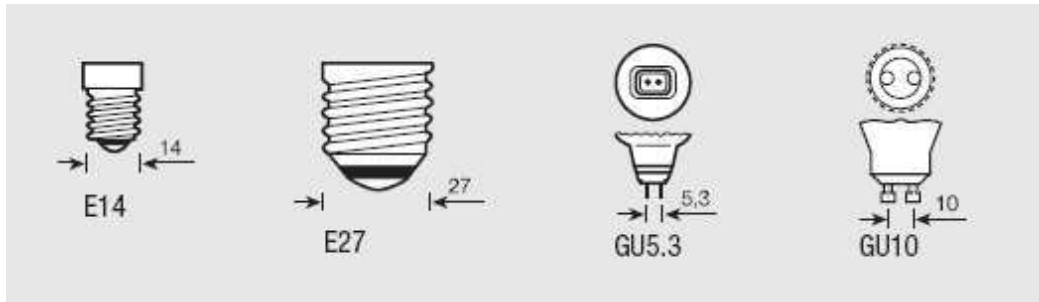


Figura 76. Diferentes bases de lâmpadas
Fonte: OSRAM – Catálogo LAMPLEDS, 2011.

ESPECTRO DO LUXÍMETRO

Na Figura 77, a seguir, verifica-se que o espectro do luxímetro considera apenas a visão fotópica para efetuar a leitura da iluminância em um ambiente.

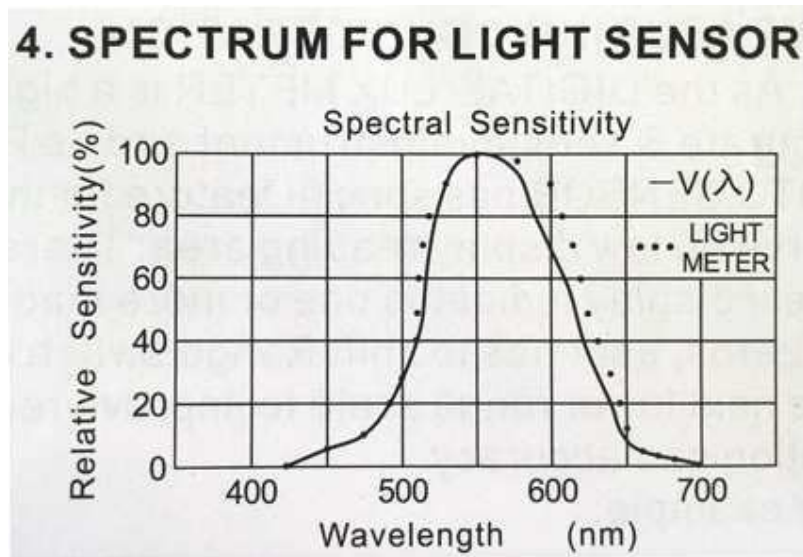


Figura 77. Espectro de leitura do luxímetro
Fonte: Manual do Luxímetro CE LX-1010B, 2012.

CÁLCULO DO kWh MÉDIO

A tarifação adotada pela a UFCG é a horo-sazonal verde, desta forma, o valor do kWh (energia) varia com o horário do dia e o período do ano da seguinte forma:

- Horário de ponta: 17h30min às 20h30min exceto os sábados e domingos;
- Horário fora de ponta: horas complementares incluindo os sábados e domingos;
- Seco: de maio a novembro;
- Úmido: de dezembro a abril.

A partir do site da Energisa Paraíba, foram obtidos os seguintes valores:

Tabela 16. Diferentes valores do kWh na tarifação horo-sazonal verde da Energisa.

| Horário | Período | Valor do kWh |
|---------------|---------|--------------|
| Ponta | Seco | R\$ 1,44321 |
| Ponta | Úmido | R\$ 1,41098 |
| Fora de Ponta | Seco | R\$ 0,20438 |
| Fora de Ponta | Úmido | R\$ 0,18569 |

Sabe-se que:

- As lâmpadas do ginásio são ligadas das 17h30min às 23h30min, ou seja, 3h no horário de ponta e 3h no horário fora de ponta;
- O ginásio funciona todos os dias da semana inclusive à noite;
- Considerando um mês com 30 dias teríamos 8,57 finais de semana, ou seja, sábados adicionados aos domingos por mês.

Com o que foi exposto acima, calcula-se o preço do kWh médio como:

$$\text{Preço kWh}_{MED} = \frac{(T \cdot Pr)_{Ponta\ Seco} + (T \cdot Pr)_{Ponta\ Úmido} + (T \cdot Pr)_{ForaPonta\ Seco} + (T \cdot Pr)_{ForaPonta\ Úmido}}{T_{ANO}}$$

$$\text{Preço kWh}_{MED} = \frac{(3 \cdot 7 \cdot 21,43 \cdot 1,44) + (3 \cdot 5 \cdot 21,43 \cdot 1,41) + (3 \cdot 7 \cdot 38,57 \cdot 0,20) + (3 \cdot 5 \cdot 38,57 \cdot 0,18)}{6 \cdot 30 \cdot 12}$$

$$\text{Preço kWh}_{MED} = 0,637 \frac{R\$}{kWh}$$