



Departamento
de Engenharia Eletrotécnica

Melhoria do desempenho das lâmpadas LED através de novo conceito de design, conceção, fabrico e utilização

Trabalho de Projeto apresentado para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Eletrotécnica - Área de Especialização em
Automação e Comunicações em Sistemas Industriais

Autor

Alekssander Gomes Santiago

Orientador

Prof. Dr. Paulo José Gameiro Pereirinha

Professor do Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Supervisor

Eng. Paulo Paiva Monteiro

CWJ Projecto, SA

Coimbra, maio de 2017

Agradecimentos

Contei com o apoio direto e indireto de muitas pessoas na realização deste trabalho. A todos o meu muito obrigado.

Contudo, destaco o apoio de alguns que mais do que outros tiveram um contributo especial.

Ao Engenheiro João Paulo Carvalho, por ser o principal impulsionador na minha tomada de decisão para finalização do mestrado.

Ao Professor Doutor Paulo José Pereirinha, pelo seu acompanhamento durante vários anos, sem nunca ter colocado em causa as minhas capacidades e sempre disponível para me orientar na conquista deste objetivo.

Ao Engenheiro Paulo Paiva Monteiro, pela sua amabilidade e total disponibilidade para me ensinar sempre que necessitei.

Ao Engenheiro José Luís de Jesus, pelo seu apoio e disponibilidade para me auxiliar na compreensão de matérias que necessitei dominar durante este percurso.

À empresa CWJ Power Electronics, SA., pelos recursos que me disponibilizaram.

E por fim a minha querida mãe, que dentro das suas limitações sempre fez o que para muitos seria impossível para que eu estudasse e alcançasse os meus sonhos.

A todos dedico este trabalho!

Resumo

Este projeto apresenta o conceito de um produto (Casquilho Eletrónico Ativo e Base Eletrónica Ativa) para aplicação em iluminação geral com tecnologia de Luz em Estado Sólido, mais conhecida por LED, acrónimo inglês para *Light Emitting Diode* (díodo emissor de luz). Neste produto, através de simples reestruturação da construção das lâmpadas, sem desenvolvimento de novas tecnologias, é alcançada a melhoria da eficiência das lâmpadas, melhoria do desempenho, aumento da fiabilidade e do tempo de vida. É também obtida a redução dos custos de fabrico, comercialização e reposição do produto em funcionamento, sem nunca comprometer a fiabilidade do produto a segurança do utilizador.

Durante o trabalho é apresentado o contexto no qual todo o trabalho se enquadra, o estado da arte da iluminação geral, as tecnologias atuais e o seu potencial futuro, o *roadmap* para a iluminação LED como a tecnologia mais promissora e suas vantagens e limitações.

De seguida é apresentado o conceito de produto pensado, dividido em varias fases: o desenvolvimento do conceito, a implementação dos módulos constituintes e os ensaios laboratoriais.

Palavras chave: Iluminação geral, Lâmpadas, Lâmpadas LED, Eficiência energética, Otimização, Sustentabilidade, Fontes comutadas (*switch mode power supply* – SMPS)

Abstract

This document presents the concept of a general lighting product (Active Electronic Socket and Active Electronic Base) with Solid State Lighting technology, better known as LED, acronym for Light Emitting Diode. In the work described in this document, through simple lamp's construction restructuring, without the development of new technologies, is achieved an improvement of general lighting lamps efficiency, performance, reliability and life-time. Also is obtained the reduction of manufacturing, sell and replacement costs of the product, without compromising its reliability or user safety.

In this report, the context in which all work is framed, the state of the art of general lighting, current technologies and their future potential, the roadmap for LED lighting, as the most promising technology and their advantages and limitations are presented.

Next, the concept of the product is presented, spread through several phases: the creation of the concept, the implementation of each modules that integrate the product and the tests.

Keywords: *General lighting, Lamps, LED lighting, Energy efficiency, Optimization, Sustainability, Switch mode power supply (SMPS)*

Apresentação da CWJ Projecto, SA

O autor contou com o apoio da CWJ Projecto, SA, que lhe facultou ferramentas, materiais e meios para a realização deste trabalho.

A CWJ Projecto, SA é uma empresa do grupo CWJ Power Electronics, em conjunto com a CWJ Componentes, SA.

Fundada em 1997 como uma “*start-up*” da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, a CWJ criou, desde a sua fundação, um compromisso empresarial baseado na inovação tecnológica na área da eletrónica.

Assim, com uma estratégia direcionada para o desenvolvimento e fabrico de soluções eletrónicas à medida de cada parceiro, a CWJ assume uma posição de liderança em I&DT nas seguintes áreas de atividade:

- Telecomunicações
- Aplicações Eléctricas e Eletrónicas
- Automóvel
- Refrigeração e AVAC
- Iluminação Pública, Doméstica, Comercial e Industrial a LED

O trabalho desenvolvido enquadra-se na última área de atividade mencionada: “Iluminação Pública, Doméstica, Comercial e Industrial a LED”.

Índice

1.	Introdução	1
1.1	Enquadramento Tecnológico	1
1.2	Objetivos	4
1.3	Estruturação	4
2.	Enquadramento Social, Económico e Legal	5
2.1	O caminho para a sustentabilidade.....	8
3.	Estado da Arte da Iluminação Geral	11
3.1	Lâmpada Incandescente	11
3.1.1.	Saída de serviço (<i>Phase-out</i>) das lâmpadas incandescentes.....	14
3.1.2.	Previsões futuras	15
3.2	Lâmpada de Halogéneo.....	17
3.3	Lâmpada Fluorescente Compacta	20
3.4	LED (<i>Light Emitting Diodes</i>).....	24
4.	Lâmpadas LED como lâmpadas de iluminação geral	33
4.1	Estado da Arte.....	33
4.2	Construção da Lâmpada LED	34
4.3	Formas e geometria da Lâmpada	36
4.4	Estrutura de Custos Lâmpada LED	36
4.5	<i>Roadmap</i> para o futuro das lâmpadas:	38
4.6	Análise crítica às lâmpadas LED para iluminação geral	38
4.7	Proposta de otimização do <i>design</i> das lâmpadas.....	41
5.	Conceito de Produto.....	45
5.1	Vantagens do conceito	46
5.2	Desvantagens do conceito:.....	47
5.3	Imagem primordial do conceito de produto	48
5.4	Prova de conceito	49
5.4.1.	Requisitos para conceção do protótipo do AES e da AEB	49
5.4.2.	Obtenção das peças mecânicas.....	50
5.4.3.	Obtenção da fonte de alimentação e regulador de corrente para o LED	52
5.4.4.	Obtenção do protótipo do produto.....	76
5.4.5.	Ensaio Térmicos	85
6.	Conclusão	95
7.	Referências.....	97
8.	Lista de Anexos	101

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Evolução do consumo de energia por tipo de fonte desde a Revolução Industrial nos EUA (U.S. Energy Information Administration, 2011)	5
Figura 2.2 – Evolução da população mundial desde a Revolução Industrial e previsão para os próximos 100 anos (Our World In Data, 2010)	6
Figura 2.3 – Representação da evolução das necessidades dos habitantes do planeta pelos recursos disponíveis (Global Footprint Network, 2016)	7
Figura 2.4 – Pegada Ecológica vs Bio-capacidade em Portugal desde 1961 (Global Footprint Network, 2012)	7
Figura 2.5 – Metas da diretiva para Ecodesign (European Commission, s.d.).....	8
Figura 3.1 – Constituição da lâmpada incandescente (Tisva Illuminology, 2015)	12
Figura 3.2 – Representação da escala das temperaturas de cor (Lighting Design Lab, s.d.)	12
Figura 3.3 – Representação do funcionamento do <i>dimming</i> por triac (Lumos Lighting, s.d.).....	13
Figura 3.4 – Esquema base de um <i>dimmer</i> por triac (Digikey, s.d.).....	13
Figura 3.5 – Espectro de emissão de uma lâmpada incandescente (ledlampinchina.wordpress.com, s.d.)	14
Figura 3.6 – Imagem da prova de conceito da nova tecnologia para lâmpadas incandescentes (BBC, 2016).....	15
Figura 3.7 – Lâmpada Incandescente de Halogéneo (emaze.com, s.d.)	17
Figura 3.8 – Espectro da Lâmpada de Halogéneo (Wikidot, 2011).....	18
Figura 3.9 – Diagrama fotométrico da lâmpada incandescente convencional e halogéneo – representação tridimensional (Electrical Engineering Portal, s.d.).....	19
Figura 3.10 – Lâmpada Fluorescente Compacta (fire9prevention.wordpress.com, s.d.)	20
Figura 3.11 – Constituição da lâmpada CFL (Center for Climate and Energy Solutions, 2011).....	21
Figura 3.12 – Comparação de uma CFL 13 W com uma Lâmpada Incandescente de 60 W relativamente a produção de mercúrio (Energy Star, 2010).....	22
Figura 3.13 – Diagrama Espectral da lâmpada CFL (Topbulb, s.d.)	23
Figura 3.14 – Logótipo do programa WEEE (Clarion, s.d.)	24
Figura 3.15 – Símbolo eletrónico do LED (semelhante ao díodo).....	25
Figura 3.16 – Junção p-n no LED (quora.com, s.d.).....	25
Figura 3.17 – Construção do LED de potência (researchgate.net, s.d.)	26
Figura 3.18 – Exemplo de curva Fluxo Luminoso Relativo vs Corrente, LED CREE XT-E (CREE)	26
Figura 3.19 – Curva de tempo de vida de um produto, determinado pelo método B10, B50 (Philips)	28
Figura 3.20 – Curvas de variação do fluxo luminoso ao longo do tempo de vida do LED Philips Luxeon K2, para temperatura de junção $T_j=125\text{ }^\circ\text{C}$ (Philips).....	29
Figura 3.21 – Curvas de variação do fluxo luminoso ao longo do tempo de vida do LED Luxeon K2, para uma corrente fixa de 1,5A (Philips).....	29
Figura 3.22 – Curva de tempo de vida do LED Philips Luxeon K2, em função da corrente e da temperatura de junção (Philips).....	29
Figura 3.23 – Switch LED Bulb (electronicdesign.com, s.d.)	30
Figura 3.24 – GE Lighting Soft White (apartmenttherapy.com, s.d.).....	30
Figura 3.25 – Philips CorePro LEDbulb (Philips Lighting, s.d.).....	30
Figura 3.26 – CREE LED 60 W replacement (geek.com, s.d.)	30
Figura 3.27 – Previsão da evolução das tecnologias dos LED (DOE, 2016).....	31
Figura 4.1 – Exemplos de lâmpadas que definem o estado da arte das lâmpadas LED para iluminação geral (CREE 60 W; Philips 60 W; Philips 100 W; GE 100 W; CREE 100 W).....	34
Figura 4.2 – Constituição típica de uma lâmpada LED (Electronic Engineering Time, s.d.).....	34
Figura 4.3 – Exemplo de um driver tipo para controlo da corrente dos LED, em topologia <i>flyback</i> (Green, 2011)	36
Figura 4.4 – Estrutura de custos de uma lâmpada LED para iluminação geral, equivalente a incandescente 60 W (DOE, 2014)	37
Figura 4.5 – Previsão para evolução dos custos das lâmpadas LED para iluminação geral (DOE, 2014).....	37
Figura 4.6 – Lâmpada Philips CorePro LEDbulb (Philips Lighting, s.d.)	39
Figura 4.7 – Diagrama fotométrico da Lâmpada Philips CorePro LEDbulb	39
Figura 4.8 – Exemplo de temperaturas que a superfície de uma lâmpada LED pode atingir (LIFX, s.d.)	40
Figura 5.1 – Representação do Conceito de Produto	45
Figura 5.2 – Imagem Primordial do Conceito de Produto: (a) Casquilho AES; (b) Base AEB; (c) Encaixe entre AES e AEB	48
Figura 5.3 – Representação 3D do casquilho AES em diferentes vistas.....	50
Figura 5.4 – Representação 3D da base AEB em diferentes vistas.....	50
Figura 5.5 – Representação 3D da Fonte de Alimentação	50
Figura 5.6 – Representação 3D da integração do casquilho, case e fonte de alimentação.....	51
Figura 5.7 – Peças mecânicas AES e AEB obtidas por impressão 3D	51
Figura 5.8 – Modos de operação do conversor <i>flyback</i> (Infineon Technologies)	52

Figura 5.9 – Comparação dos modos de operação do conversor <i>flyback</i> (Infineon Technologies).....	53
Figura 5.10 – Estrutura dos módulos eletrônicos do produto	53
Figura 5.11 – Conversor DC-DC <i>flyback</i> (elprocus.com, s.d.).....	54
Figura 5.12 – Operação do conversor <i>flyback</i> (Wikipedia.org, s.d.)	55
Figura 5.13 – Formas de onda fundamentais do <i>flyback</i> (Wikipedia.org, s.d.)	55
Figura 5.14 – InnoSwitch INN2904 K, Power Integrations (Power Integrations, 2016).....	56
Figura 5.15 – Esquema base para utilização do controlador INN2904 K (Power Integrations, 2016).....	57
Figura 5.16 – Funcionamento do controlador INN2904 K consoante a potência requerida (Power Integrations, 2016).....	58
Figura 5.17 – Bloco do Filtro EMI e da retificação da corrente AC	59
Figura 5.18 – Formas de onda da tensão e da corrente típicas das fontes comutadas sem correção do fator potência (On Semiconductor).....	60
Figura 5.19 – Constituição do circuito de <i>clamping</i> utilizado	62
Figura 5.20 – Representação detalhada das formas da corrente nos enrolamentos do transformador (On Semiconductor, 2000)	63
Figura 5.21 – Esquema base fornecido pelo fabricante	66
Figura 5.22 – Esquema do circuito de controlo de corrente	66
Figura 5.23 – Vista <i>top</i> da conceção do PCB no PCB Editor da OrCAD	68
Figura 5.24 – Vista <i>bottom</i> da conceção do PCB no PCB Editor da OrCAD	68
Figura 5.25 – PCB em fase inicial da soldadura dos componentes SMD.....	69
Figura 5.26 – Protótipo da fonte com componentes assemblados	69
Figura 5.27 – Tensão da rede	70
Figura 5.28 – Tensão da rede retificada (tempo descarga do condensador)	71
Figura 5.29 – Tensão da rede retificada (<i>ripple</i> da tensão do barramento DC do primário)	71
Figura 5.30 – Sobreposição tensão da rede e a tensão retificada.....	71
Figura 5.31 – Tensão V_{DS} no MOSFET do regulador INN2904 K	72
Figura 5.32 – Corrente no circuito <i>clamping</i> / Tensão aos terminais da resistência 47R	73
Figura 5.33 – Corrente no enrolamento primário do transformador ($R_{sensora}=100\text{ m}\Omega$)	74
Figura 5.34 – Tensão de saída da fonte	75
Figura 5.35 – Corrente nos LED (step-down) (sinal filtrado 10kHz	75
Figura 5.36 – Corrente à saída da fonte (<i>step-down</i> ; sinal filtrado 10kHz; medido aos terminais das resistências sensoras do <i>step-down</i>).....	76
Figura 5.37 – Corrente à saída da fonte (<i>step-down</i> ; medido aos terminais das resistências sensoras do <i>step-down</i>).....	76
Figura 5.38 – Protótipo de AES assemblado	77
Figura 5.39 – Protótipo de AEB – conexão DC	77
Figura 5.40 – Protótipo de AEB – conexão DC	78
Figura 5.41 – Protótipo de AEB assemblado (2 saídas)	78
Figura 5.42 – Dissipador e ótica utilizados nos protótipos	79
Figura 5.43 – CREE MT-G2 (CREE)	79
Figura 5.44 – Montagem da lâmpada	80
Figura 5.45 – Módulos LED acoplados ao dissipador da lâmpada.....	81
Figura 5.46 – Lâmpada alimentada pelo AES através do AEB	81
Figura 5.47 – Especificações da cola térmica HY910 (Shenzhen Halnziye Electronics Co., Ltd., s.d.)	82
Figura 5.48 – Cola térmica HY910 (Shenzhen Halnziye Electronics Co., Ltd., s.d.).....	82
Figura 5.49 – Dow Corning CN-8760	83
Figura 5.50 – Impregnação do AEB	84
Figura 5.51 – Protótipo AES e lâmpada 12 W com AEB 2x165 mA (com fios termopares).....	85
Figura 5.52 – Evolução das temperaturas nos componentes críticos na montagem AES 230 V 15 W 40 V com Lâmpada DC de 8,5 W	88
Figura 5.53 – Evolução das temperaturas nos componentes críticos na montagem AES 230 V 15 W 40 V com Lâmpada DC 12W	89
Figura 5.54 – Resultados térmicos da lâmpada Philips 11 W 830 lm Dimmable Ambient LED Daylight (ledbenchmark.com, s.d.)	90
Figura 5.55 – Resultados térmicos da lâmpada GE 11 W 570 lm A19 Bulb (ledbenchmark.com, s.d.)	90
Figura 5.56 – Tesla Powerwall (Tesla, s.d.)	93

Índice de Quadros

Tabela 3.1 – Calendário do <i>Phase-Out</i> das incandescentes (European Commission, 2009)	15
Tabela 3.2 – Comparação de uma CFL 13 W com uma Lâmpada Incandescente de 60 W relativamente a produção de mercúrio (Energy Star, 2010).....	22
Tabela 3.3 – Variantes mais comuns das lâmpadas CFL (EE Publishers, s.d.)	23
Tabela 4.1 – Tabela resumo de caracterização do Estado da Arte de Lâmpadas LED para iluminação geral	33
Tabela 5.1 – Especificações para conceção da fonte de alimentação	53
Tabela 5.2 – Especificações para conceção do primeiro circuito regulador de corrente.....	54
Tabela 5.3 – Especificações para conceção do segundo circuito regulador de corrente	54
Tabela 5.4 – Caracterização elétrica da fonte de alimentação	69
Tabela 5.5 – Caracterização elétrica dos reguladores de corrente	70
Tabela 5.6 – Tabela de identificação dos equipamentos de medida	70
Tabela 5.7 – Características elétricas do LED CREE MT-G2 (CREE)	80
Tabela 5.8 – Característica fotométrica do LED CREE MT-G2 – Grupo P0 (CREE)	80
Tabela 5.9 – Principais propriedades do impregnante CN-8760 (Dow Corning)	83
Tabela 5.10 – Identificação do produtos sujeito a ensaio: AES.....	86
Tabela 5.11 – Identificação dos produtos sujeitos a ensaios: Lâmpada 8,5W	86
Tabela 5.12 – Identificação dos produtos sujeitos a ensaios: Lâmpada 12W	86
Tabela 5.13 – Identificação dos equipamentos de medida.....	87
Tabela 5.14 – Componentes caracterizados termicamente	87
Tabela 5.15 – Resultados do ensaio térmico com lâmpada DC de 8,5 W.....	88
Tabela 5.16 – Resultados do ensaio térmico com lâmpada DC de 12 W.....	89

1. Introdução

1.1 Enquadramento Tecnológico

A tecnologia *Solid State Light* (SSL), que pode ser traduzida por “Luz em Estado Sólido” (LES), tem-se revelado eficiente e eficaz na substituição das tecnologias existentes tais como filamentos incandescentes ou tubos fluorescentes. Através dos díodos emissores de luz (LED), a tecnologia SSL tem alcançado patamares de desempenho que há 10 ou 15 anos atrás pareciam impossíveis de alcançar: eficácia luminosa da ordem dos 200 lm/W, contrastando com os 15 lm/W das lâmpadas incandescentes ou 60 lm/W das lâmpadas fluorescentes (energy.gov, s.d.). Outras tecnologias aproximam-se dos LED, tais como Iodetos Metálicos ou Vapor de Sódio, mas operam a temperaturas extremamente elevadas (centenas de graus celsius), tornando-as perigosas para uso doméstico, e existem em versões de potências elevadas (de 70 W a 1000 W), com parâmetros de qualidade da luz não adequado para certos sectores de iluminação, como doméstico ou serviços (elevadas Temperatura de Cor e baixos Índice de Restituição da Cor).

Os LED têm ainda outras vantagens:

- Tempos de vida superior a 100000 h face às 1000 a 2000 h das lâmpadas incandescentes e 15000 h das lâmpadas fluorescentes;
- Facilidade e repetibilidade de fabrico; custos cada vez mais reduzidos;
- Índices de Restituição da Cor superiores a 90, equiparando-se às melhores fontes de luz artificial;
- Facilidade de controlo;
- Diversificação dos fabricantes de produtos e de componentes;
- Possibilidade de criação de *design* variados, com diversos formatos de lâmpadas e luminárias;
- Permite substituição direta de outras tecnologias como lâmpadas incandescentes ou de halogéneo, imitando as suas formas e dimensões (*retrofitting*);
- As lâmpadas com LED podem ser compatíveis com a rede de alimentação elétrica, com os casquilhos ou mecanismos de suporte e conexão na rede elétrica, comuns a outras tecnologias de iluminação, etc.

Contudo, os LED ainda estão longe daquilo que se pode considerar eficiente. A eficiência de uma fonte de luz é calculada em função da sua eficácia luminosa, rácio entre a quantidade total de luz visível emitida pela potência elétrica consumida e uma constante (683 lm/W), que define a sensibilidade máxima da visão fotópica. A eficácia luminosa máxima que uma fonte de luz pode obter é 683 lm/W, correspondendo a transformação de 1 W de energia elétrica em 1 W radiante de luz, facto que só se verifica se a fonte de luz é monocromática (um único comprimento de onda) (Murphy, 2013). Por exemplo, um LED com 200 lm/W, apenas 30 % (200 lm/W / 683 lm/W \approx 0,3) da energia fornecida é transformada em luz, pelo que os restantes 70 % são convertidos em calor, considerando que se despreza outras perdas, como luz

infravermelha, por serem demasiado reduzidas. Assim, por cada watt de energia elétrica fornecida aos LED, 700 mW são convertidos em calor. Isto resulta em alguns problemas logo à partida, que por sua vez criarão outros problemas em cadeia, que se passam a explicar: a elevada geração de calor nos LED obriga a que qualquer *design* de módulo, lâmpada ou luminária LED contemple a componente da dissipação térmica. Quanto mais eficaz for a dissipação térmica, melhor para o desempenho dos LED e do produto. Deficiente dissipação resulta no sobreaquecimento dos LED, resultando em:

- Perda de eficácia luminosa. Os LED emitem cada vez menos luz, com a mesma potência consumida;
- Redução do tempo de vida do LED. Valores de temperatura dos 120 °C aos 150 °C na junção do semicondutor podem significar redução exponencial do tempo de vida ou mesmo falha imediata;
- Necessidade de componentes eletrónicos, como condensadores eletrolíticos, maiores e mais robustos, logo também mais caros, para operar nas temperaturas elevadas. Esses componentes também têm o seu tempo de vida e fiabilidade fortemente afetados pela temperatura. Para se ter uma ideia, como uma espécie de “regra da mão direita”, um aumento de temperatura de 10 °C reduz para metade o tempo de vida dos condensadores, que são fundamentais para as fontes de alimentação ou *drivers* dos LED;
- Maiores cuidados no projeto, na seleção e disposição dos materiais que envolvem a lâmpada ou luminária. Foi recentemente noticiado que a CREE, um dos gigantes americanos no fabrico dos LED e das lâmpadas se viu obrigada a recolher mais de 112000 unidades de lâmpadas LED T8 porque peças plásticas das próprias lâmpadas e estruturas onde estavam colocadas, estavam a derreter nas casas dos consumidores devido ao calor excessivo gerado pela própria lâmpada. A falha era originada por um componente que se danificava no transporte ou manuseamento da lâmpada, causando grandes prejuízos ao fabricante e também ao consumidor. (CREE, 2016)

Para se ter um dissipador eficiente, é necessário, em primeiro lugar, área de dissipação, que normalmente é aumentada através da adição de alhetas. Também é necessário ter volume adequado de material para melhor conduzir o calor desde a fonte até as alhetas para ser transferido para o ar. Para que a condutividade desse dissipador seja boa, normalmente opta-se por usar alumínio. Contudo, o peso das lâmpadas aumenta de duas ou três dezenas de gramas para duas ou três centenas de gramas, podendo ser uma séria limitação para algumas estruturas que já existem e que foram pensadas para as lâmpadas convencionais de peso reduzido, principalmente quando são estruturas para múltiplas lâmpadas.

As evoluções tecnológicas que se têm alcançado, têm resultado na melhoria dos LED, que vão ficando mais eficientes. Mas essa evolução não é suficiente, até porque a própria tecnologia usada atualmente para gerar luz branca (LED azul com camada de fósforo depositada sobre a junção) tem as suas limitações e as previsões não apontam para valores muito altos. Mesmo que se consiga mais 20% de eficiência, isso corresponderia a apenas 50% de eficiência no total. Ou se obtém uma mudança de tecnologia para outras com menores limitações ou as melhorias conseguidas não serão muito além do atual estado da arte. Uma vez que ainda não está

disponível outra tecnologia, é necessário maximizar a eficiência e eficácia dos produtos de iluminação, neste caso específico, das lâmpadas de iluminação geral, para tirar máximo partido das suas capacidades.

Outra característica não otimizada na grande maioria das lâmpadas LED para iluminação geral, as lâmpadas não direcionais, é o seu diagrama fotométrico. A grande maioria das lâmpadas LED só emitem luz num dos hemisférios, porque o outro hemisfério do globo da lâmpada é normalmente necessário para colocação do dissipador e encapsulamento da fonte de alimentação no interior da lâmpada. Isto limita as aplicações da lâmpada. Muitas são as aplicações em que a lâmpada fica montada com o casquilho orientado para a área que se pretende iluminar, que corresponde exatamente ao hemisfério da lâmpada que não emite luz. Isto significa que a zona a iluminar apenas recebe luz indireta, refletida no ambiente ou componentes óticos de uma luminária. Em alguns casos pode ser vantajoso, em outros, muito desvantajoso. O ideal seria, eventualmente, o consumidor escolher bem a lâmpada consoante a aplicação, mas isso nem sempre se verifica, muito também por falta de opções no mercado visto que a grande maioria das lâmpadas tem essa limitação. Em alternativa, a lâmpada deveria ser completamente omnidirecional, à semelhança das suas antecessoras incandescentes ou fluorescentes compactas, aplicáveis a todas as situações.

É ainda necessário desmistificar uma certa crença de que as lâmpadas LED não iluminam bem. Normalmente, estão apenas limitadas por aquilo que se definiu e aceitou como padrão para lâmpada LED, ou então mal concebidas.

O que se propõe então fazer neste trabalho? O autor, como *designer* e projetista de lâmpadas, luminárias e sistemas de iluminação, analisou o estado da arte, os métodos de conceção e fabrico das lâmpadas LED, o mercado e eventual aceitação ou rejeição de novos produtos e conceitos e determinou uma solução muito simples, que incide no conceito, conceção, fabrico e utilização das lâmpadas LED. Sem efetuar qualquer mudança na tecnologia, este conceito:

- Reduz o custo de fabrico e, por decorrência, de comercialização;
- Contribui para o aumento substancial do tempo de vida das lâmpadas;
- Reduz a temperatura de operação e a dimensão e peso dos dissipadores, possibilitando o aumento da potência da lâmpada para o mesmo volume;
- E, por fim, permite melhorias nas características fotométricas das lâmpadas, sem interferir com o desempenho funcional da mesma.

A referida solução passa por adotar lâmpadas com *drivers* externos. No decorrer do trabalho, serão expostos os motivos de não ser uma solução utilizada atualmente, visto que em luminárias encastráveis já é utilizado por muitos fabricantes. Será também apresentado o método para fazê-lo e explicado como esta simples mudança pode contribuir tão fortemente para as melhorias nas lâmpadas LED para iluminação geral.

1.2 Objetivos

Com o presente projeto, pretende-se desenvolver um conceito de um produto que represente um novo método construtivo e de utilização de Lâmpadas LED para iluminação geral. Este método deverá reduzir os custos de fabrico e de comercialização, contribuindo para melhorias no desempenho da lâmpada, para o aumento substancial do seu tempo de vida, para redução da temperatura de operação, da dimensão e do peso das lâmpadas. Possibilitará também o aumento da potência da lâmpada, para um mesmo volume ou mesmo reduzindo-o, e para melhoria da fotometria da lâmpada, uma vez que possuirá mais volume e área superficial para colocação de superfícies emissoras de luz.

Em termos práticos, o que se pretende obter é uma solução convertível em produto, ainda que não na sua forma final, que permita a implementação do conceito “lâmpada para iluminação geral com *driver* não integrado”, que seja barato de produzir, de preferência mais barato do que as lâmpadas e seus acessórios; que implemente, ou melhor, permita a implementação das melhorias referidas nos vários aspetos da lâmpada; e que seja comercializável, ou seja, que possa ser introduzido no mercado como solução com previsão de boa taxa de aceitação por parte do mercado, ou pelo menos não rejeição.

1.3 Estruturação

Após o capítulo da Introdução, o trabalho está estruturado em quatro partes fundamentais: fundamentação teórica; desenvolvimento do conceito; implementação prática; e, por fim, ensaios laboratoriais, apresentação, discussão dos resultados e a conclusão.

Na fundamentação teórica abrange os Capítulos 2, 3 e 4. No Capítulo 2 é apresentado todo o suporte teórico que deu origem à premissa da tese. É feita uma contextualização tecnológica, socioeconómica e legal que envolve a iluminação LED, lâmpadas para iluminação geral e o produto desenvolvido e apresentado. No capítulo 3 é apresentado o estado da arte da iluminação geral. São apresentadas as tecnologias usadas atualmente e as perspetivas para o futuro dessas mesmas tecnologias. O capítulo 4 foca exclusivamente sobre a tecnologia LED e as lâmpadas LED.

Ao longo do Capítulo 5 é apresentado o desenvolvimento do conceito, a implementação prática e termina com a apresentação e discussão dos ensaios laboratoriais. No desenvolvimento do conceito, são apresentadas as especificidades do conceito, as suas vantagens e os cálculos teóricos de dimensionamento. Na implementação prática é apresentado um protótipo do produto, com a finalidade de servir de prova de conceito e mostrar que o mesmo é implementável. Termina-se com a análise dos resultados, por forma a concluir se os objetivos propostos foram obtidos ou não.

2. Enquadramento Social, Económico e Legal

A evolução tecnológica que se iniciou no século XIX com a Revolução Industrial trouxe ao mundo um novo conceito de vivência. A busca e obtenção de novos meios e processos de manufatura possibilitaram e facilitaram a transformação dos recursos naturais de forma a satisfazer as necessidades da sociedade.

O aumento da população mundial, a evolução da sociedade e a necessidade de melhoria da qualidade de vida da população, por sua vez, forçaram a evolução da indústria. Com a evolução da indústria, novas tecnologias surgiram para fazer mais, melhor, mais depressa, mais barato e utilizando menos recursos. Mas durante muitos anos, este último ponto foi negligenciado, fazendo com que o uso desregrado de recursos levasse o planeta ao limite das suas capacidades.

Desde a revolução industrial, o consumo de energia no planeta aumentou mais de 20 vezes, tal como apresentado na Figura 2.1, enquanto que a população mundial aumentou aproximadamente 7 vezes no mesmo período de tempo, evolução que se pode observar na Figura 2.2.

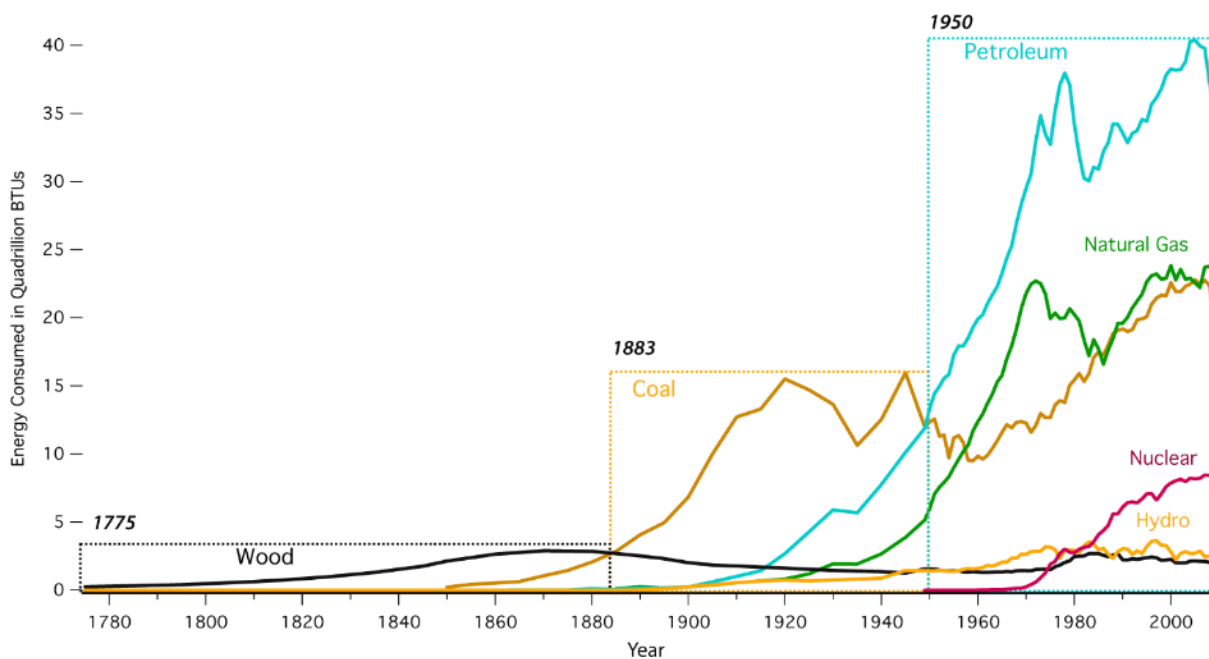


Figura 2.1 – Evolução do consumo de energia por tipo de fonte desde a Revolução Industrial nos EUA (U.S. Energy Information Administration, 2011)

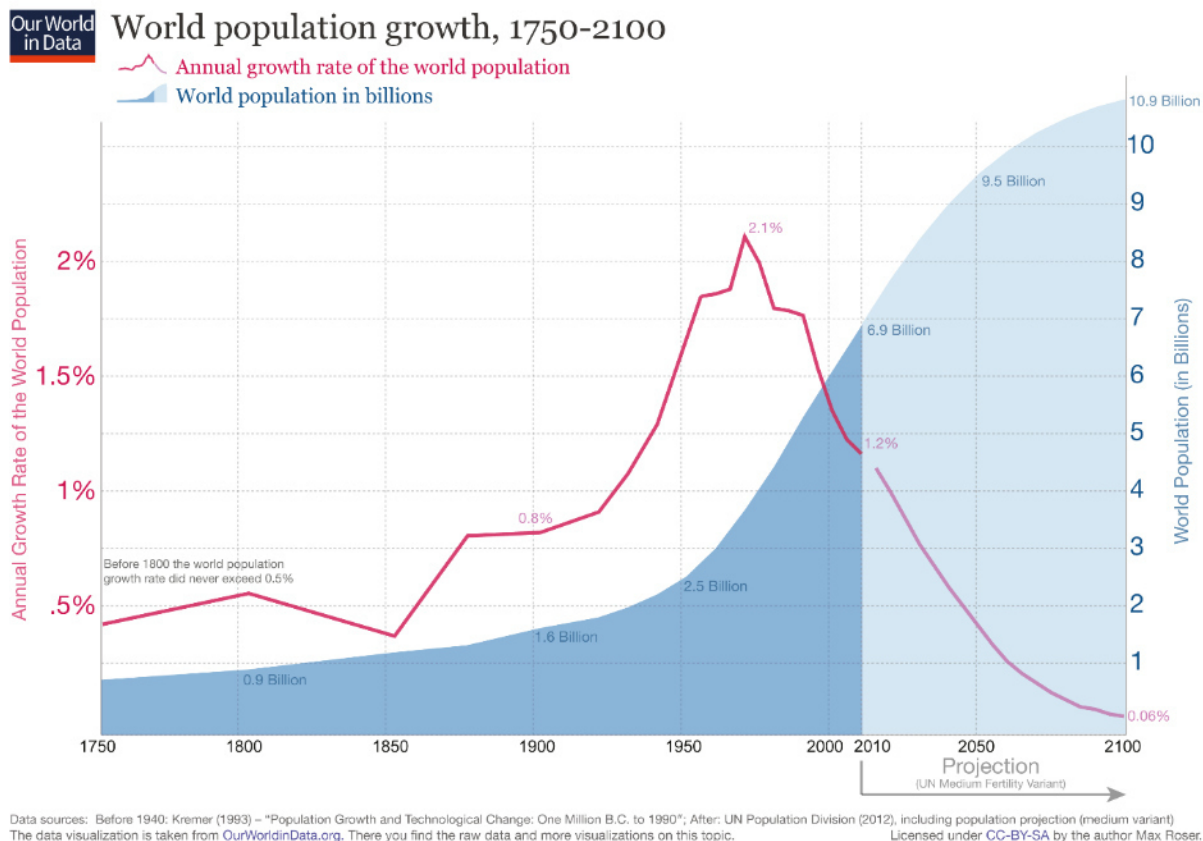


Figura 2.2 – Evolução da população mundial desde a Revolução Industrial e previsão para os próximos 100 anos (Our World In Data, 2010)

Isto significa que por cada habitante do planeta, a necessidade energética aumentou cerca de três vezes, tendo em consideração os padrões de consumo e de utilização da energia ao longo desse período.

Como resultado desse aumento e do desejo de melhorar a eficiência energética, novas formas de produção de energia foram aparecendo ao longo destes dois séculos, tais como a queima dos combustíveis fósseis e a energia nuclear. Outro resultado foi ainda o aumento da poluição e dos resíduos.

Foi recentemente verificado um conjunto de alterações pelas quais o nosso planeta tem passado: o aumento da temperatura média do globo, o degelo das reservas de água doce do planeta e o resultante aumento do nível médio da água do mar, o desaparecimento de espécies, aumento de fenómenos naturais com efeitos catastróficos, tais como tornados, furacões, inundações, etc. (National Geographic, s.d.) Esses efeitos devem-se em grande parte ao aquecimento global, associado à emissão de gases poluentes na atmosfera, que provêm da produção e uso da energia sob as suas diversas formas, principalmente o que envolve a queima de combustíveis fósseis. (National Geographic, s.d.)

Segundo a *Global Footprint Network*, a população mundial atual necessita de 1,6 vezes os recursos do planeta para manter o seu atual modo de vida, considerando a média do consumo de recursos por cada habitante do planeta. A Figura 2.3 ilustra a evolução da pegada ecológica global, em função da capacidade de fornecimento de recursos do planeta.

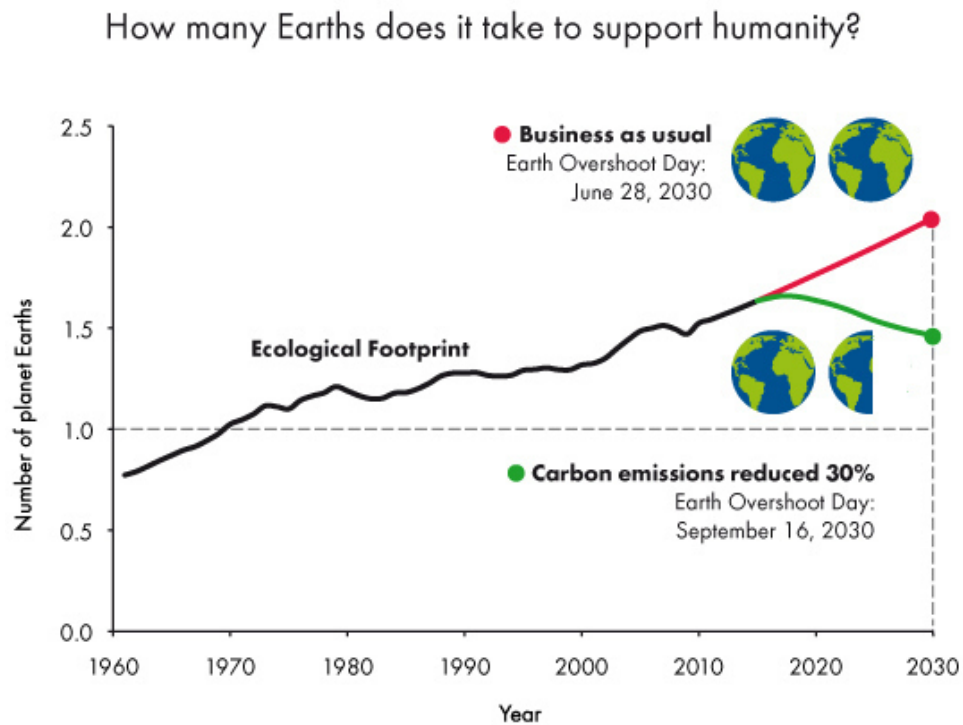


Figura 2.3 – Representação da evolução das necessidades dos habitantes do planeta pelos recursos disponíveis (Global Footprint Network, 2016)

No caso específico de Portugal, a mesma informação está apresentada na Figura 2.4, abaixo.

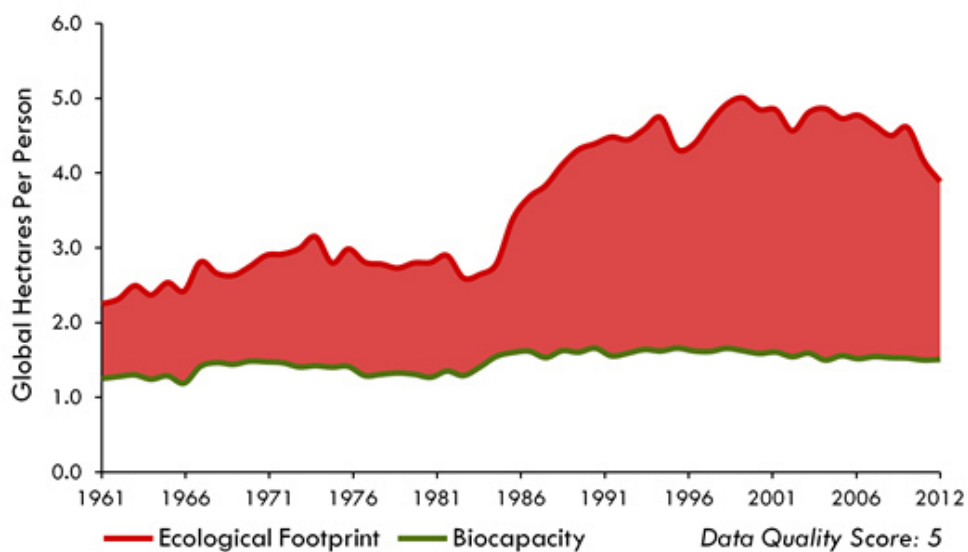


Figura 2.4 – Pegada Ecológica vs Bio-capacidade em Portugal desde 1961 (Global Footprint Network, 2012)

Desta forma está provado que o nosso modo de vida atual não é sustentável e é necessário fazerem-se mudanças em direção à sustentabilidade.

2.1 O caminho para a sustentabilidade

A *Environmental Protection Agency* (EPA) diz o seguinte sobre a sustentabilidade: “Tudo o que precisamos para a nossa sobrevivência e bem-estar depende, direta ou indiretamente, do nosso ambiente natural. Buscar a sustentabilidade é criar e manter as condições em que os seres humanos e a natureza podem coexistir em harmonia produtiva para sustentar as gerações atuais e futuras”. (U.S. Environmental Protection Agency, s.d.)

Neste sentido, têm sido tomadas medidas pelos governos de todo o mundo para reduzir consumos de energia, melhorar eficiências das tecnologias existentes, desenvolver novas tecnologias mais eficientes e reduzir e eliminar resíduos poluentes. Grupos de trabalhos foram criados para redigir diretivas, regulamentos e normas que obriguem à melhoria contínua da eficiência dos produtos consumidores de energia. Programas foram desenvolvidos para recolha, tratamento e reaproveitamento de resíduos.

De entre as mais famosas, e provavelmente as que maior impacto direto têm nos produtos do dia-a-dia de um cidadão comum, estão a Diretiva Europeia de Ecodesign e a Directiva Europeia para Rotulagem Energética. Estas enquadram-se da seguinte forma: “Há uma procura mundial por produtos mais eficientes para reduzir consumo de energia e de recursos. A legislação da UE para Ecodesign e Rotulagem Energética são ferramentas eficazes para melhorar a eficiência energética dos produtos. Elas ajudam a eliminar os produtos de menor desempenho do mercado, contribuindo significativamente para o objetivo de eficiência energética da UE para 2020. Também suportam a competitividade industrial e inovação, promovendo a melhoria do desempenho ambiental dos produtos ao longo do Mercado Interno.” (European Commission, s.d.)

Diretiva para Ecodesign (2009/125/EC), “prevê regras coerentes à escala da UE para melhorar o desempenho ambiental dos produtos, como eletrodomésticos, tecnologias de informação e comunicação ou engenharia. A diretiva estabelece requisitos mínimos obrigatórios para a eficiência energética destes produtos. Isso ajuda a evitar a criação de barreiras ao comércio, melhorar a qualidade do produto e proteção ambiental.” (European Commission, 2009)

Esta diretiva tem como meta os seguintes valores de poupança para cada tipo de aparelho, resumidos na Figura 2.5:

Ecodesign Measure	Adoption	Estimated annual savings by 2020
Standby	December 2008	35 TWh
Simple set top boxes	February 2009	6 TWh
Street & Office Lighting	March 2009	38 TWh
Domestic Lighting	March 2009	39 TWh
External power supplies	April 2009	9 TWh
Electric motors	July 2009	135 TWh
Circulators	July 2009	23TWh
Domestic refrigerators	July 2009	4 TWh
Televisions	July 2009	28 TWh
Domestic dishwashers	November 2010	2 TWh
Domestic washing machines	November 2010	1.5 TWh
Energy efficient	March 2011	74 TWh

Figura 2.5 – Metas da diretiva para Ecodesign (European Commission, s.d.)

As metas propostas formam uma substancial quantidade de energia.

A iluminação doméstica representa aproximadamente 10,7% do objetivo total de poupança da direta. Pode-se considerar como uma meta ambiciosa.

Diretiva para Rotulagem Energética (2010/30/EU), complementa a Diretiva para Ecodesign com requisitos de rotulagem obrigatória para produtos consumidores de energia. Normalmente recorre a escalas alfabéticas de classificação dos produtos. (European Commission, 2010)

Nos EUA, o programa *Energy Star* do *Department of Energy* (DOE) tem um propósito semelhante.

3. Estado da Arte da Iluminação Geral

A iluminação é indispensável na nossa sociedade atual. Em qualquer parte do mundo, a iluminação faz parte das necessidades básicas da sociedade.

Na União Europeia, o consumo de energia elétrica em iluminação no Sector Residencial representa mais de 12% do consumo total do sector. Cerca de 20% da fatura de eletricidade de uma habitação é devida à iluminação e no sector dos serviços, essa percentagem, pode chegar até 60%. As percentagens são semelhantes quando se refere a Portugal. (DGEG, s.d.) Portanto, não é descabida a atenção das organizações e governos para se alcançar a eficiência energética no sector da iluminação.

Desde os primórdios da iluminação artificial que as eficiências obtidas são reduzidas. Por mais de um século, as lâmpadas incandescentes foram utilizadas como principal forma de iluminação artificial. Estas lâmpadas têm uma eficiência abaixo de 5%. Ou seja, de toda a energia consumida, menos de 5% é transformada em luz, sendo que o restante é maioritariamente transformado em calor e outras formas de luz, como infravermelhos, inútil para iluminação.

A “iluminação geral” refere-se à iluminação de espaços interiores residenciais, comerciais, industriais e serviços com finalidade de possibilitar tarefas visuais pelos utilizadores do espaço, independentemente da geometria ou fotometria do produto de iluminação. Oposta à iluminação geral estar-se-ia a falar de iluminação de sinalização, de emergência, pública ou sinalização.

Em iluminação geral, desde os primórdios e até há bem pouco tempo atrás, toda a iluminação era feita com base na utilização das lâmpadas, sozinhas ou enquadradas em estruturas para condicionar a saída de luz e os acessórios necessários para o funcionamento das lâmpadas, tais como casquilhos, balastos, arrancadores, etc. Tais estruturas podem ser luminárias ou candeeiros. Atualmente, com o aparecimento dos LED, devido às suas características que diferem fortemente das outras tecnologias de iluminação, é possível criar luminárias e candeeiros totalmente integrados, ou seja, em que não é possível separar as fontes de luz, no caso os LED, dos restantes elementos. Contudo, ainda existem lâmpadas LED projetadas para utilização em luminárias ou candeeiros. O foco deste trabalho está nestas lâmpadas LED.

3.1 Lâmpada Incandescente

Inventada por Thomas Edison e melhorada ao longo dos anos por diversos fabricantes, a lâmpada incandescente cria uma luz artificial através de um filamento, normalmente de tungsténio, aquecido a temperaturas elevadas por passagem de uma corrente elétrica (efeito de Joule), ao ponto de brilhar e emitir luz no comprimento de onda visível. O filamento quente é protegido da oxidação por um bolbo de vidro ou quartzo, preenchido com gás inerte ou em vácuo.

As lâmpadas incandescentes, como a representada na Figura 3.1, foram fabricadas numa vasta gama de tamanhos, fluxos luminosos e tensões de funcionamento, desde 1,5 V aos 300 V. Não têm qualquer necessidade de equipamentos adicionais para operação, podendo ser ligadas diretamente à rede elétrica, admitindo alimentação em corrente alternada ou corrente contínua.

Como resultado, teve uma propagação rápida, tendo sido vastamente utilizada em todo tipo de aplicações.

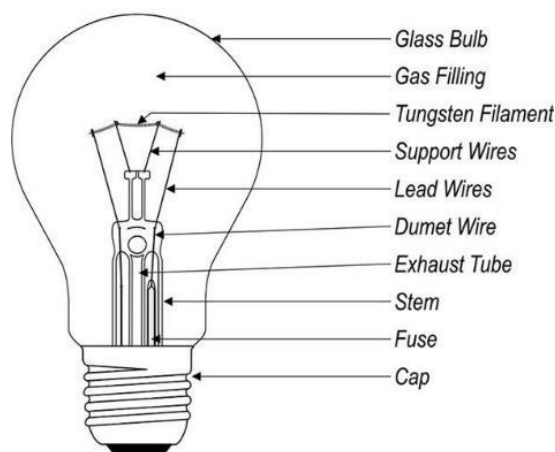


Figura 3.1 – Constituição da lâmpada incandescente (Tisva Illuminology, 2015)

A característica da luz produzida por este tipo de lâmpada é a melhor de que se tem registo, no que respeita à luz artificial. Obtêm-se Temperaturas de Cor (*Correlated Color Temperature – CCT*) desde os 2300 K (luz amarela) aos 5000 K (luz branca), com Índices de Restituição da Cor elevados (*Color Rendition Index – CRI*), tipicamente 100. (Lighting Design Lab, s.d.) A Figura 3.2 representa a gama de temperaturas de cor de diversas fontes de luz conhecidas.

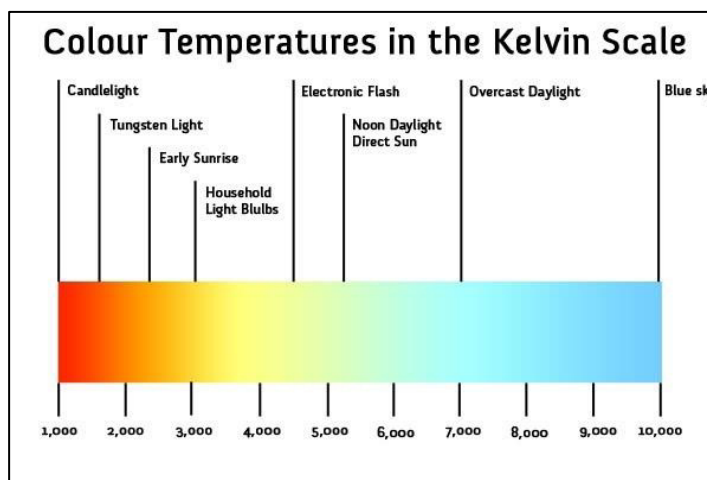


Figura 3.2 – Representação da escala das temperaturas de cor (Lighting Design Lab, s.d.)

Originalmente a temperatura de cor situava-se sempre próximo dos 2700 K, mas com o melhoramento da tecnologia é possível obter temperaturas de cor numa gama de valores.

Este tipo de lâmpada não sofre qualquer depreciação devido ao calor gerado no filamento. Muito pelo contrário, o aumento da temperatura melhora a eficácia luminosa (medida em lumens por watt – lm/W) da lâmpada, e claro, a sua eficiência.

Em termos de custos, com a vasta utilização dada a este tipo de lâmpada, atualmente o preço médio de uma lâmpada incandescente situa-se abaixo de 1 €, sendo de longe a tecnologia mais barata.

As lâmpadas incandescentes têm uma outra vantagem: dado que eletricamente é uma resistência, para regular o fluxo luminoso basta regular a potência entregue à lâmpada. A forma mais comum é reduzindo o valor eficaz da tensão elétrica que chega à lâmpada (*dimming*). A tecnologia mais comum de *dimming* é através dos triac's, que corta temporariamente e periodicamente a alimentação da lâmpada, através da regulação do ângulo de disparo do semicondutor (momento em que este começa a conduzir. Desta forma, o valor eficaz da tensão aplicada à lâmpada reduz, fazendo reduzir a potência e a luz emitida de forma proporcional. É o método mais simples, eficaz e barato de regular a potência na lâmpada incandescente, logo, tornou-se o mais utilizado, se não o único utilizado efetivamente nos produtos comerciais. A Figura 3.3 representa o funcionamento do *dimming* por triac.

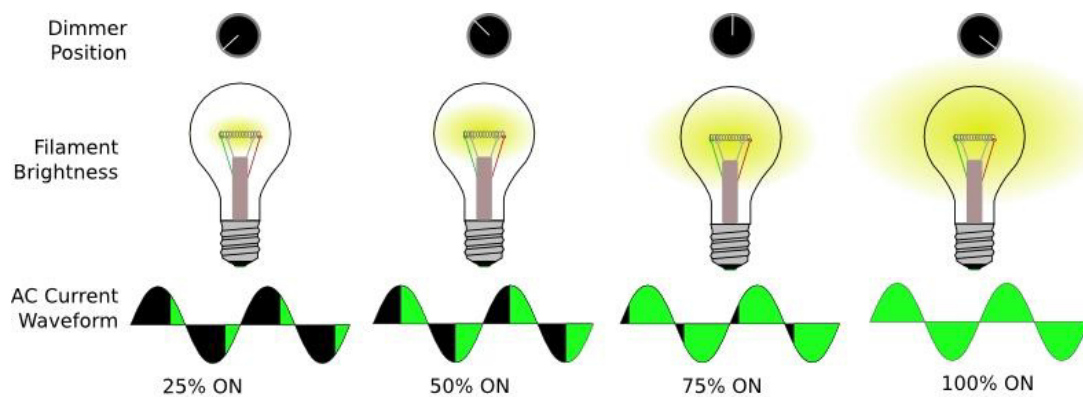


Figura 3.3 – Representação do funcionamento do *dimming* por triac (Lumos Lighting, s.d.)

A Figura 3.4 ilustra o circuito típico de um *dimmer* por triac.

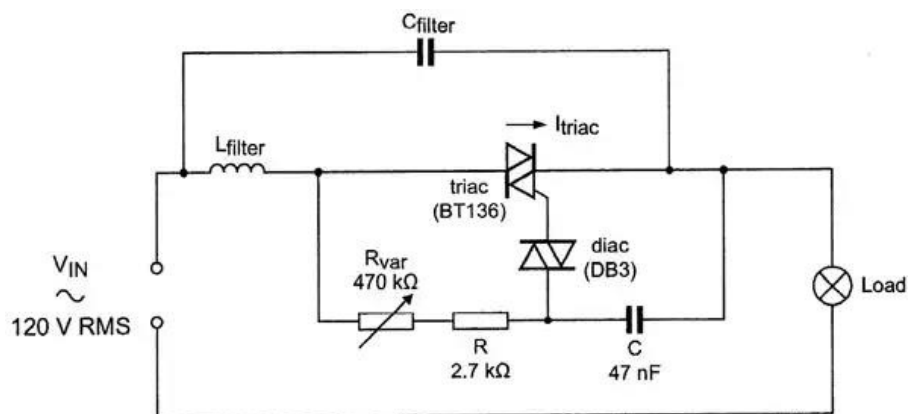


Figura 3.4 – Esquema base de um *dimmer* por triac (Digikey, s.d.)

Contudo, apesar de simples, prática, barata e com boa qualidade de luz, tecnologia a tecnologia incandescente peca em outros fatores críticos: eficiência e tempo de vida.

Uma lâmpada incandescente converte menos de 5 % da energia fornecida em luz visível, sendo que os restantes são maioritariamente dissipados em calor e em luz com comprimentos de onda não visíveis, na região dos infravermelhos. (DGEG, s.d.)

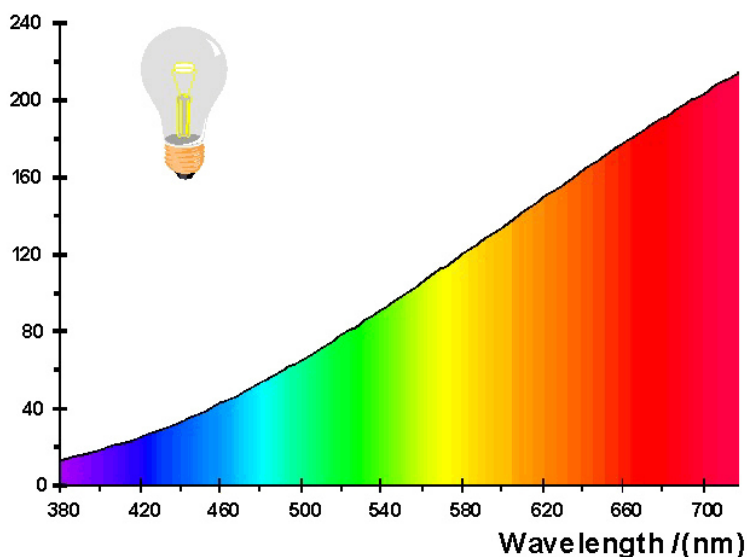


Figura 3.5 – Espectro de emissão de uma lâmpada incandescente
(ledlampinchina.wordpress.com, s.d.)

Em termos de tempos de vida, variam entre 1000 a 2000 h de operação.

3.1.1. Saída de serviço (*Phase-out*) das lâmpadas incandescentes

Sob a motivação de cumprir as metas para redução de consumos de energia, dadas as estratégias adotadas para combater as alterações climáticas e dado ao facto de a iluminação constituir um quinto do consumo doméstico, a União Europeia seguiu o mesmo caminho iniciado por outros países anteriormente, como o Brasil e a Venezuela desde 2005, e estabeleceu metas para o abandono da lâmpada incandescente convencional para dar lugar a tecnologias mais eficientes.

Em 18 de Março de 2008, a Comissão Europeia aprovou um regulamento sobre as lâmpadas domésticas não-direcionais, para substituir as lâmpadas incandescentes ineficientes por alternativas mais eficientes (como lâmpadas incandescentes melhoradas com tecnologia de halogéneo e lâmpadas fluorescentes compactas) entre 2009 e 2012. (European Commission, 2009)

Com esta medida, o consumo total de eletricidade de um agregado familiar poderia reduzir-se entre 10% a 15% e poupar facilmente 50 €/ano, tendo em conta o custo de compra de lâmpadas, pois não se deve esquecer que as lâmpadas incandescentes não só têm reduzida eficiência, como também reduzido tempo de vida. Esperava-se que os cidadãos da UE viessem a poupar 40 TWh (aproximadamente o consumo de eletricidade da Roménia, ou de 11 milhões de lares europeus, ou o equivalente à produção anual de 10 centrais de 500 MW) e reduzir a emissão de CO₂ em aproximadamente 15 milhões de toneladas, por ano. É também esperado voltar a injetar cerca de 5 a 10 mil milhões de euros na economia da UE. (European Commission, 2008)

A saída de serviço das lâmpadas incandescentes foi efetuada faseadamente. A Tabela 3.1 ilustra a calendarização do abandono dessas lâmpadas.

Tabela 3.1 – Calendário do *Phase-Out* das incandescentes (European Comission, 2009)

Date	Non-clear lamps				Clear lamps							
	Requirement	Incandescent	All Halogen	CFL / LED	Requirement	Incandescent / Conventional halogen				Halogen C	Halogen B	LED ¹
						≥ 100 W	≥ 75 W	≥ 60 W	60 W >			
Today	None				None							
September 2009 ¹	A ²				C for ≥ 100W ³		≥ E ³	≥ E ³	≥ E ³			
September 2010	A ²				C for ≥ 75W ³			≥ E ³	≥ E ³			
September 2011	A ²				C for ≥ 60W ³				≥ E ³			
September 2012	A ²				C for all							
September 2013	Second level of functionality requirements ¹											
Review 2014	Review											
September 2016	A ²				B / C ⁴					4		

- 1 First level of functionality requirements introduced in first stage. LEDs are exempted from all functionality requirements.
- 2 Refers to lamp energy label class. Correction factors apply to certain lamps, allowing them to be B-class.
- 3 Minimum requirement for all lamps: E class. F and G lamps phased out.
- 4 Only special cap halogen lamps are allowed to be class C.

3.1.2. Previsões futuras

O futuro das lâmpadas incandescentes poderá afinal ser risonho. De acordo com as mais recentes investigações, presume-se ser possível melhorar a eficiência das lâmpadas, a ponto de se equiparar a eficiências das melhores tecnologias de atuais.

De acordo com o artigo de Matt McGrath da BBC, “*New development could lead to more effective light bulbs*”, de janeiro de 2016, cientistas do MIT estão a desenvolver uma nova tecnologia que permitirá melhorar a eficiência das lâmpadas incandescentes para aproximadamente 40%, valor já equiparado aos melhores LED no mercado. Com recurso a nanotecnologia, cientistas do MIT estão a desenvolver uma estrutura que envolve o filamento da lâmpada e capta a radiação infravermelha emitida, refletindo-a de volta para o filamento, onde é re-absorvida e, em seguida, re-emitada como luz visível. (BBC, 2016) A Figura 3.6 ilustra o protótipo da tecnologia em desenvolvimento, apresentada no referido artigo.

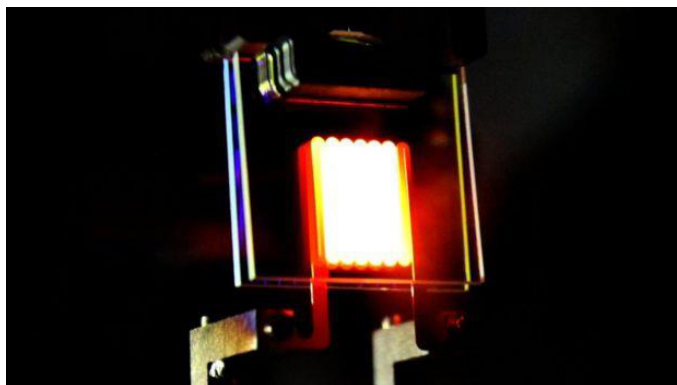


Figura 3.6 – Imagem da prova de conceito da nova tecnologia para lâmpadas incandescentes (BBC, 2016)

Espera-se que nos próximos anos haja novidades sobre esta tecnologia tão revolucionária.

3.2 Lâmpada de Halogéneo



Figura 3.7 – Lâmpada Incandescente de Halogéneo (emaze.com, s.d.)

Uma lâmpada de halogéneo é uma lâmpada incandescente que tem uma pequena quantidade de um gás halogéneo tal como iodo ou bromo adicionado, envolta numa cápsula de quartzo resistente a altas temperaturas. A combinação do gás de halogéneo e o filamento de tungsténio produz uma reação química designada Ciclo de Halogéneo, que re-deposita o tungsténio evaporado de volta no filamento, aumentando a duração, eficiência e aspeto cristalino da lâmpada. Por isso, uma lâmpada de halogéneo pode funcionar a uma temperatura mais elevada do que uma lâmpada incandescente convencional semelhante, produzindo mais luz e temperaturas de cor mais elevadas (luz mais branca). (Wikipedia, s.d.) O reduzido tamanho das lâmpadas de halogéneo permite que seja aplicada dentro dos bolbos das lâmpadas incandescentes convencionais tornando-se uma substituta desta.

A nível funcional, as lâmpadas de halogéneo são idênticas às lâmpadas incandescentes, podendo operar nas mesmas gamas de tensões e tendo o fluxo luminoso regulado da mesma forma, através de circuitos baratos para fazer *dimming*.

No entanto, o *dimming* pode não ser positivo para as lâmpadas de halogéneo. O ciclo de halogéneo funciona apenas em altas temperaturas de filamentos. Se o *dimming* for para menos 20 % da potência, a temperatura do filamento pode cair a ponto de interromper o ciclo de halogeno. O tungsténio evaporado deposita na parede da cápsula, e não sobre o filamento. (Wikipedia, s.d.) Assim, enquanto o *dimming* tipicamente prolonga a vida útil das lâmpadas incandescentes, pode encurtar a vida útil das lâmpadas de halogéneo e causar escurecimento da cápsula de quartzo e assim reduzir a eficiência ótica da lâmpada, permitindo que menor quantidade de luz saia da lâmpada. (Wikipedia, s.d.)

Lâmpadas de halogéneo especiais estão disponíveis para configurações de baixa tensão e oferecendo uma série de vantagens. Sistemas de baixa tensão podem ser concebidos para funcionar de forma eficiente em potências mais baixas do que os sistemas que operam à tensão da rede, permitindo o uso de lâmpadas extremamente compactas e ainda proporcionar um elevado fluxo luminoso. Por exemplo, as lâmpadas de halogéneo MR16 e MR11 produzem grandes quantidades de luz a partir de uma área muito pequena e permitem um excelente controlo do feixe de luz. (Sylvania (OSRAM), s.d.)

Em termos de temperaturas de cor, as lâmpadas de halogéneo funcionam aproximadamente nas mesmas gamas que as incandescentes, com CRI's igualmente elevados (tipicamente 100).

Quanto ao tempo de vida, estas duram mais do que as típicas incandescentes, podendo chegar as 5000 h, e com 3 % a 6 % de eficiência, considerando os produtos mais recentes.

Quanto ao espectro de radiação, como se pode observar na Figura 3.8, a potência máxima está centrada na zona da radiação visível, entre 380 nm e 750 nm ao contrário da incandescente. Ao aproximar-se da zona dos infravermelhos, depois dos 750 nm, a potência irradiada reduz consideravelmente.

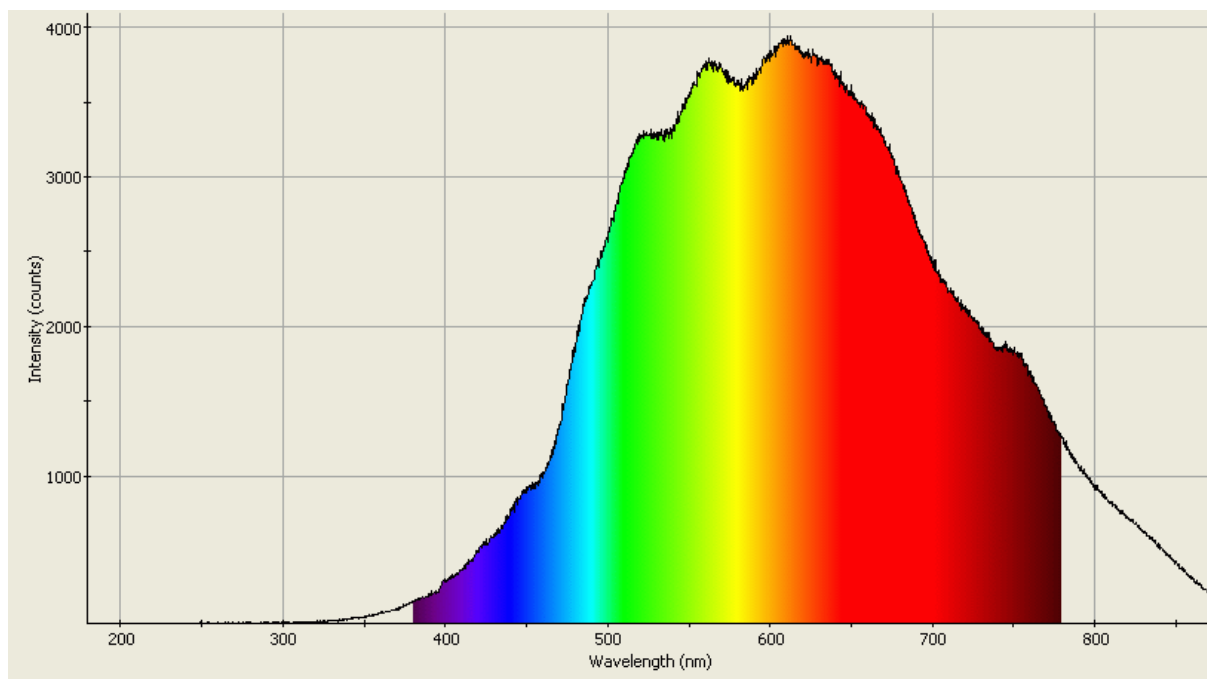


Figura 3.8 – Espectro da Lâmpada de Halogéneo (Wikidot, 2011)

No aspeto fotométrico, a lâmpada de Halogéneo e a Lâmpada Incandescente convencional partilham o mesmo diagrama fotométrico: omnidirecional e simétrico em ambos os hemisférios, uniforme, e com ligeira descontinuidade nos 180 ° devido a presença do casquilho da lâmpada, fazendo sombra nesse ângulo. A Figura 3.9, ilustra o diagrama fotométrico típico de uma lâmpada incandescente de halogéneo, representação tridimensional, que por sua vez é idêntico ao diagrama fotométrico da lâmpada incandescente convencional.

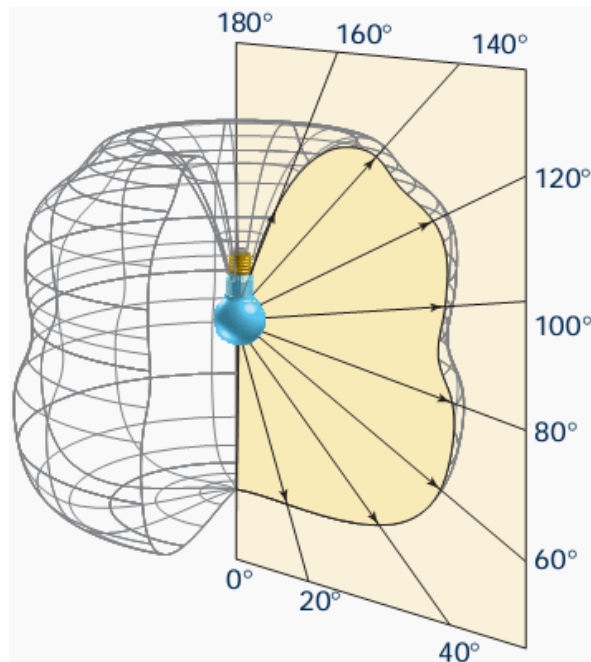


Figura 3.9 – Diagrama fotométrico da lâmpada incandescente convencional e halogéneo – representação tridimensional (Electrical Engineering Portal, s.d.)

Este aspeto do diagrama fotométrico tem mais relevância do que aparenta. A maioria das lâmpadas LED na atualidade, não emitem luz em todas as direções. Emitem luz apenas para a frente, ou seja, usando o diagrama da Figura 3.9 como referência, toda a luz da lâmpada está concentrada entre os ângulos -90° a 90° , ou seja, na metade inferior. Isto significa que toda a zona localizada para a parte de trás da lâmpada, do lado do casquilho, não recebe luz direta, apenas o que é refletido no meio ambiente. Por exemplo, nos candeeiros de teto, é frequente a lâmpada ser montada com o casquilho para baixo. Assim, a luz que chega ao chão do espaço é apenas a luz que é refletida no teto ou na estrutura do candeeiro. O mesmo acontece por exemplo nos candeeiros de mesa ou de cabeceira, quando a lâmpada fica montada com o casquilho para baixo.

É normalmente atribuída equivalência das lâmpadas LED para as lâmpadas incandescentes tendo apenas o fluxo luminoso total da lâmpada em consideração, desprezando a forma como esse fluxo é utilizado. É frequente existirem queixas de muitos consumidores que notam diferenças entre quando utilizavam lâmpadas incandescentes e quando mudaram para lâmpadas LED. Esta característica das lâmpadas incandescentes torna-as ideais para iluminação geral, especialmente doméstica, adaptáveis a qualquer posição de montagem da lâmpada, pois emitem luz em todas as direções, com mesma intensidade.

Dado a sua simplicidade, adaptabilidade e rápida expansão, as lâmpadas de halogéneo concorreram com as incandescentes convencionais no que respeita ao custo de aquisição, custando aproximadamente o mesmo. No entanto, o aparecimento de outras tecnologias mais eficientes, que dominaram o mercado, relegou as lâmpadas incandescentes e de halogéneo para um lugar secundário.

3.3 Lâmpada Fluorescente Compacta

As lâmpadas fluorescentes compactas (*Compact Fluorescent Lamps – CFL*) representam um grande avanço tecnológico para as lâmpadas de iluminação geral desde a invenção da própria lâmpada. Com o avanço da tecnologia e métodos de manufatura, e forçadas pela concorrência das lâmpadas LED, o custo destas lâmpadas atingiu valores extremamente baixos, que, dadas a sua eficiência e durabilidade, as tornam as mais utilizadas para iluminação geral.



Figura 3.10 – Lâmpada Fluorescente Compacta (fire9prevention.wordpress.com, s.d.)

O princípio de funcionamento de uma lâmpada CFL é o mesmo que em outras lâmpadas fluorescentes convencionais (em tubo linear): um tubo preenchido com um gás, Árgon, e Vapor de Mercúrio, em quantidades diminutas, revestido com um material fluorescente, é sujeito a uma diferença de potencial elétrico entre as duas extremidades do tubo e a um aumento de temperatura interna provocada pelo aquecimento de um elétrodo, fazendo com que a corrente elétrica flua entre as duas extremidades do tubo, ionizando a mistura no interior do tubo e emitindo luz visível.

As lâmpadas CFL necessitam de um balastro (*driver*). A função do balastro é transformar a energia da rede elétrica, de modo a ser funcional para a fonte de luz. Atualmente os balastros são completamente eletrônicos, designados balastros eletrônicos, o que acrescenta as seguintes vantagens em relação aos antigos balastros magnéticos:

- Dispensam o uso de equipamentos acessórios como arrancadores.
- Permitem o aumento da frequência de oscilação da energia fornecida a fonte de luz dos 100 Hz ou 120 Hz para algumas dezenas de kHz, eliminando a possibilidade de haver oscilação da luz (*flickering*) e também os ruídos audíveis.
- São mais eficientes. Um balastro convencional magnético tem tipicamente entre 75 % a 80% de eficiência, podendo decair com o tempo. Contudo, os balastros eletrônicos têm tipicamente eficiência superior a 90 %.
- Os balastros eletrônicos são mais leves, dado que os balastros magnéticos têm um transformador de baixa frequência, maior e mais pesado.
- Arranque mais rápido.
- Possibilidade de regular o fluxo luminoso, através do *dimming*.

A Figura 3.11 ilustra a constituição de uma lâmpada CFL com bolbo exterior, onde é possível verificar a localização de cada constituinte da lâmpada, incluindo o balastro.

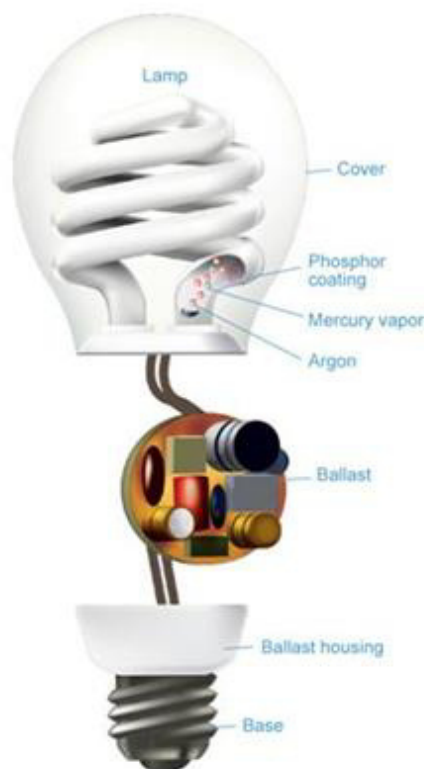


Figura 3.11 – Constituição da lâmpada CFL (Center for Climate and Energy Solutions, 2011)

A grande vantagem das CFL é que utilizam significativamente menos energia (menos 75 %) do que as lâmpadas incandescentes. Isso significa que as lâmpadas fluorescentes compactas exigem menos potência para produzir a mesma quantidade de luz. Por exemplo, usar uma CFL de 20 W equivale a uma incandescente de 75 W. Segundo a Energy Star, se todos os lares na nos Estados Unidos da América substituíssem apenas uma lâmpada incandescente com uma CFL ENERGY STAR certificada, poupar-se-ia o suficiente para, num ano, iluminar pelos menos 3 milhões de lares. Ao mesmo tempo reduzir-se-iam as emissões de gases de efeito estufa igual em quantidade equivalente a emissão de 800000 carros. (Energy Star, 2010)

Como referido, as lâmpadas CFL contêm uma pequena quantidade de mercúrio selado dentro do tubo de vidro, uma média de 4 mg. Em comparação, termómetros antigos continham cerca de 500 mg de mercúrio, correspondente a 125 lâmpadas fluorescentes compactas. O mercúrio é uma parte essencial de lâmpadas fluorescentes compactas. Nenhuma quantidade de mercúrio é libertada enquanto as lâmpadas estiverem em uso, intactas. (Energy Star, 2010)

A maioria dos fabricantes de lâmpadas têm reduzido o teor de mercúrio em seus produtos, com a média a cair 20 % ou mais nos últimos anos. Alguns fabricantes têm obtidos valores na ordem de 1 mg por lâmpada.

A EPA estima que os EUA são responsáveis pela libertação de 103 toneladas (métricas) de mercúrio em cada ano, dos quais mais de metade dessas emissões vêm da produção de energia elétrica por queima de carvão. O mercúrio libertado para o ar é a principal forma de contaminação das águas, que por sua vez bio-acumula em peixes, acabando assim por chegar aos seres humanos, consumidores de peixe. No entanto, todas as lâmpadas CFL vendidas nos EUA no ano 2009 juntas, constituíam apenas 0,12% dessa quantidade. (Energy Star, 2010)

Assim, apesar das lâmpadas incandescentes não possuírem mercúrio na sua constituição, acabam por ser mais poluentes, dado que exigem maior produção de energia elétrica, produção essa que emite mercúrio poluente para o ambiente. Tome-se o exemplo da Tabela 3.2 e da Figura 3.12 a seguir, comparando uma lâmpada CFL de 13 W com uma incandescente de 60 W, ao fim 8.000 h de operação. (Energy Star, 2010)

Tabela 3.2 – Comparação de uma CFL 13 W com uma Lâmpada Incandescente de 60 W relativamente a produção de mercúrio (Energy Star, 2010)

Light Bulb Type	Watts	Hours of Use	kWh Use	National Average Mercury Emissions (mg/kWh)	Mercury from Electricity Use (mg)	Mercury From Landfilling (mg)	Total Mercury (mg)
CFL	13	8,000	104	0.012	1.2	0.44	1.6
Incandescent	60	8,000	480	0.012	5.5 ⁴	0	5.5

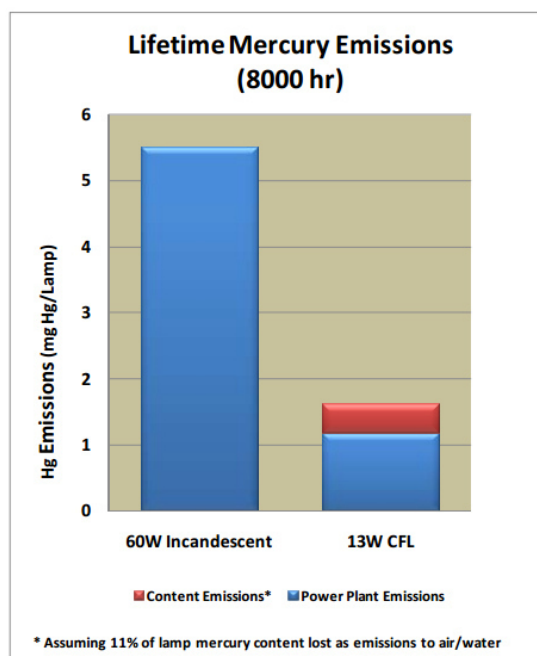


Figura 3.12 – Comparação de uma CFL 13 W com uma Lâmpada Incandescente de 60 W relativamente a produção de mercúrio (Energy Star, 2010)

Assim, verifica-se que a CFL acaba por ser menos poluente dado ao menor consumo que leva a menor necessidade de produção de energia.

A eficácia luminosa das lâmpadas CFL pode chegar a valores entre 60 lm/W a 80 lm/W (aproximadamente 12 % de eficiência), valores considerados bons dado o estado da arte e o custo da lâmpada.

Estas lâmpadas estão disponíveis em variadas gamas de potências e fluxos luminosos, desde 7 W aos 100 W e desde 450 lm aos 4000 lm. Os valores mais comuns são abaixo dos 32 W. A Tabela 4.1 ilustra os valores de potência e fluxos luminosos mais comuns para consumidores:

Tabela 3.3 – Variantes mais comuns das lâmpadas CFL (EE Publishers, s.d.)

CFL Model	Colour Temperature	Flux (Lumen)	Power (Watt)
CFL 23 Watt E27 warm white	2963	1582,20	23,64
CFL 23 Watt E27 warm white	2963	1582,20	23,64
CFL 23 Watt E27 cool white	4143	1498,40	24,01
CFL 20 Watt E27 cool white	4236	1244,80	21,05
CFL 14 Watt E27 warm white	2671	1044,00	16,56
CFL 14 Watt E27 cool white	4114	1067,80	17,55
CFL 11 Watt E27 warm white	2572	765,35	13,21
CFL 11 Watt E27 cool white	3969	765,08	13,33
CFL 11 Watt E14 cool white	4215	767,57	12,64

Tipicamente, uma lâmpada CFL comum dura até às 15000 h, com alguns fabricantes a conseguir extensões até as 20000 h.

Em termos de custo, uma lâmpada CFL fica mais cara do que uma lâmpada incandescente, entre 2 € a 5 € em média, para uma lâmpada comum.

Quanto às temperaturas de cor, as lâmpadas fluorescentes conseguem simular os 2700 K das incandescentes típicas, bem como valores mais elevados (luz mais fria), até aos 6000 K, com CRI acima de 75 tipicamente, ou acima de 90, para aplicações especiais. A Figura 3.13 ilustra o diagrama espectral de uma lâmpada CFL.

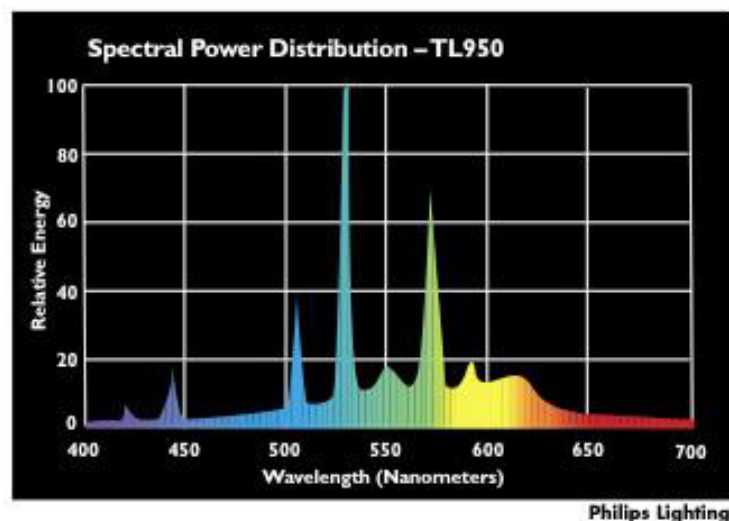


Figura 3.13 – Diagrama Espectral da lâmpada CFL (Topbulb, s.d.)

A CFL tem um diagrama fotométrico muito próximo da incandescente, mas está dependente da geometria da lâmpada (forma dos tubos fluorescentes). Geometrias como tubos em espiral, conseguem melhores distribuições de luz do que as geometrias de tubos verticais.

Contudo, nem tudo são vantagens no que diz respeito a esta tecnologia. Como já foi referido e tratado anteriormente, a primeira desvantagem desta tecnologia está na existência de mercúrio na sua constituição, um metal pesado poluente. Mas quando comparado com as incandescentes, compensa ter essa fração desse poluente, dado que reduzem indiretamente a emissão de mercúrio, reduzindo a necessidade de produção de energia.

Outras desvantagens das lâmpadas CFL são:

- Atingem o fluxo luminoso máximo emitido alguns minutos após ligar, embora tenham um tempo de arranque inferior a 1 segundo;
- A comutação (ligar e desligar) das CFL pode encurtar sua vida e diminuir a sua eficiência, porque a excitação dos gases e do revestimento fluorescente necessitam de alguma exposição à corrente elétrica para chegar a um nível adequado de luminosidade;
- Perdem eficiência quando colocadas em locais fechados, devido ao aquecimento. Locais com vibração podem também causar a redução do seu tempo de vida;
- Finalmente, em raros casos, as lâmpadas CFL podem interferir com dispositivos eletrônicos devido a radiação infravermelha emitida pela lâmpada, que, apesar de reduzida, existe.

Uma vez que estas lâmpadas contêm mercúrio, é obrigatória a existência de um programa de recolha e tratamento destas lâmpadas e dos resíduos, ao abrigo da diretiva europeia WEEE (*Waste Electrical and Electronic Equipment Directive*), que se tornou lei na comunidade CE em fevereiro de 2003. Todos os produtos sujeitos a este regulamento têm que ser identificados na sua embalagem ou no próprio produto com o logótipo do programa, apresentado na Figura 3.14



Figura 3.14 – Logótipo do programa WEEE (Clarion, s.d.)

3.4 LED (*Light Emitting Diodes*)

O LED é a tecnologia mais recente e mais promissora para iluminação geral no momento. A tecnologia em si já tem algumas décadas, mas apenas na década de 2000 o seu potencial para iluminação começou a ser explorado e aproveitado.

O acrónimo LED vem do acrónimo inglês de *Light Emitting Diode* (Díodo Emissor de Luz). Um LED é um semicondutor, tal qual um díodo normal usado em circuitos eletrónicos,

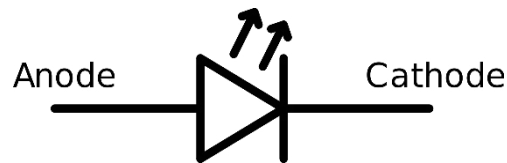


Figura 3.15 – Símbolo eletrónico do LED (semelhante ao díodo)

constituído por uma junção P-N que emite luz, em comprimentos de onda visíveis, quando diretamente polarizado. O símbolo elétrico do LED, representado na Figura 3.15, assemelha-se ao símbolo do díodo, ao qual se acrescentaram duas setas, que simbolizam a luz emitida.

Os LED são tidos como a melhor fonte de luz disponível para lâmpadas de iluminação geral devido a sua elevada eficiência, custo acessível, facilidade e versatilidade na utilização e elevada qualidade da luz (temperatura de cor e CRI), equiparáveis às outras tecnologias referidas anteriormente.

Os primeiros LED foram desenvolvidos na década de 1960 por Nick Holonyak, Jr. No entanto, eram de baixa potência e a luz produzida localizava-se em altos comprimentos de onda, vermelho no espectro visível. O primeiro LED azul de alto brilho foi desenvolvido por Shuji Nakamura da Nichia Corporation, em 1994. A existência de LED azuis de alta eficiência levou ao desenvolvimento do primeiro LED branco, através da aplicação de uma cobertura de fósforo sobre a junção do LED azul para converter parcialmente a luz azul emitida para frequências próximas do vermelho e do verde, criando luz que parece branca.

Os LED apresentam as mesmas características elétricas dos díodos. Quando polarizados inversamente (maior potencial elétrico ligado ao cátodo e o menor potencial ligado ao ânodo), bloqueiam a circulação da corrente. Quando polarizados diretamente, como na Figura 3.16, permitem a passagem da corrente e apresentam o comportamento de uma fonte de tensão, com um diferencial fixo entre o terminal positivo (ânodo) e o negativo (cátodo), tipicamente de 3 V.

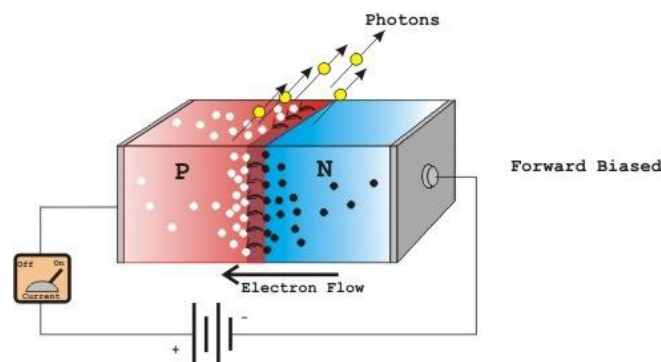


Figura 3.16 – Junção p-n no LED (quora.com, s.d.)

Os LED são fabricados em diversos formatos e potências, desde pequenos *chips* de 1 mW ou 2 mW de consumos, a múltiplas junções integradas num só encapsulamento (*chip on board*) ou

matrizes (*arrays*) com dezenas de watts de consumo. A Figura 3.17 ilustra a constituição de um LED de potência, com uma única junção.

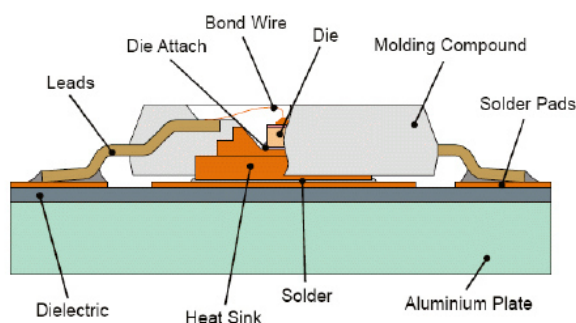


Figura 3.17 – Construção do LED de potência (researchgate.net, s.d.)

Os LED são normalmente controlados em corrente. Estes emitem luz de forma proporcional à corrente que os atravessa, em condições normais de funcionamento. Utilizando esta propriedade, é possível regular o fluxo luminoso de uma lâmpada LED regulando apenas a corrente que atravessa o LED. Isto pode ser feito através de comandos enviados ao *driver*, como por exemplo por *triac-dimming* ou por um outro meio de comunicação eletrônico (Bluetooth, Wireless, Wi-Fi, KNX, X10, etc.), desde que o *driver* esteja preparado para tal. A Figura 3.18 ilustra uma curva característica Fluxo Luminoso Relativo vs Corrente de um LED, a título de exemplo.

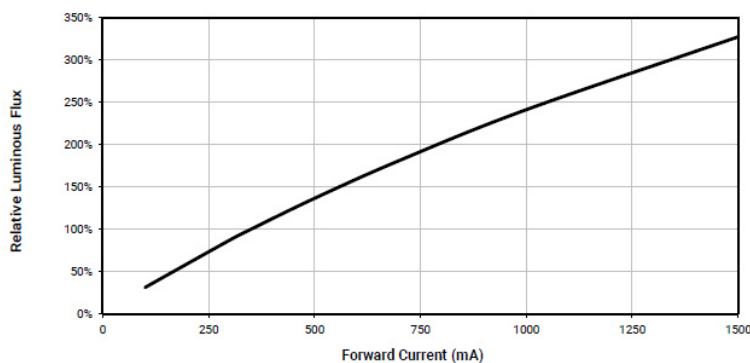


Figura 3.18 – Exemplo de curva Fluxo Luminoso Relativo vs Corrente, LED CREE XT-E (CREE)

A eficiência dos LED não é equiparável a nenhuma das outras fontes referidas anteriormente. Embora não tenham começado bem, o elevado potencial que detinham levou ao seu rápido desenvolvimento, distanciando-se grandemente das outras fontes. Os melhores LED comercializados atualmente na indústria estão no patamar dos 150 lm/W aos 200 lm/W, o que representa uma eficiência de 30 %, muito acima dos 5 % das incandescentes e dos 12 % das CFL. Para mais, os LED continuam em constante desenvolvimento, pelo que ainda não foi atingido o seu potencial máximo. Todos os meses novos LED aparecem no mercado, mais eficientes e por vezes mais baratos do que as versões anteriores.

Os LED brancos podem produzir luz em todas as temperaturas de cor utilizáveis em iluminação geral, desde os 2400 K aos 6500 K, sendo mais comuns utilizar-se 2700 K, 3000 K, 4000 K e 5000 K.

Quanto ao CRI, estão disponíveis desde 65 até 90, dependendo do LED e da aplicação. Em iluminação geral utiliza-se normalmente CRI superior a 80. Em aplicações como iluminação exterior de ruas e parques e iluminação interior industrial, podem-se usar CRI superior a 70. Abaixo dos 70, são raras as aplicações, pelo que os fabricantes quase que se limitam a produzir LED com CRI superior a 70.

Além das vantagens mencionadas, outra grande vantagem dos LED em relação a outras tecnologias mencionadas anteriormente é a sua longevidade. Assumindo um projeto e conceção adequados do sistema de iluminação, os LED podem superar facilmente as 100000 h em operação contínua. O projeto adequado implica o respeito pelas condições de funcionamento definidas pelo fabricante, como por exemplo, respeitar as temperaturas máximas de funcionamento da junção P-N, respeitar o limite de corrente, quer em contínuo quer pulsado, e respeitar as regras de manuseamento em fabrico e do processo de soldadura.

Os principais fatores que reduzem o tempo de vida do LED são o excesso de corrente e de temperatura, sendo que normalmente estão associados um ao outro. Estes dois fatores são também responsáveis pela redução da eficiência do LED, o que, por sua vez, faz aumentar a temperatura reduzindo ainda mais a eficiência, entrando num ciclo.

A indústria utiliza os seguintes métodos para determinar o período de vida de um LED ou lâmpada LED:

- Classificação B10 ou B50, que determinam o período para o qual, de um certo número predeterminado de LED ou lâmpadas em teste, se espera que 10 % ou 50 %, respetivamente, das lâmpadas avarie.

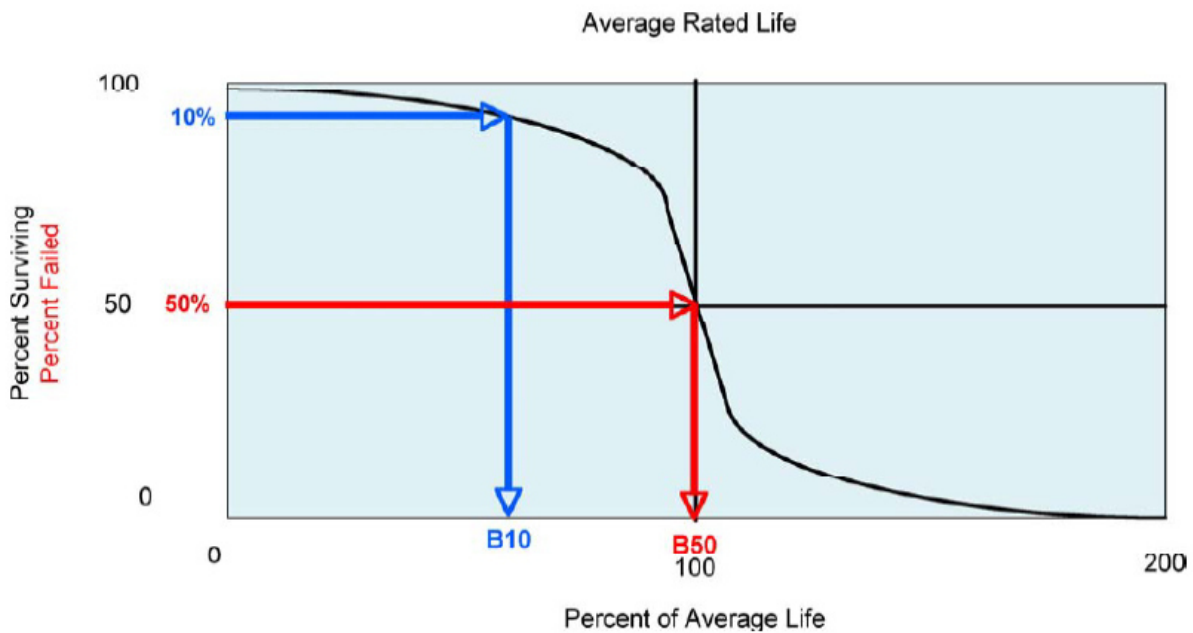


Figura 3.19 – Curva de tempo de vida de um produto, determinado pelo método B10, B50 (Philips)

- L70 e L50, quantifica a percentagem de luz mantida ao fim de “X” horas em funcionamento, em relação à quantidade de luz inicial. Esta classificação determina o período em que o LED ou lâmpada atinge 70 % ou 50 % da luz inicial, respetivamente.

Estes dois métodos são normalmente utilizados para determinar a duração da vida útil do LED. Os fabricantes de produtos de iluminação normalmente classificam os seus produtos segundo B50 e L70, de forma combinada. Ou seja, determinam que o seu produto dura o tempo para o qual 50 % das amostras estudadas atingiram 70% do fluxo luminoso que possuíam inicialmente.

Regressando aos efeitos da temperatura e da corrente nos LED, os gráficos das figuras a seguir, Figura 3.20 e

Figura 3.21, ilustram esses mesmos efeitos referidos.

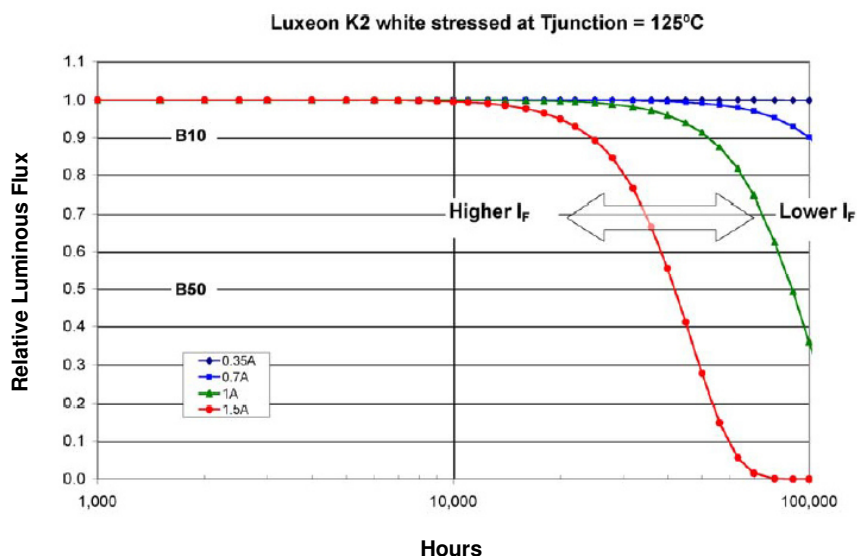


Figura 3.20 – Curvas de variação do fluxo luminoso ao longo do tempo de vida do LED Philips Luxeon K2, para temperatura de junção $T_j=125\text{ }^\circ\text{C}$ (Philips)

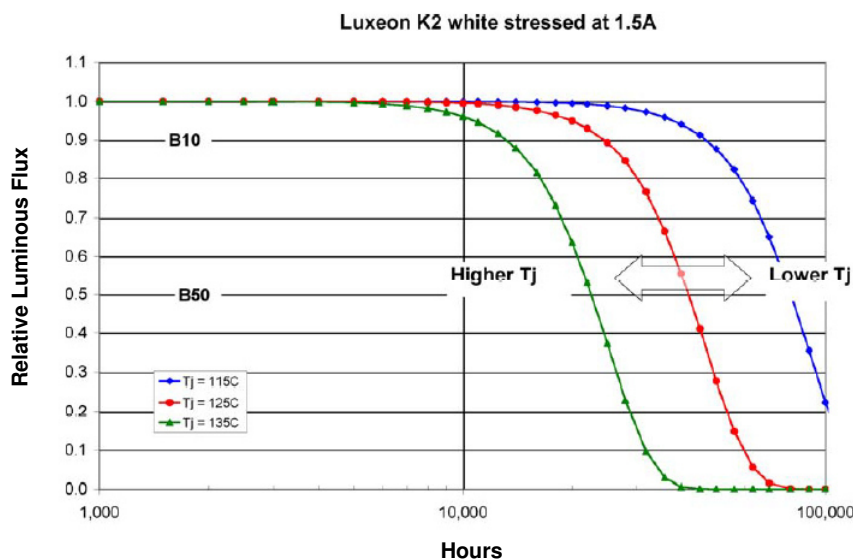


Figura 3.21 – Curvas de variação do fluxo luminoso ao longo do tempo de vida do LED Luxeon K2, para uma corrente fixa de 1,5A (Philips)

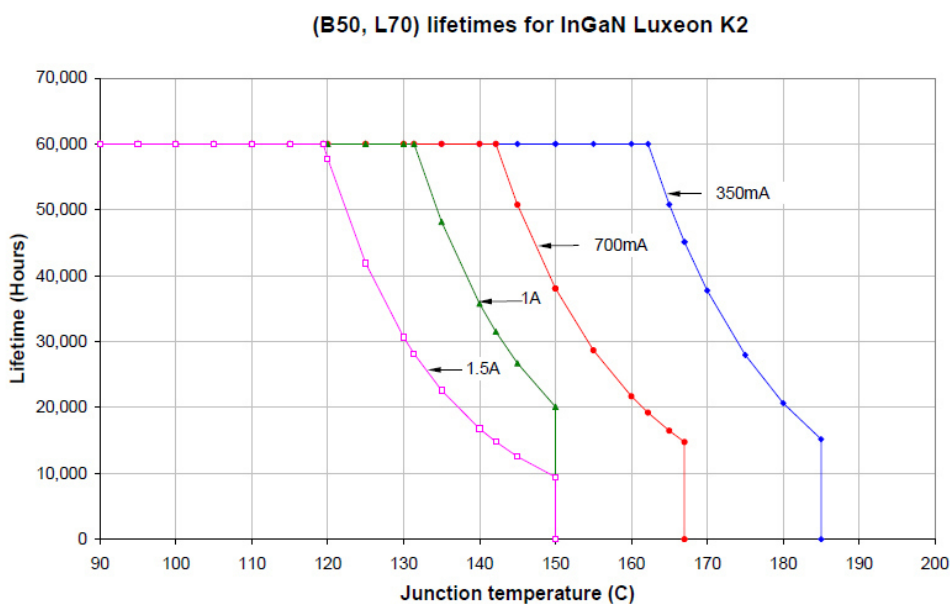


Figura 3.22 – Curva de tempo de vida do LED Philips Luxeon K2, em função da corrente e da temperatura de junção (Philips)

O que se verifica nas figuras anteriores é que o aumento da corrente e da temperatura de junção contribuem fortemente para o fim de vida do LED.

A última, mas também importante vantagem dos LED são a sua versatilidade. Possibilitam a criação de uma infinidade de *designs*, dando uma escapatória ao típico formato da lâmpada, embora muitos fabricantes tenham optado por aproximar os seus *designs* ao formato típico das lâmpadas, para facilitar a integração da iluminação LED no mercado. Desta forma, a estética

passa a assumir um papel mais relevante na escolha da lâmpada pelo consumidor, dado que já não são todas iguais.

As figuras abaixo, Figura 3.23, Figura 3.24, Figura 3.25 e Figura 3.26, ilustram alguns modelos de lâmpadas LED atualmente no mercado. Todas elas são lâmpadas equivalentes a lâmpada incandescente de 60 W, contudo, o aspeto exterior varia fortemente de fabricante para fabricante.



Figura 3.23 – Switch LED Bulb
(electronicdesign.com, s.d.)



Figura 3.24 – GE Lighting Soft White
(apartmenttherapy.com, s.d.)



Figura 3.25 – Philips CorePro LEDbulb
(Philips Lighting, s.d.)



Figura 3.26 – CREE LED 60 W replacement
(geek.com, s.d.)

Os LED possuem também algumas desvantagens ou pontos menos bons. Podem-se listar as seguintes como sendo as principais:

- Um só LED emite baixo fluxo luminoso, quando comparado com uma lâmpada incandescente ou fluorescente. Por este motivo, os LED têm que ser utilizados em conjunto para que a soma da luz de cada LED atinja valores aceitáveis para uma lâmpada. Há exceções, em que um só LED é suficiente. Por exemplo, quando a lâmpada

é de baixa potência (2 W a 5 W), um só LED de alto brilho (*high power*), é suficiente para fornecer o fluxo luminoso total da lâmpada. Ou quando o LED é de muito alta potência (*high power, arrays* ou *chip on boards*), emitindo luz suficiente a partir de um só encapsulamento.

- Os LED são caracterizados por emitir uma grande quantidade de luz numa superfície reduzida. Desta forma, são propícios a causar encandeamento (perda total ou parcial da visão por um período de tempo, provocado por uma fonte de luz extremamente brilhante). Assim, é comum os fabricantes de lâmpadas recorrerem a difusores para difundir a luz e transformar a superfície de emissão de luz de um ou vários pontos de luz intensos para uma só superfície, muito maior, uniforme e menos intensa, reduzindo o encandeamento.
- A emissão de luz dos LED está normalmente confinada a uma abertura de 120 °, enquanto que as lâmpadas fluorescentes e incandescentes são omnidirecionais, emitindo a luz em todos os ângulos. Para algumas aplicações, esta propriedade dos LED é vista como vantagem. No que se refere a lâmpadas de iluminação geral, pode ser desvantajoso. Isto é normalmente contrariado através do uso de difusores e da posição de montagem do LED no interior da lâmpada.

Quanto ao futuro dos LED, espera-se mais desenvolvimentos nos próximos anos, melhoramento das eficiências e redução do preço, como tem vindo a acontecer desde a sua invenção. Com efeito, em menos de 10 anos, a eficiência dos LED multiplicou 3 a 4 vezes, de 50 lm/W para 200 lm/W.

Estudos foram feitos em laboratório para determinar a eficiência máxima que se poderá obter das tecnologias atuais dos LED. A Figura 3.27 ilustra a previsão do *Department of Energy* – DOE, do Governo Norte Americano, em relação a evolução dos LED nos próximos anos:

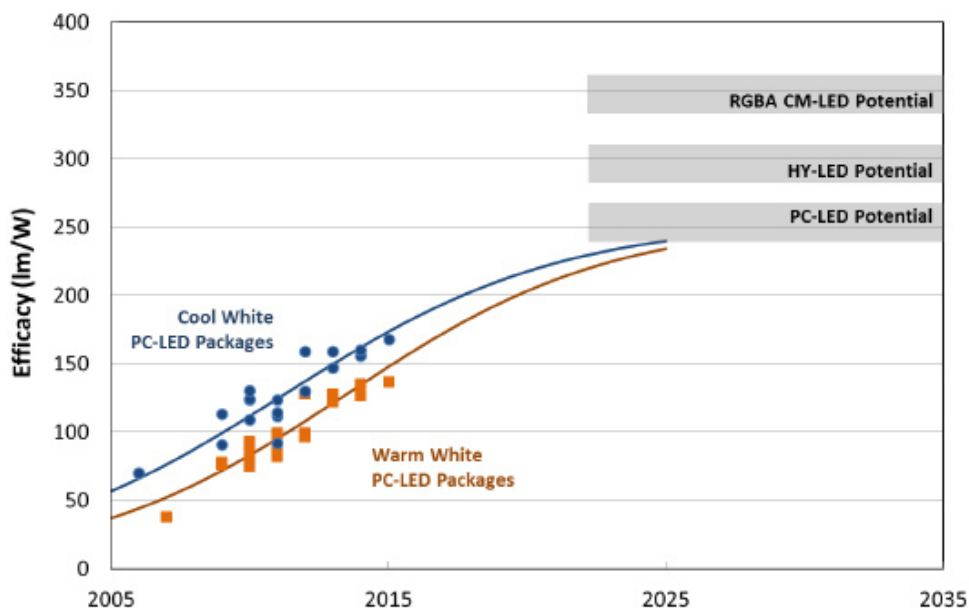


Figura 3.27 – Previsão da evolução das tecnologias dos LED (DOE, 2016)

Na figura anterior, PC-LED, HY-LED e RGBA-LED significam as três tecnologias de encapsulamento (*packages*) de LED.

- PC-LED é o encapsulamento mais comum. Consiste numa junção de semicondutores que produz luz azul, com camada de fósforo por cima para emitir luz branca (mistura de azul, branco e verde);
- HY-LED é uma topologia híbrida, em que a junção que produz luz azul é revestida com fósforo para emitir mistura de azul e verde. Depois, é adicionado uma junção que produz luz vermelha, para que juntos emitam luz branca;
- RGBA-LED, consiste na mistura de diferentes junções que produzem luzes discretas (azul, verde, vermelha e âmbar) para que juntos emitam luz branca.

Contudo, a eficiência dos LED tem um teto máximo. Na tecnologia mais usada, PC-LED, prevê-se que o seu limite seja 250 lm/W. As tecnologias HY-LED e RGBA-LED chegam um pouco mais longe, aos 300 lm/W e 350 lm/W. Mas esses patamares não serão atingidos agora, apenas a longo prazo, mas ainda assim, representam apenas de 37 % a 51 % de eficiência. Isto significa que as lâmpadas no futuro continuarão a desperdiçar mais de 50 % da energia fornecida. Isto é um passo gigantesco em relação ao passado, mas ainda assim não é o ideal para o futuro eficiente e sustentável que se procura. Contudo, novas tecnologias têm sido estudadas e desenvolvidas, e melhorias têm sido feitas nas tecnologias atuais, pelo que a perspectiva para o futuro é positiva.

4. Lâmpadas LED para iluminação geral

O objetivo deste projeto é obter uma melhoria no que respeita ao conceito, *design* e fabrico das lâmpadas LED para iluminação geral. Tendo-se apresentado o enquadramento do problema e o estado da arte das diferentes tecnologias, de seguida vai-se analisar as lâmpadas LED em detalhe, nomeadamente conhecer a sua constituição, conhecer os seus benefícios, aprofundar o estado da arte, identificar as suas fraquezas no que respeita à forma como são atualmente e propor uma alternativa para construção e comercialização, que diminua ou elimine as suas fraquezas atuais, apontando para um futuro mais eficiente.

4.1 Estado da Arte

Quando se refere a lâmpada LED para iluminação geral, existem no mercado 2 principais segmentos: lâmpadas equivalentes a incandescentes de 60 W e lâmpadas equivalentes a incandescentes de 100 W.

Para que uma lâmpada seja equivalente a uma incandescente, esta deve possuir o fluxo luminoso e as dimensões próximas da lâmpada incandescente que pretende substituir. Ao observar as marcas consideradas mais fiáveis no mercado e os seus produtos de referência para cada um dos segmentos mencionados, verifica-se uma tendência nas características dos produtos, que denotam o estado da arte das lâmpadas LED para iluminação geral. A Tabela 4.1 resume as características principais desses produtos, compiladas à partir das características técnicas de cinco lâmpadas dos principais fabricantes (CREE, Philips e GE) ilustradas na Figura 4.1.

Tabela 4.1 – Tabela resumo de caracterização do Estado da Arte de Lâmpadas LED para iluminação geral

	Equivalente 60 W	Equivalente 100 W
Potência	10 W – 11 W	16 W – 19 W
Fluxo Luminoso	800 lm	1600 lm
Eficiência Luminosa	75 lm/W – 80 lm/W	85 lm/W – 100 lm/W
Tempo de Vida	25.000 h	25.000 h
Emissão de Luz	Omnidirecional*	Omnidirecional*
Local Uso	Interior	Interior
Dimensão (ø x h)	ø61 x 112 mm	ø68 x 112 mm
Temperaturas de cor	2700 K – 5000 K	2700 K – 5000 K
CRI	>80	>80
<i>Dimming</i>	Sim	Sim
Preço	5 \$ – 13 \$	10 \$ – 22 \$

*A característica da omnidirecionalidade é relativa. As lâmpadas são omnidirecionais em ângulos horizontais, mas em ângulos verticais, a abertura do feixe de emissão da luz varia dos 120° aos 180°.

A informação ilustrada é representativa, pelo que existem produtos que diferem nas características apresentadas, mas a maioria dos produtos entre as marcas mais conceituadas encaixam no perfil apresentado, como por exemplo os produtos apresentados a seguir, na Figura 4.1:



Figura 4.1 – Exemplos de lâmpadas que definem o estado da arte das lâmpadas LED para iluminação geral (CREE 60 W; Philips 60 W; Philips 100 W; GE 100 W; CREE 100 W)

4.2 Construção da Lâmpada LED

Uma lâmpada LED é constituída, tipicamente, por seis elementos essenciais: módulo LED; interface térmico; fonte de alimentação; dissipador; ótica e conexão elétrica. A Figura 4.2 ilustra a constituição típica de uma lâmpada LED.

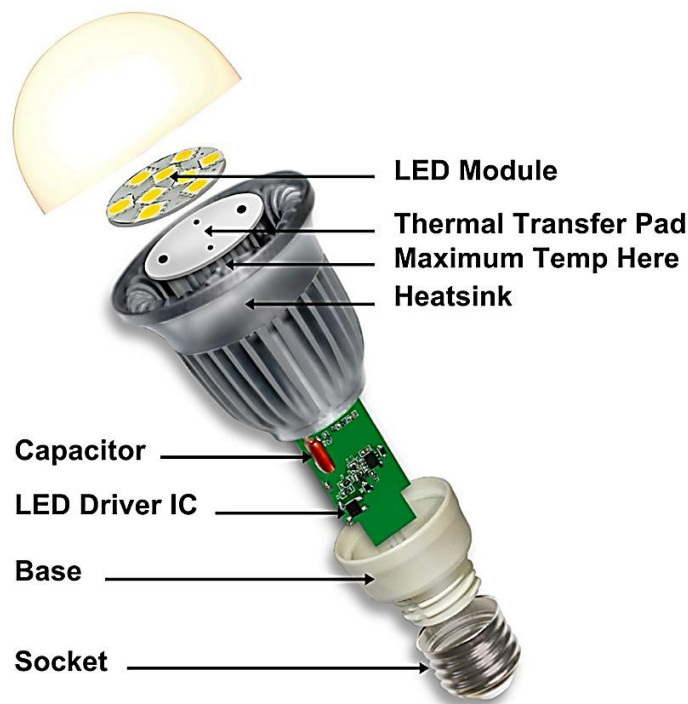


Figura 4.2 – Constituição típica de uma lâmpada LED (Electronic Engineering Time, s.d.)

Módulo LED: o módulo LED é constituído pelos LED e por uma placa de circuitos impressos com base de alumínio (*Metal Core Printed Circuit Board – MCPCB*).

Dissipador (*Heatsink*): o dissipador é responsável por dissipar a energia térmica produzida pelos LED e pela fonte de alimentação no ar envolvente, por convecção. O dissipador tem um papel crucial na constituição da lâmpada LED, dado que quer os LED, que são o maior gerador de calor (mais de 70 %), quer a fonte de alimentação, são elementos sensíveis ao calor. A conceção do dissipador pode estender ou reduzir o tempo de vida de uma lâmpada.

Normalmente esses dissipadores são feitos de alumínio, por ser um bom condutor térmico e barato comparativamente a outros materiais que poderiam desempenhar a mesma função.

Material de Interface Térmico (*Thermal Interface Material* – TIM): material condutor térmico, cuja principal função é acoplar termicamente o MCPCB a uma base de suporte, que pode ou não fazer parte do dissipador, mas que estará sempre, de alguma forma, ligada ao dissipador. Esse material preenche o espaço entre o MCPCB e a base do dissipador, que de outra forma seria preenchido pelo ar.

Ótica: A ótica é o que condiciona a saída de luz da lâmpada. Pode ser uma simples cúpula difusa, que espalha a luz pontual e brilhante dos LED, dando à lâmpada um aspeto suave para a visão humana, ou pode ser uma ou um conjunto de lentes que direcionam a luz numa direção específica. Pode ainda conter refletores e deter variados acabamentos suberificais. Os materiais mais utilizados nas óticas das lâmpadas são o acrílico (PMMA), o policarbonato (PC) e o polietileno (PE). Os materiais podem ser tingidos, para se tornarem opalinos, ou texturados para difundirem a luz, ou podem ainda ser transparentes (como por exemplo as lentes), para serem mais eficazes e exatos quando se pretende redirecionar a luz com precisão.

Driver: os LED são alimentados em corrente contínua e, normalmente, em valores baixos de tensão. Para que a lâmpada seja compatível com as estruturas existentes para lâmpadas incandescentes ou CFL e possam ser alimentadas diretamente da rede pública de energia elétrica, é necessário um conversor AC/DC (*driver*), que possa transformar a energia da rede (120Vac ou 230Vac) para uma forma que possa ser utilizada pelos LED (DC). Para mais, os LED requerem um controlo minimamente preciso da corrente que os atravessa. Logo esses *drivers* devem ter a capacidade de controlar e limitar a corrente, para que a potência certa seja entregue aos LED e esses produzam o correspondente fluxo luminoso, mantendo as condições de funcionamento adequadas para a sua continuidade em serviço.

Os *drivers* podem ser galvanicamente isolados ou não. Normalmente utilizam-se *drivers* galvanicamente isolados (através do uso de topologias de fontes comutadas com um transformador de alta frequência), devido à sua maior fiabilidade, durabilidade e eficiência. A topologia mais comum, para não dizer a única utilizada, é o *flyback*. O *flyback* é uma topologia simples, eficaz, eficiente (normalmente acima dos 80 %), barata, fácil de controlar e permite que a saída da fonte seja controlada em tensão ou em corrente, o que a torna ideal para controlar os LED. A Figura 4.3 ilustra um esquema básico representativo de um *driver* com controlo de corrente nos LED.

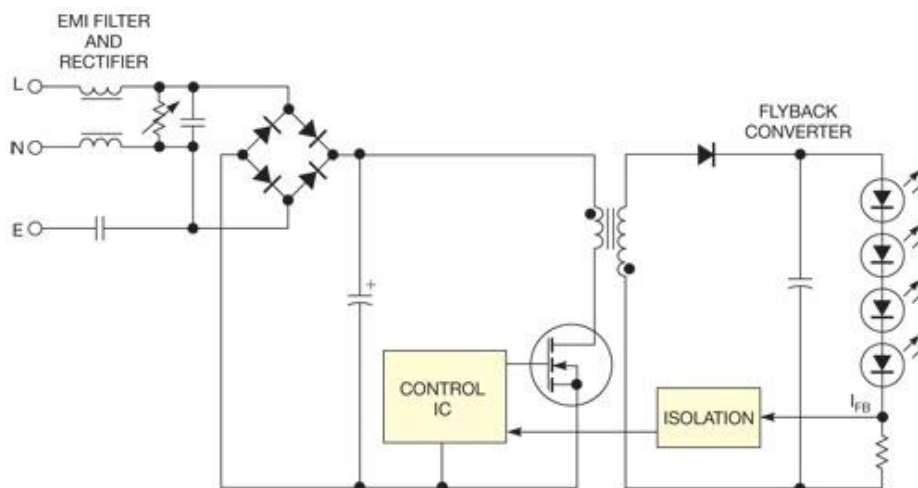


Figura 4.3 – Exemplo de um driver tipo para controlo da corrente dos LED, em topologia *flyback* (Green, 2011)

Conexão elétrica: a conexão elétrica serve para alimentação da lâmpada através da rede pública de distribuição de energia. Em lâmpadas de iluminação geral, é comum usar-se os casquilhos de rosca Edison E26 e E27, para os EUA e Europa, respetivamente.

4.3 Formas e geometria da Lâmpada

O formato da lâmpada LED para iluminação geral simula o formato das lâmpadas incandescentes *standard*, para facilitar a integração no mercado. Em termos dimensionais, são aproximadamente idênticas. Têm um *driver* incorporado e um casquilho *standard* para ligação direta à rede pública de energia elétrica e os *drivers* podem ser projetados para funcionar com os mesmos *dimmers* que funcionavam com as lâmpadas incandescentes e CFL. Assim, o consumidor, ao ver a lâmpada, sabe intuitivamente que esta pode ser usada em substituição das lâmpadas incandescentes ou CFL e não deverá ter problemas de compatibilidade da lâmpada com as estruturas que tem em sua casa. Contudo, nem sempre isso é garantido, visto que há relatos de consumidores que compraram lâmpadas LED e que posteriormente vieram a verificar que não eram compatíveis, em termos dimensionais, com a estrutura que têm para uma lâmpada convencional.

O problema da compatibilidade vem do facto dos fabricantes optarem por aumentar as dimensões da lâmpada, principalmente dos dissipadores e da ótica, para colmatar as limitações do *design*: necessidade de mais capacidade de dissipação na lâmpada e necessidade de melhor distribuição da luz. Este problema será abordado nos capítulos seguintes, quando se apresentar as limitações do *design* atual das lâmpadas LED e suas desvantagens.

4.4 Estrutura de Custos Lâmpada LED

De acordo com a DOE, a estrutura de custos de uma lâmpada LED atual divide-se da seguinte forma, como se pode observar na Figura 4.4: as maiores percentagens são para os LED (35 %) e para as partes mecânicas e conexão elétrica (30 %). A fonte de alimentação vem em terceiro, representando 15 % dos custos, e a parte ótica a seguir, com 10 % dos custos. A montagem representa 5 % e os restantes processos (desenvolvimento, engenharia de produção, transporte, ensaios, etc.), denominados *overhead* na figura, representam a restante percentagem de 5 %.

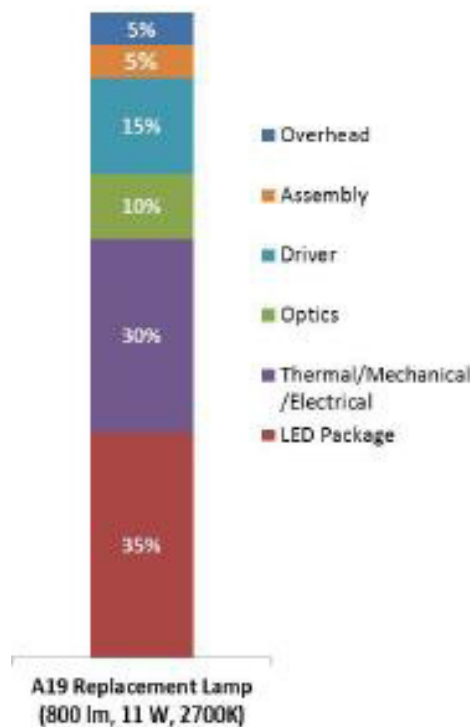


Figura 4.4 – Estrutura de custos de uma lâmpada LED para iluminação geral, equivalente a incandescente 60 W (DOE, 2014)

A previsão da DOE é que os custos de fabrico da lâmpada evoluam de acordo com o apresentado na Figura 4.5:

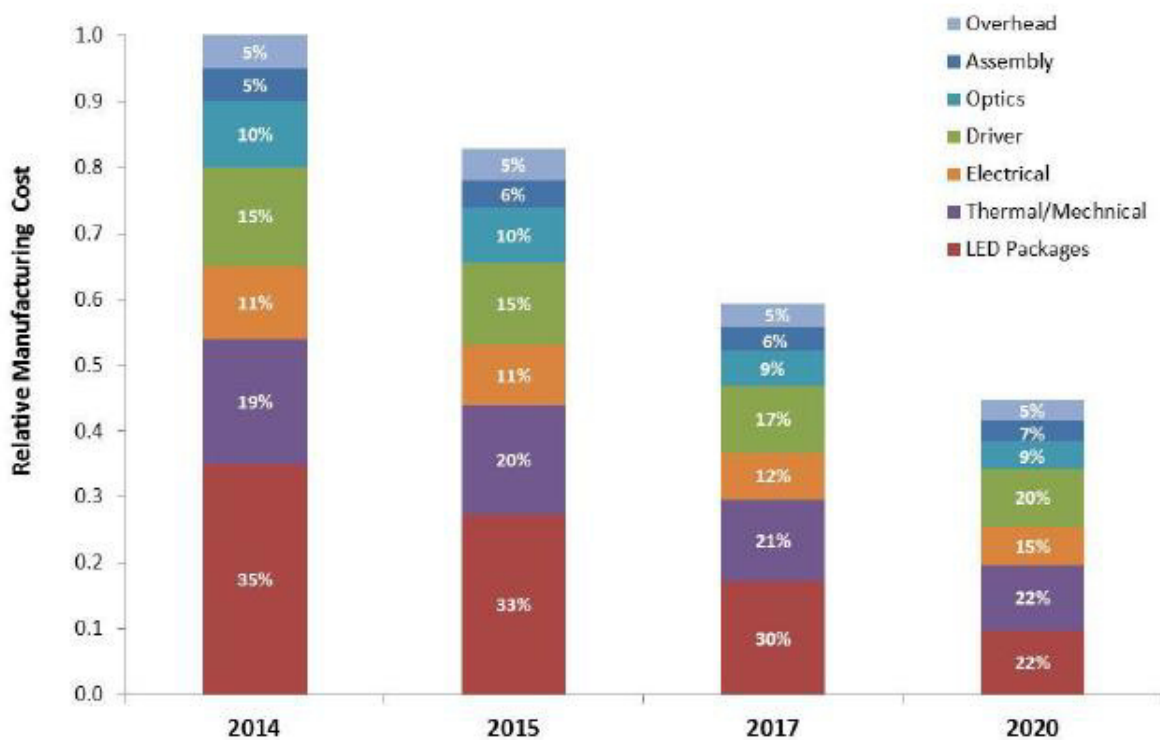


Figura 4.5 – Previsão para evolução dos custos das lâmpadas LED para iluminação geral (DOE, 2014)

Em termos percentuais, as variações serão pequenas. No entanto, prevê-se a diminuição para o custo total para menos de metade, em relação ao custo à data da realização do documento.

4.5 **Roadmap para o futuro das lâmpadas:**

A tendência natural é que as lâmpadas melhorem a eficiência em proporção à melhoria da eficiência dos LED, uma vez que a eficiência das lâmpadas depende quase exclusivamente dos LED, tendo uma componente para ótica e outra para o *driver*, pois não há previsão de melhoria dos sistemas óticos, tão pouco para os *drivers*. Com efeito, os primeiros são peças simples com eficiências bem definidas, consoante a função, e quanto ao segundo, a sua eficiência depende apenas da melhoria dos componentes eletrónicos utilizados.

Quanto ao custo das lâmpadas, a previsão foi apresentada no capítulo anterior. Segundo a DOE, é espectável uma forte redução do preço das lâmpadas fruto da melhoria dos processos e da redução do custo dos componentes fundamentais: LED e partes mecânicas e elétricas.

4.6 **Análise crítica às lâmpadas LED para iluminação geral**

As lâmpadas LED são definitivamente o futuro da iluminação, contudo, ainda não atingiram o seu potencial máximo, quer no que respeita à eficiência máxima das fontes de luz, os LED, quer no que respeita ao seu *design* construtivo. O foco deste trabalho é a melhoria do *design* construtivo da lâmpada LED. Quanto à eficiência dos LED, outros trabalhos estão a ser desenvolvidos em laboratórios por todo o mundo, para obter a sua maximização.

Quando se analisa a construção de uma lâmpada LED, destacam-se algumas diferenças comparativamente às lâmpadas CFL ou incandescentes: a presença de um dissipador. A presença do dissipador deve-se ao facto dos LED, apesar de mais eficientes do que as fontes de luz convencionais, atualmente têm apenas 30 % de eficiência, com expectativas de atingir um máximo de 50%. Ou seja, mais de metade da energia fornecida aos LED é desperdiçada, transformada, quase na totalidade, em calor. Isto obriga à utilização de um dissipador, que será tanto maior quanto mais potência e luz se pretender na lâmpada. É também por este motivo que algumas lâmpadas LED são maiores do que as suas correspondentes incandescentes, gerando incompatibilidade com as estruturas desenhadas para lâmpadas incandescentes.

Este facto sobre as lâmpadas LED cria outros problemas. A existência do dissipador reduz a área disponível para a ótica, deixando apenas o que resta do corpo da lâmpada para a ótica. Por isso, a grande maioria das lâmpadas no mercado têm óticas semiesféricas, por este motivo e pela facilidade de fabrico da peça. Este tipo de ótica produz diagramas fotométricos com abertura de feixe inferior a 180°, fazendo com que a lâmpada não seja verdadeiramente omnidirecional e limitando as aplicações da lâmpada, como foi referido anteriormente.

Outro problema é a limitação da potência da lâmpada. Uma vez que a dimensão e peso da lâmpada são limitados, o dissipador e a capacidade de dissipação também são limitados, limitando assim a potência máxima que se pode colocar na lâmpada.

O último e grande problema é a limitação do tempo de vida da lâmpada. Pelo facto de as lâmpadas terem *drivers* integrados, os componentes eletrónicos do *driver* ficam expostos a temperaturas elevadas, sendo frequente operarem acima dos 80 °C de temperatura ambiente (no interior da lâmpada). Isto faz com que componentes críticos para o funcionamento da lâmpada,

sensíveis ao calor, como condensadores eletrolíticos, tenham o seu tempo de vida limitado e encurtado. Esta é a principal razão de a esmagadora maioria das lâmpadas não ultrapassarem as 25000 h de funcionamento, quando os LED podem facilmente operar por mais de 100000 h, sem grandes dificuldades.

Os problemas das lâmpadas LED podem então ser resumidos da seguinte forma:

- Os LED são fontes “ineficientes”, transformando mais de metade da energia que lhes é fornecida em calor. O calor gerado requer um dissipador para que os LED operem em temperaturas aceitáveis para o seu funcionamento;
- A presença do dissipador limita o espaço disponível para a parte ótica, limitando também os ângulos de emissão de luz. A grande maioria das lâmpadas emitem luz apenas para um dos lados, com uma divisão de 95 % para frente e 5 % para trás. Veja-se o exemplo das figuras a seguir, Figura 4.6 e Figura 4.7:



Figura 4.6 – Lâmpada Philips CorePro LEDbulb (Philips Lighting, s.d.)

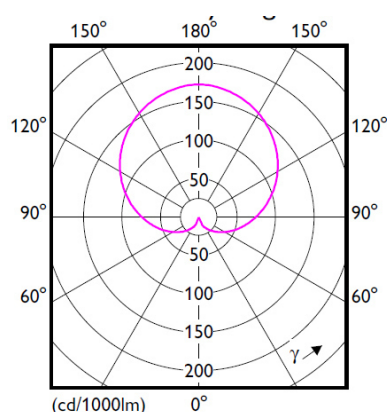


Figura 4.7 – Diagrama fotométrico da Lâmpada Philips CorePro LEDbulb

A grande maioria das lâmpadas possuem um diagrama fotométrico semelhante. A luz é emitida em frente, deixando a parte traseira sem luz. No entanto, em raras ocasiões e com construções muito específicas, conseguem atingir até 30 % de luz para trás.

- A limitação da dimensão da lâmpada, a necessidade de espaço para ótica e o limite de peso, limitam a dimensão do dissipador, que por sua vez limita a capacidade de dissipação da lâmpada. Por isso, existem poucas lâmpadas equivalentes a incandescentes de 100 W e praticamente nenhuma com equivalência acima disso, salvo algumas exceções, de produtos exageradamente grandes e desajeitados, cuja única função é produzir elevado fluxo luminoso.
- As fontes integradas nas lâmpadas LED facilitam a sua integração e aceitação no mercado, visto que, desta forma, podem ser usadas exatamente como as lâmpadas convencionais incandescentes ou fluorescentes. No entanto, as lâmpadas atingem temperaturas altas, limitando o tempo de vida da fonte de alimentação, que é altamente sensível ao calor. A figura a seguir, Figura 4.8, ilustra uma imagem térmica de um

conjunto de lâmpadas LED em funcionamento, na qual é possível verificar que valores de temperatura atingem os encapsulamentos das lâmpadas LED.

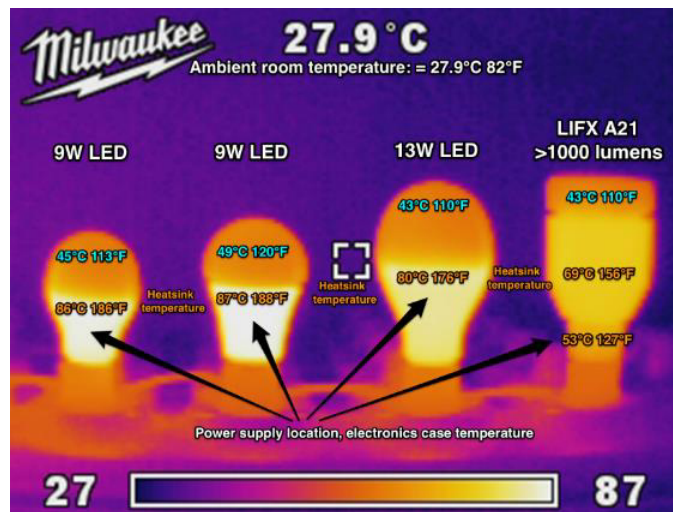


Figura 4.8 – Exemplo de temperaturas que a superfície de uma lâmpada LED pode atingir (LIFX, s.d.)

Com efeito, os *drivers* dos LED possuem componentes como condensadores eletrolíticos e circuitos integrados baseados em semicondutores, que são especialmente sensíveis ao calor e podem determinar o tempo de vida de uma lâmpada.

Os condensadores são normalmente classificados para uma temperatura de funcionamento, à qual corresponde um tempo de vida, por exemplo, 5000 h @ 85 °C. Isto significa que, operando em condições nominais (tensões e correntes de *ripple*) e a temperatura de 85 °C, este componente durará 5000 h em funcionamento contínuo. Este valor é pouco para uma lâmpada LED atual. Na Figura 4.8 pode-se ver que as temperaturas dos encapsulamentos estão próximas dos 85 °C, em alguns casos, acima disso. A este valor de temperatura acrescenta-se o aquecimento do próprio componente devido à corrente de *ripple* e a resistência série equivalente (*Equivalent Series Resistor* – ESR) que, por efeito de Joule, fazem subir a temperatura do componente acima da temperatura do ambiente onde está a operar. Existem condensadores com ratings maiores, 10000 h @ 105 °C, 5000 h @ 125 °C. O máximo normalmente encontrado no mercado é 20000 h @ 125 °C, sendo um componente raro e muito caro. Contudo, quanto mais resistente for o condensador, mais caro é, encarecendo também o custo da lâmpada, podendo a diferença ser de centavos para euros por unidade, dependendo do fabricante, das características do componente e das quantidades de compra. Outro facto relevante é que o tempo de vida de um condensador aumenta com a redução da temperatura. A relação entre o tempo de vida e a temperatura segue é descrita pela fórmula de reação química chamada Lei de Arrhenius, que afirma que o tempo de vida de um condensador duplica para cada diminuição de 10 °C na temperatura de funcionamento do mesmo. Ou seja, um condensador com rating 5000 h @ 85 °C durará 10000 h aos 75 °C, 20000 h aos 65 °C, etc. O oposto também se verifica, ou seja, cada subida de 10 °C, reduz para metade o tempo de vida do condensador.

Quanto aos semicondutores, tanto componentes simples como circuitos integrados, têm tipicamente uma temperatura interna máxima de operação, especificada pelo fabricante, e temperatura ambiente máxima de operação. Calcula-se a temperatura interna do componente multiplicando a resistência térmica entre a junção do semicondutor e um ponto de referência externo (*pad*, dissipador ou encapsulamento) e a potência nele dissipada, e somando a temperatura ambiente ($T_j = T_a + R_{jC} * P$). Os componentes são classificados para duas ou três temperaturas ambientes de operação, tipicamente 85 °C, 105 °C e 125 °C. A temperatura máxima de junção utilizada nos *ratings* dos componentes pode ser qualquer valor, mas raramente ultrapassa os 150 °C. Assim, verifica-se que temperaturas ambientes elevadas podem levar à destruição do componente, fazendo ultrapassar a temperatura interna máxima. Quanto ao custo, quanto mais resistente o componente, mais caro é.

Os componentes magnéticos, por exemplo transformadores e bobines, podem entrar em saturação caso a temperatura ambiente mais o incremento próprio, façam a temperatura do núcleo ultrapassar a temperatura para a qual foram projetados. E não podem simplesmente ser projetados para temperaturas extremamente elevadas porque, em primeiro lugar o núcleo ferroso tem limites, bem como o cobre dos enrolamentos tem diâmetros limitados pela dimensão final do componente.

- Para compensar as condições em que as fontes de alimentação trabalham, normalmente são utilizados componentes maiores, mais robustos, logo também mais caros. Componentes mais robustos requerem maior volume para a fonte de alimentação, logo menos espaço para dissipação térmica o que faz aumentar a temperatura e limita a potência aplicável na lâmpada. Este problema é acentuado quando se usa fontes comutadas isoladas (isolamento galvânico através do uso de um transformador de alta frequência). A alternativa é usar fontes não isoladas. Mas a esmagadora maioria dos fabricantes optam por não o fazer, visto que a fiabilidade e segurança do utilizador nestas fontes são mais difíceis de obter.

Em resumo, o *design* atual é obtido conseguindo um compromisso entre a potência, fluxo luminoso, fotometria, eficácia luminosa, dimensão, peso, tempo de vida e custo. Com a construção atual das lâmpadas, estes parâmetros não estão otimizados. Maximizar um deles significa comprometer outro(s).

4.7 Proposta de otimização do *design* das lâmpadas

O objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta de melhoria do *design* das lâmpadas LED que maximizem ou contribuam para maximizar os parâmetros referidos anteriormente (potência, fluxo luminoso, fotometria, eficácia luminosa, dimensão, peso, tempo de vida e custo), sem que a otimização de um comprometa um outro.

Analisando a constituição da lâmpada, algo se destaca: a localização da fonte de alimentação. A localização da fonte de alimentação, apesar de prática, é a causa de uma série de limitações na lâmpada. Separando a fonte de alimentação dos restantes constituintes da lâmpada significa que:

- A fonte seria colocada remotamente, e a lâmpada possuiria um mínimo de componentes eletrônicos, como por exemplo um circuito DC-DC regulador de corrente, que por sua vez pode ser construído com componentes menos sensíveis ao calor.
- A lâmpada passaria a ser alimentada em DC, baixa tensão.
- O volume para colocação do dissipador aumentaria. Ocupando o mesmo volume total da lâmpada, a área de dissipação poderia ser o dobro ou triplo do que existe nas lâmpadas atuais.
- Com mais espaço, se a potência se mantiver e a necessidade de dissipação também, o volume da lâmpada reservado para um dissipador com mesma capacidade de dissipação seria menor, dado que a área de dissipação pode ser maximizada no mesmo volume;
- Com menor volume do dissipador, mais espaço resta para ótica e para melhoria da fotometria da lâmpada.
- Sem a presença de componentes sensíveis da fonte, o dissipador pode ser menor pois a lâmpada passaria a poder operar a temperaturas mais elevadas. Os LED tipicamente suportam temperaturas entre 120 °C e 150 °C na junção do semicondutor. Com base na sua experiência, o autor pode afirmar que com um LED com 120 °C de temperatura máxima de junção, o MCPCB pode estar a operar a 110 °C sem problemas. Muitos fabricantes já o fazem, *overdrive* dos LED (corrente próxima ou acima da corrente máxima do componente), com a fonte ainda dentro da lâmpada, algo pouco recomendado.
- Deixa de haver necessidade de grandes distâncias de segurança entre o conector de alimentação da lâmpada e as partes metálicas, como acontece com as lâmpadas atuais que necessitam de uma distância mínima (sensivelmente 4 mm) e de uma peça de isolamento entre a base Edison e o dissipador da lâmpada.
- A fonte estando distante da principal fonte de calor, os LED e o seu dissipador, não necessita de componentes de elevado *rating*. Componentes eletrônicos básicos seriam suficientes. Por exemplo, um condensador de 5000 h @ 85 °C, com a fonte remota, se operar à 55 °C, por exemplo, para uma temperatura ambiente de 40 °C, terá um tempo de vida estimado de 40000 h. Numa lâmpada normal, esse mesmo condensador não duraria mais do que 5000 h, considerando que o dissipador da lâmpada estaria perto dos 85 °C, ou acima disso.
- O tempo de vida do conjunto lâmpada e fonte aumentaria consideravelmente, sem se introduzir nenhuma tecnologia nova nem usando componentes mais caros, muito pelo contrário.
- O custo total iria reduzir, dado que a fonte poderia ser constituída por componentes menos robustos, mais baratos e mais fáceis de encontrar no mercado. A lâmpada necessitaria de menos material no dissipador, poder-se-ia utilizar menos LED e fazer *overdrive* nos LED, dado que a temperatura deixa de ser um problema. Mesmo em muito altas temperaturas, 120 °C por exemplo, os LED têm uma extraordinária durabilidade.

Contudo, os factos apresentados anteriormente são de conhecimento geral. Até aqui nenhuma inovação foi introduzida, mas antes pelo contrário. O mercado não está recetivo a ter uma lâmpada com uma “caixa ao lado”. O consumidor está habituado a comprar lâmpadas e enroscá-las no casquilho. Uma lâmpada com uma caixa com o *driver* ao lado não é produto que o mercado aceitaria. A inovação deste trabalho é introduzida aqui: “como fazer uma lâmpada com fonte remota, mas que seria facilmente integrável no mercado e aceite pelos consumidores?”.

5. Conceito de Produto

Designação para o produto: Casquilho Eletrónico Ativo (*Active Electronic Socket – AES*) e Base Eletrónica Ativa (*Active Electronic Base – AEB*) para lâmpadas LED.

A solução para o problema da integração no mercado e aceitação por parte do consumidor passa por manter o conceito de utilização que o consumidor tem: enroscar uma lâmpada num casquilho.

Assim, o conceito de produto idealizado e concebido passa pelo desenvolvimento de um casquilho que possa albergar uma fonte comutada isolada no seu interior, providenciando tensão fixa DC (*Safety Extra Low Voltage – SELV*) num conector para a lâmpada utilizar. A constituição da lâmpada seriam o módulo LED, a ótica, o dissipador e a AEB. A Figura 5.1 é uma representação global do conceito idealizado.

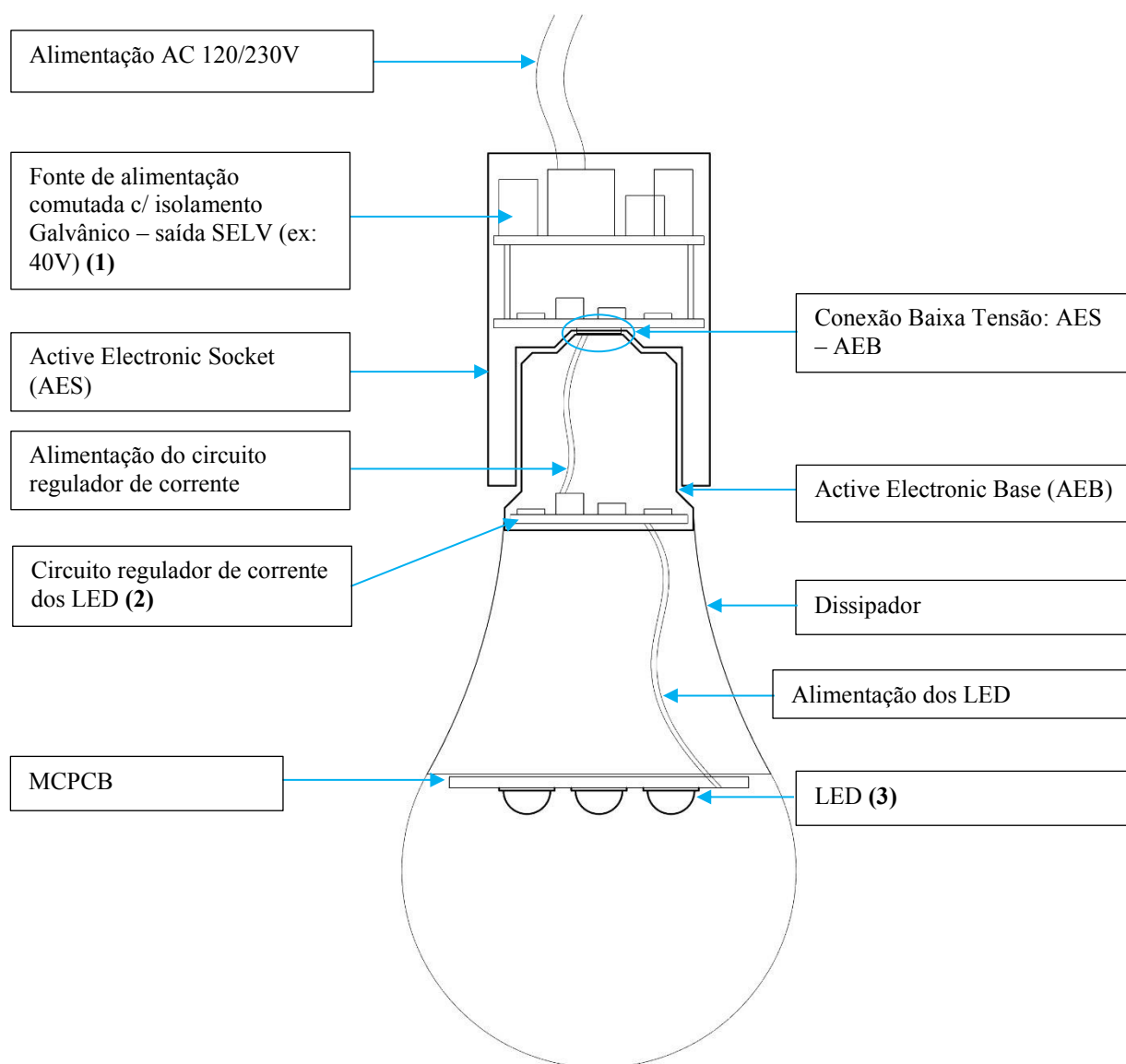


Figura 5.1 – Representação do Conceito de Produto

Desta forma, o conceito que o consumidor tem de uma lâmpada para iluminação geral é mantido, tendo-se apenas que preservar a não compatibilidade física da ligação entre AES e AEB com as lâmpadas com roscas. Contudo, isso não é um problema. Os consumidores estão habituados a comprar lâmpadas de roscas E27 para os casquilhos E27 que têm em casa, lâmpadas GU10 para casquilhos GU10, lâmpadas E14 para casquilhos E14, etc. Do ponto de vista prático para o consumidor, a introdução deste produto seria apenas mais um casquilho diferente no mercado. Não acarretaria nenhuma dificuldade adicional relativamente à sua situação atual. Desta forma, fica ultrapassado o problema da integração do mercado de lâmpadas com fontes não integradas. Para mais, sendo compatível em termos dimensionais com os casquilhos convencionais, estes poderão ser imediatamente substituídos pelos próprios consumidores nas aplicações que têm em casa, à medida que os fabricantes os vão introduzindo nos seus produtos como candeeiros e luminárias.

5.1 Vantagens do conceito

Podem-se listar os seguintes pontos como principais vantagens do conceito:

- A fonte de alimentação externa maximiza a capacidade de dissipação da lâmpada.
- O volume da lâmpada disponível para a dissipação aumenta consideravelmente.
- Possibilita o fabrico de lâmpadas LED equivalentes 100W ou 150W sem dificuldades.
- Há uma redução considerável na temperatura de funcionamento da fonte.
- A redução da temperatura da fonte aumenta o tempo de vida da mesma.
- A redução de temperatura da fonte possibilita também a utilização de componentes com menor *rating*, logo mais baratos.
- O tempo de vida da lâmpada aumenta fortemente, uma vez que passa a depender unicamente dos LED e estes são extremamente duradouros.
- O tempo de vida e a performance dos LED melhoram se for aproveitada a capacidade máxima de dissipação da lâmpada.
- O volume para colocação da ótica aumenta, devido à redução do dissipador, abrindo possibilidades para óticas completamente omnidirecionais.
- A fiabilidade da lâmpada e a segurança do utilizador não são postas em causa uma vez que a fonte comutada pode ser igualmente isolada. Alguns fabricantes recorrem a fontes não isoladas para alcançar um efeito com desempenho semelhante ao que se pretende alcançar com este trabalho, mas estas são mais suscetíveis aos ruídos da rede elétrica, o que as faz menos fiáveis, e menos seguras para o utilizador. Este tipo de solução é normalmente adotado para lâmpadas *low cost*. Aqui, obtêm-se lâmpadas *low cost* sem comprometer a fiabilidade do produto nem a segurança do utilizador.
- Dispensa-se uso do casquilho Edison, tendo menos um componente.
- Uma vez que a saída da fonte é isolada e de muito baixa tensão, o próprio dissipador pode ser usado como condutor. Assim, a base (a metade que fica ligada à lâmpada e que

encaixa no casquilho) pode formar uma peça única com o dissipador, desde que o segundo contacto de alimentação, e um eventual terceiro, sejam isolados do dissipador.

- O dissipador pode operar a temperaturas mais elevadas uma vez que os LED normalmente suportam temperaturas do ponto de soldadura acima dos 110 °C.
- Pode ser reduzida a quantidade de LED em troca do aumento da corrente do mesmo, dado que o dissipador dá margem para maior potência térmica dissipada. E ainda que o tempo de vida dos LED reduzam, pode, sem dificuldades, ser superior ao tempo de vida atual das lâmpadas LED.
- Os casquilhos atuais são de cerâmica ou termoplásticos, para suportar temperaturas bastante elevadas, pois são feitos para funcionar com lâmpadas incandescentes. As peças do conceito idealizado, sendo exclusivos para LED, podem ser de plásticos mais baratos que suportem temperaturas mais baixas.
- A ligação da fonte de alimentação para a lâmpada pode ser feita em sistema de dois ou três contactos. Dois contactos é o mínimo para passagem da alimentação. Um terceiro contacto pode existir para comunicações entre a fonte e a lâmpada, ou então *dimming* por PWM, ou para IoT, por exemplo. Ou simplesmente 2 contactos e a comunicação entre a lâmpada ser feita sobre o sinal de alimentação, por exemplo, por inversão da polaridade da tensão ou modulação do sinal de comunicação sobre a alimentação, à semelhança do que acontece em *Power Line Communications*. Existem assim várias possibilidades de trabalho para integração do IoT, comunicações e *dimming* na lâmpada.
- As fontes de alimentação podem ser compatíveis com o triac *Dimming*, à semelhança do que já existe.
- O aumento de espaço disponível na lâmpada possibilita uma infinidade de *designs* inovadores, sem comprometer o desempenho ou tempo de vida.
- As lâmpadas passam a ser produtos baratos uma vez que não são mais do que um módulo de LED.

5.2 Desvantagens do conceito:

Os seguintes pontos podem apresentar-se como desvantagens ou necessidade primária do conceito.

- Em primeiro lugar, é diferente, novo, logo necessita da aprovação do mercado consumidor;
- Maior dificuldade na substituição em caso de avaria da fonte no casquilho. Contudo, a previsão é que sejam muito menos frequentes que na atualidade, excluindo produtos defeituosos. Avaria pelo fim de vida será muito menos frequente;
- Normalização. É necessário um conjunto de normas que una os fabricantes para a criação de produtos tal como o conceito os idealiza: funcionais, com melhorias claras em relação ao conceito atual das lâmpadas e compatíveis entre si;

5.3 Imagem primordial do conceito de produto

O casquilho seria uma peça plástica, com capacidade para albergar uma fonte de alimentação comutada no interior, tal como representado na Figura 5.2 (a). As suas dimensões são semelhantes às dimensões dos casquilhos de plástico E27. Além de dimensões compatíveis com as estruturas que existem para casquilhos E27, o topo do casquilho é compatível com a tampa de rosca que é comum existir nos casquilhos E27 de plástico, para enroscar em varões dos cadeiros ou outro tipo de suporte.

Do lado da lâmpada, existe uma base compatível com o casquilho, também feita em plástico, como apresentado na Figura 5.2 (b). A base encaixa no casquilho e fica fixa ao rodar 90° para a direita.

No casquilho existem estruturas que fixam e pressionam a base para prevenir o desacoplamento involuntário devido a movimentos e vibrações.

A ligação entre a base e o casquilho é estabelecida por um conector DC de 3 pinos existente na fonte, do lado do casquilho. Do lado da lâmpada, na base, existe um contacto de 2 ou 3 posições no topo, que estabelece a ligação com o conector no casquilho ao introduzir-se a base no casquilho e rodar 90° para direita, tal como representado na Figura 5.2 (c).

Uma vez que a fonte deve fornecer uma tensão fixa genérica, para que os LED funcionem, necessitam de um circuito que regule a corrente que os atravessa, para funcionamento adequado da fonte e dos LED. Assim, no interior da base, existe uma pequena placa com um simples regulador de corrente para controlar a corrente que atravessa os LED.

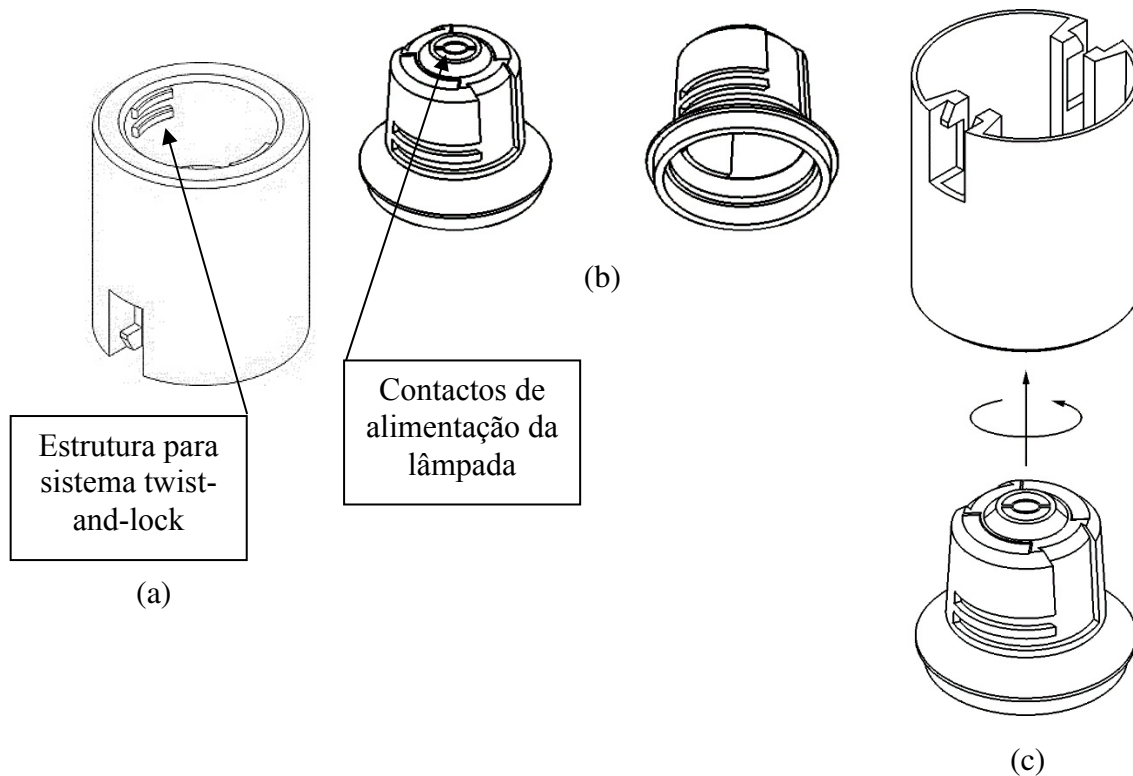


Figura 5.2 – Imagem Primordial do Conceito de Produto: (a) Casquilho AES; (b) Base AEB; (c) Encaixe entre AES e AEB

5.4 Prova de conceito

Para que este conceito funcione verdadeiramente bem, será necessário normalizá-lo para assegurar a segurança, performance, e compatibilidade entre produtos. Mas para prova de conceito, foram definidos um conjunto de requisitos para o casquilho e para a fonte de alimentação.

Foi também desenvolvido o protótipo do AES e da AEB, e fabricados por impressão 3D. Foi também projetado e fabricado um protótipo de uma fonte de alimentação e dois circuitos reguladores de corrente, um para constar numa lâmpada DC de 12 W e outro para outra lâmpada DC de 8,5 W.

Os protótipos servem de prova de que o conceito é possível implementar.

O protótipo da AES será ensaiado com 15 W e 10 W (potências consumidas totais) para alimentar duas lâmpadas com dimensões semelhantes às lâmpadas atualmente comercializadas, com 12 W e 8,5 W (potências consumidas pelas lâmpadas DC), e verificados os registos térmicos para determinar se são funcionais ou não.

Os componentes usados para prototipagem foram componentes disponíveis na hora e não os mais adequados pois estes têm tempos de obtenção grandes, que impossibilitariam a realização da montagem e dos testes atempadamente.

5.4.1. Requisitos para conceção do protótipo do AES e da AEB

Os requisitos mínimos para conceção do AES e da AEB estão enumerados abaixo.

- Material: Polímeros. São materiais baratos e fáceis de obter, por injeção por molde. É o método mais barato de obter peças plásticas, de forma rápida e repetitiva. Na prova de conceito, os protótipos serão obtidos por impressão 3D em ABS.
- Dimensão: semelhante aos casquilhos de rosca Edison, para compatibilidade com as estruturas existentes.
- Ligação rápida, *twist-and-lock*.
- Proteção contra desacoplamento involuntário provocado por vibrações ou movimentos não propositados.
- Capaz de suportar o peso de uma lâmpada LED equivalente 100W.
- Fácil ligação à instalação elétrica e substituição dos casquilhos existentes.

Requisitos mínimos para conceção Fonte e de Alimentação

Os requisitos mínimos para conceção da fonte de alimentação estão enumerados abaixo.

- Ligação de entrada: 230Vac/50 Hz.
- Ligação de entrada por conexão *push-in* ou *poke-in*, unifilar e multifilar.
- Saída em tensão: 40 V, 48 V ou outro valor de baixa tensão segura (SELV).
- Potência: 15 W potência máxima fornecida.

- Eficiência: maior que 80%;
- Isolamento: Isolamento galvânico, Classe II, para garantir segurança do utilizador.

5.4.2.Obtenção das peças mecânicas

As peças mecânicas do protótipo do AES e da AEB foram desenhadas no software Rhinoceros 3D, de acordo com os requisitos e especificações estabelecidos. As figuras a seguir, Figura 5.3, Figura 5.4 e Figura 5.5, ilustram o desenho 3D das peças concebidas.

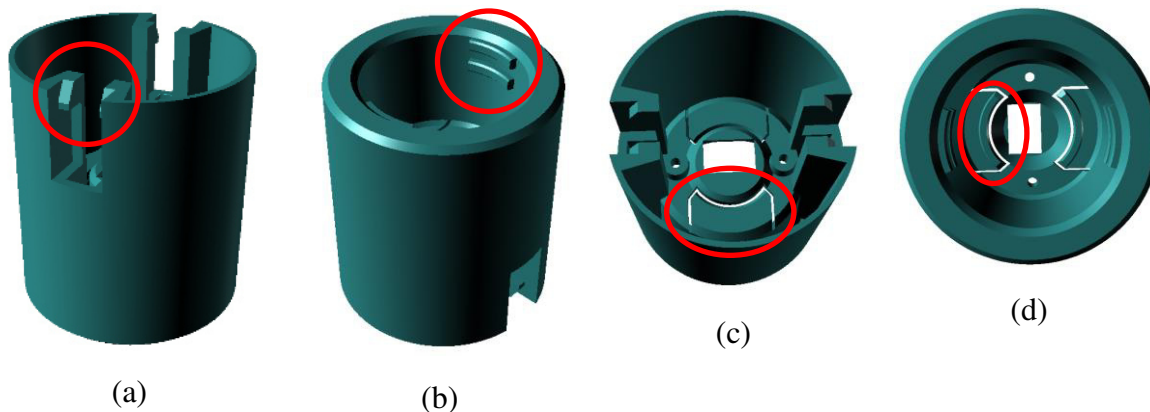


Figura 5.3 – Representação 3D do casquilho AES em diferentes vistas

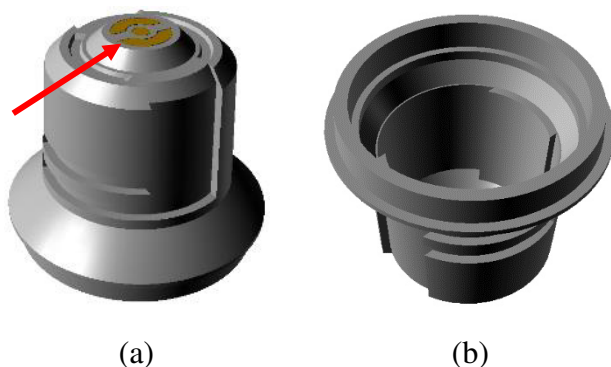


Figura 5.4 – Representação 3D da base AEB em diferentes vistas

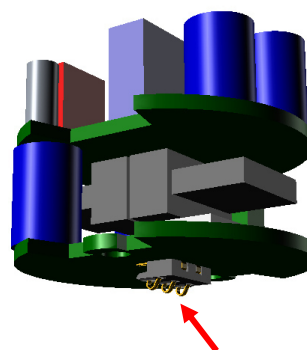


Figura 5.5 – Representação 3D da Fonte de Alimentação

Na Figura 5.3, observa-se o casquilho AES em diferentes vistas. É possível observar pormenores construtivos como retentores de encaixe da base (b), retentores de encaixe para compatibilidade com estruturas feitas para fixação de casquilhos convencionais (a) e o sistema de prevenção contra desacoplamento involuntário da base AEB (c & d).

Na Figura 5.4, observa-se a base AEB em diferentes vistas. Em (a), podem-se ver os contactos metálicos que estabelecem a ligação ao conector da fonte de alimentação (Figura 5.5).

A figura a seguir, Figura 5.6, representa a montagem final e o encaixe entre o casquilho e a base, em diferentes vistas. É possível observar em (b) o conector que permite ligação rápida e fácil da alimentação à instalação elétrica.

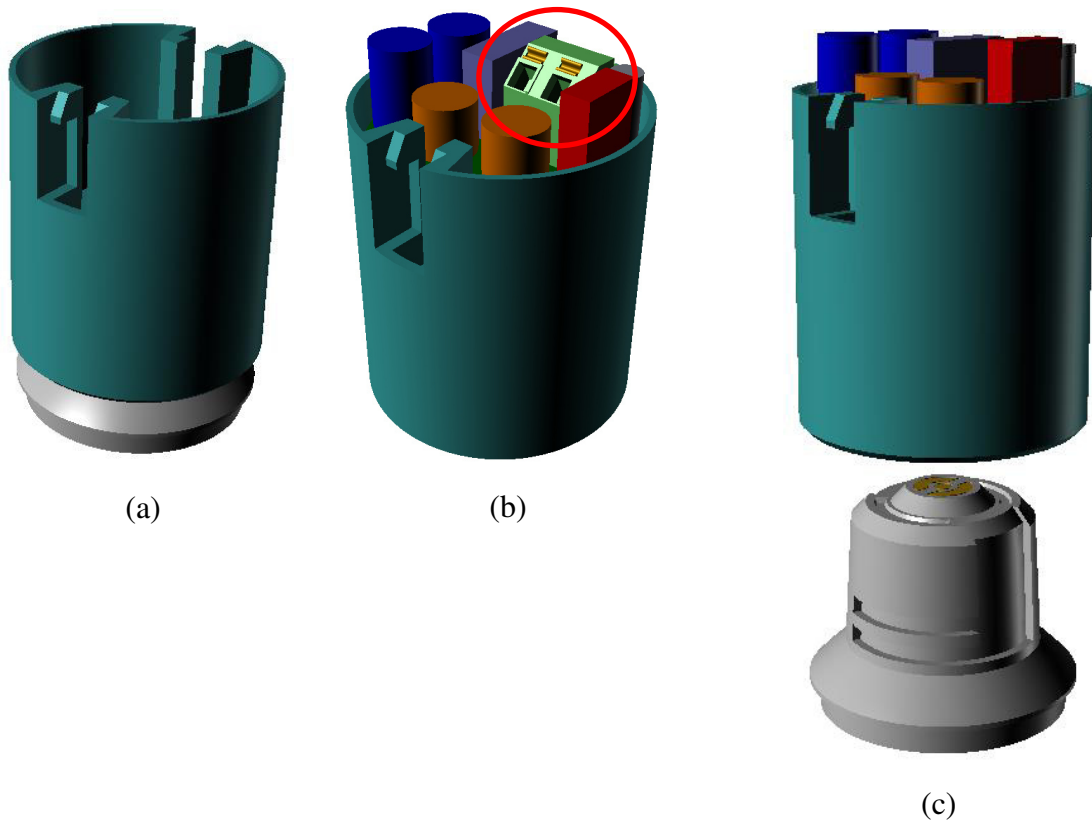


Figura 5.6 – Representação 3D da integração do casquilho, case e fonte de alimentação

Quanto ao fabrico das peças, os protótipos foram obtidos por impressão 3D. A Figura 5.7 ilustra as peças impressas.



Figura 5.7 – Peças mecânicas AES e AEB obtidas por impressão 3D

5.4.3. Obtenção da fonte de alimentação e regulador de corrente para o LED

Para a gama de potências e finalidade da fonte de alimentação, o *flyback* é a topologia mais indicada para a fonte, sendo também a mais utilizada entre os fabricantes de iluminação. Tem vantagens óbvias tais como: poucos componentes; um único semiconductor para comutação; possibilidade de atingir elevados valores de fator potência; eficiência aceitável dada a gama de potências (maior 80%, tipicamente); facilidade de controlo; baixo custo de fabrico quando comparado com outras topologias de fontes isoladas.

A fonte funcionará em modo descontinuo (DCM). Como se pode ver na Figura 5.8, o modo descontinuo difere do modo contínuo na medida em que, no primeiro caso, quando o semiconductor de comutação no lado do primário é ligado e se inicia o ciclo de comutação, a corrente no lado do secundário já se terá esgotado, ou seja, não existirá qualquer energia armazenada no transformador no início do ciclo. No segundo caso, no modo contínuo (CCM), acontece o oposto: quando se inicia um novo ciclo no primário, o enrolamento secundário ainda tem corrente a circular. O modo crítico (CrCM), referido abaixo, define a fronteira de transição do modo descontinuo para modo contínuo, assemelhando-se em tudo que respeita a vantagens, desvantagens e dimensionamento, ao modo descontinuo.

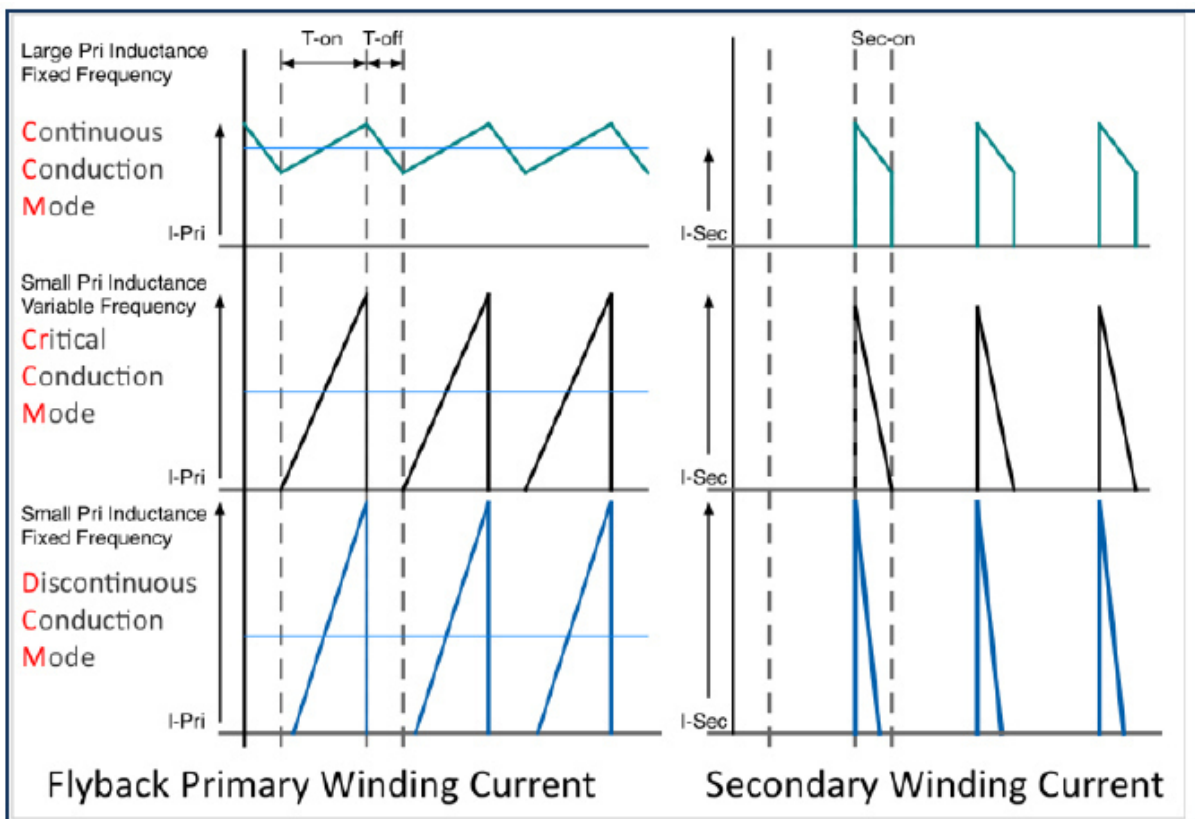


Figura 5.8 – Modos de operação do conversor *flyback* (Infineon Technologies)

Application Advantage	DCM	CCM
Smaller transformer * (not considering efficiency)	✓	
Faster Transient Response	✓	
Ease of Feedback Loop and Current Loop compensation	✓	
Zero Reverse Recovery Loss on Rectifier Diode and Low Turn-on Loss for Flyback Switch	✓	
Lower Primary and Sec RMS Current factor		✓
Smaller Output Capacitor, lower ripple current		✓
Cross regulation for multiple outputs		✓
Peak MOSFET and Diode current		✓
RMS Loss in transformer windings		✓
Flux ripple excursion in transformer core		✓

Figura 5.9 – Comparação dos modos de operação do conversor *flyback* (Infineon Technologies)

Os dois modos têm vantagens e desvantagens. O quadro na Figura 5.9 resume as vantagens e desvantagens de cada modo.

Os módulos eletrônicos que constituem o produto (fonte de alimentação, os circuitos reguladores de corrente e os LED) estão estruturados da seguinte forma:



Figura 5.10 – Estrutura dos módulos eletrônicos do produto

5.4.3.1 Especificações para concepção fonte

Apresenta-se de seguida as especificações para concepção da fonte de alimentação, na Tabela 5.1. Está é a fonte principal, a ser colocada dentro do AES, que fornecerá tensão de alimentação para as lâmpadas. A sua localização no protótipo corresponde ao ponto (1) da Figura 5.1

Tabela 5.1 – Especificações para concepção da fonte de alimentação

Topologia: Flyback (DCM)	Duty Cycle Máximo: 50 %
Potência de Saída Máxima: 15 W	Tensão Mínima: 85 % Tensão Nominal
Eficiência: > 80 %	Tensão Máxima: 115 % Tensão Nominal
Fator Potência: > 0,5	Tensão de saída: 40 V
Tensão Nominal: 230Vac 50 Hz	Ripple da Tensão de Saída: 1%
Ripple do Barramento Primário: 10 %	Consumo em Stand-by: < 0,5 W

5.4.3.2 Especificações para concepção do regulador de corrente 2x165mA

Apresentam-se as especificações para concepção do primeiro circuito regulador de corrente na Tabela 5.2. Este circuito possui duas saídas *step-down*, cada uma regulada para alimentar o LED com 165 mA. A sua localização no protótipo corresponde ao ponto (2) da Figura 5.1.

Tabela 5.2 – Especificações para concepção do primeiro circuito regulador de corrente

Número de Saídas: 2
Tensão de Entrada: 40 V
Tensão LED @ 1 Saída: 36 V
Corrente LED @ 1 Saída: 165 mA
Eficiência: > 0,9

5.4.3.3 Especificações para concepção do regulador de corrente 1x235mA

Apresentam-se as especificações para concepção do primeiro circuito regulador de corrente na Tabela 5.3. Este circuito possui uma saída *step-down*, regulada para alimentar o LED com 235 mA. A sua localização no protótipo corresponde ao ponto (2) da Figura 5.1.

Tabela 5.3 – Especificações para concepção do segundo circuito regulador de corrente

Número de Saídas: 1
Tensão de Entrada: 40 V
Tensão LED @ 1 Saída: 36 V
Corrente LED @ 1 Saída: 235 mA
Eficiência: >0,9

5.4.3.4 Funcionamento do conversor *Flyback*

O conversor *flyback*, representado na Figura 5.11, é usado para conversão AC/DC e DC/DC, com isolamento galvânico entre a entrada e as saídas. É um conversor *buck-boost* em que o indutor é substituído por um transformador, ganhando-se vantagens com a razão de transformação e isolamento do transformador.

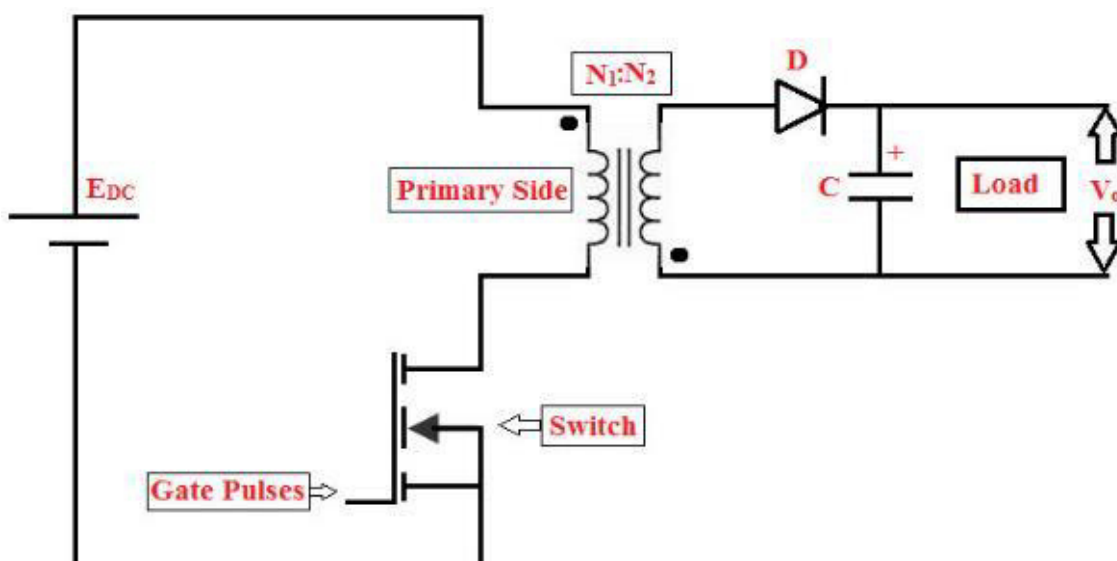


Figura 5.11 – Conversor DC-DC *flyback* (elprocus.com, s.d.)

O funcionamento do *flyback* é simples: quando o semicondutor do primário inicia a condução, normalmente um MOSFET, a corrente no enrolamento do primário sobe em rampa acumulando energia no transformador, até que o MOSFET é desligado anulando completamente a corrente. Nesse momento, o enrolamento secundário inicia a condução até que se esgota toda a energia no transformador. A Figura 5.12 ilustra o funcionamento do *flyback*.

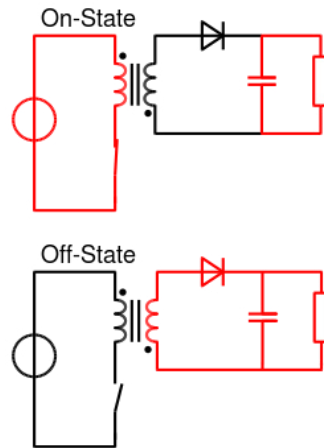


Figura 5.12 – Operação do conversor *flyback* (Wikipedia.org, s.d.)

No lado do secundário, existe um diodo que retifica a tensão de saída, uma vez que no momento em que o primário conduz e armazena energia no campo magnético do transformador, o enrolamento secundário tem uma tensão negativa relativamente a tensão de saída, pelo que o diodo fica em bloqueio.

Do lado do primário, existe um circuito *clamp*, em paralelo com o primário do transformador, cuja função é dissipar a energia que não é entregue no secundário, derivada das indutâncias de fuga do transformador.

A Figura 5.13 ilustra as formas de onda fundamentais do *flyback*, em modo descontínuo: a tensão aos terminais do MOSFET (a), a corrente do primário (b) e a corrente do secundário (c).

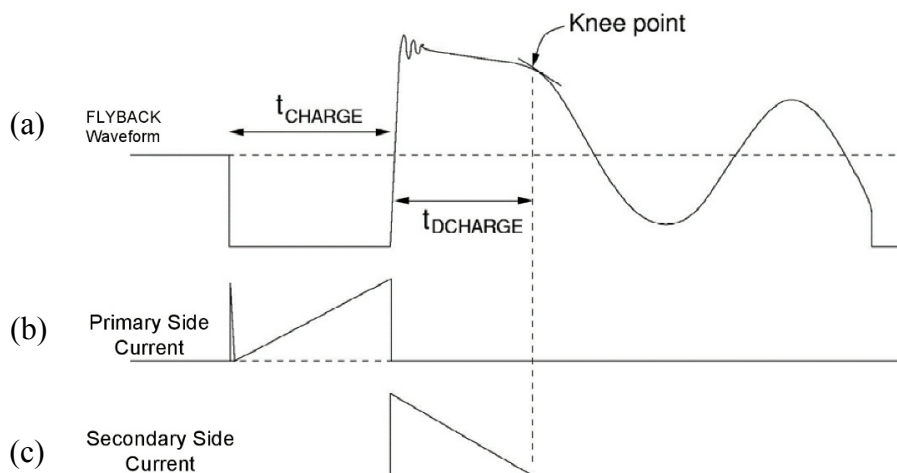


Figura 5.13 – Formas de onda fundamentais do *flyback* (Wikipedia.org, s.d.)

O formato da corrente no primário já foi referido anteriormente: uma subida em rampa anula-se no momento em que o MOSFET pára de conduzir. Enquanto a corrente do primário se extingue, quase instantaneamente, a corrente do secundário sobe da mesma forma e após atingir o pico máximo, descarrega em função da indutância do enrolamento e da tensão á saída do secundário. Quanto ao formato da tensão, enquanto o MOSFET conduz, período “ t_{CHARGE} ” na Figura 5.13, a tensão entre o *drain* e a *source* é nula. Quando o MOSFET para a condução, a tensão sobe rapidamente e verifica-se uma oscilação inicial após um pico de tensão. Esse pico e a oscilação devem-se à indutância de fuga do transformador e traduz a energia dissipada no circuito e *clamp*. No período que se segue à oscilação, a tensão aos terminais do MOSFET é mais ou menos estável e é igual a tensão do barramento somada à tensão do secundário refletida no primário. Quando o secundário para de conduzir, ao fim de “ t_{DCHARGE} ” na Figura 5.13, verifica-se uma grande oscilação na tensão aos terminais do MOSFET. Essa oscilação deve-se à ressonância entre a indutância primária e a capacidade parasita aos terminais do MOSFET.

5.4.3.5 Seleção de Componentes Fundamentais

- **Integrado controlador do *flyback*:**

O controlador escolhido para o protótipo é o integrado INN2904 K da família InnoSwitch da Power Integrations, ilustrado na Figura 5.14, cujo esquema base de utilização está representado na Figura 5.15:



Figura 5.14 – InnoSwitch INN2904 K, Power Integrations (Power Integrations, 2016)

A escolha deste integrado baseou-se nas vantagens importantes que o mesmo acrescenta:

- MOSFET integrado;
- Dispensa o uso de opto-isoladores;
- Controlador do primário e do secundário num só encapsulamento;
- Dispensa malhas de realimentação;
- Reduz consideravelmente a Lista de Material (*Bill of Materials – BoM*);
- Frequência de funcionamento próxima do desejado;
- Facilita a construção de fontes diminutas com elevada densidade de potência;
- Consumo em *stand-by* abaixo dos 10mW;
- Garante o isolamento entre primário e secundário para construção de fontes Classe II;
- Permite funcionamento em modo Corrente Constante (CC) ou Tensão Constante (CV);
- Permite funcionamento em Modo Contínuo ou Descontínuo;
- Retificação Síncrona no secundário para melhoria da eficiência;

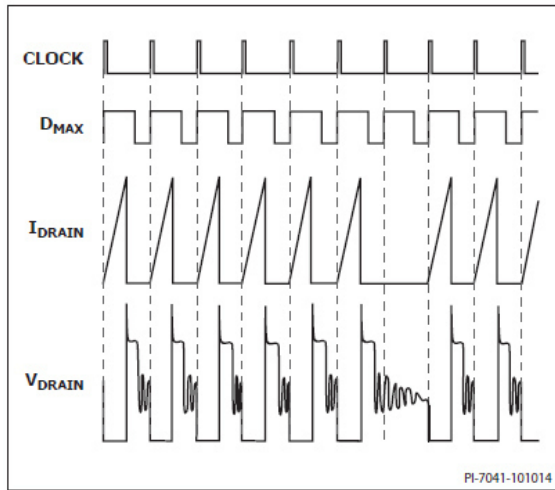


Figure 7. Operation at Near Maximum Loading.

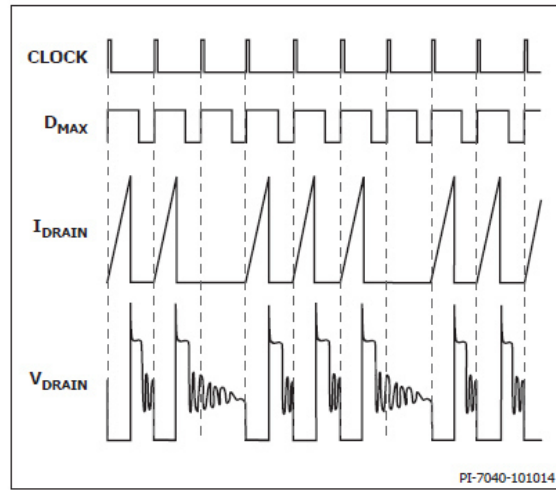


Figure 8. Operation at Moderately Heavy Loading.

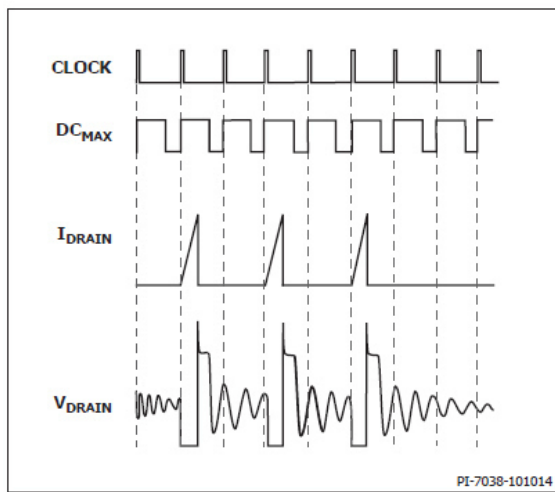


Figure 9. Operation at Medium Loading.

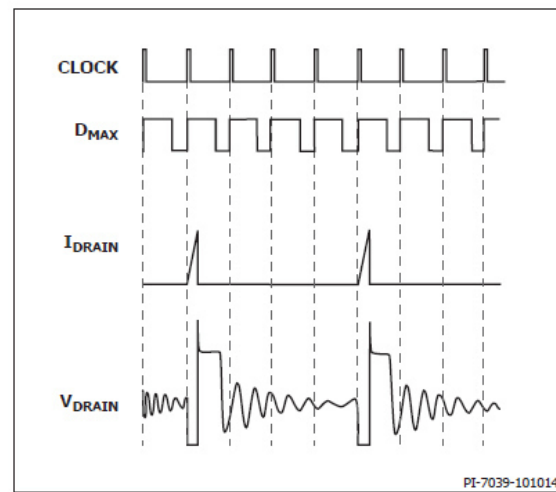


Figure 10. Operation at Very Light Load.

Figura 5.16 – Funcionamento do controlador INN2904 K consoante a potência requerida (Power Integrations, 2016)

As principais especificações do controlador estão listadas abaixo:

- Frequência de comutação: 100 kHz
- MOSFET 900 V
- Corrente limite do primário: 1150 mA @ $C_{BPP}=1\mu F$
- *Duty cycle* máximo: 60 %
- *Feedback* da tensão saída: 1.265 V
- *Feedback* corrente saída: 35 mV

• **Transformador:**

O transformador utilizado na prototipagem é um transformador planar, desenvolvido na CWJ Power Electronics.

As principais especificações do transformador estão listadas abaixo:

- Tipo: transformador planar *flyback*;

- Núcleo: ferrite (E+PLT);
- Indutância primária: 233,3 uH;
- Corrente saturação primário @ B=300 mT: 1,22 A
- Razão de transformação primário-secundário (n1): 3
- Razão de transformação primário-terciário (*bias*) (n2): 6
- Número de saídas: 2 (uma saída com ligação a meio enrolamento secundário).

5.4.3.6 Cálculos de dimensionamento

A fonte será dimensionada para a potência máxima disponível para entregar no secundário: 15 W. O esquema do protótipo da fonte foi baseado no esquema base fornecido pelo fabricante, semelhante ao da Figura 5.15.

A seguir apresentam-se os cálculos fundamentais para o dimensionamento dos principais sectores da fonte.

- **Filtro EMI**

A sigla EMI designa *Electromagnetic Interference* (Interferência Eletromagnética). As fontes comutadas, e não só, produzem e são suscetíveis ao ruído na rede elétrica. O nível de ruído produzido pela fonte está limitado por normas, que obrigam a filtragem do mesmo. Contudo, pela natureza complexa do problema, este tema não será abordado no âmbito deste trabalho. Será acautelado o espaço para colocação do filtro na placa de circuito impresso, mas não terá seguimento nos cálculos ou medições.

- **Barramento DC**

O barramento DC é criado retificando a tensão sinusoidal e alternada da rede através de uma ponte retificadora com díodos. É, depois, necessário colocar um elemento de armazenamento de energia, “C3” na Figura 5.17. O elemento acumulador é um condensador, normalmente eletrolítico pois são os que conseguem maiores capacidades em menores volumes. Este mantém a tensão estável durante o período em que a tensão da rede diminui.

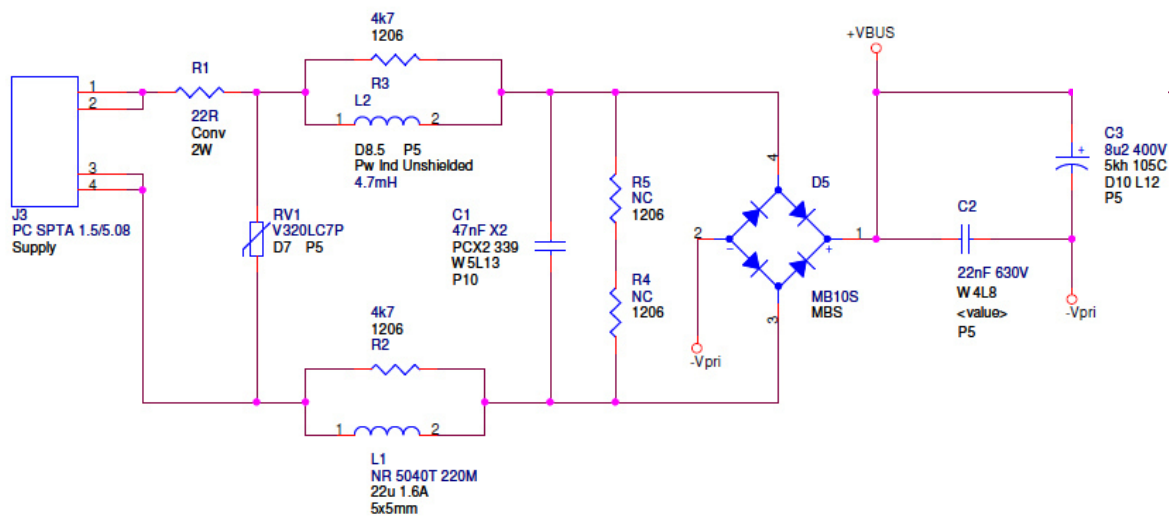


Figura 5.17 – Bloco do Filtro EMI e da retificação da corrente AC

A tensão é mantida próxima do valor de pico da senoide, conforme apresentado na Figura 5.18.

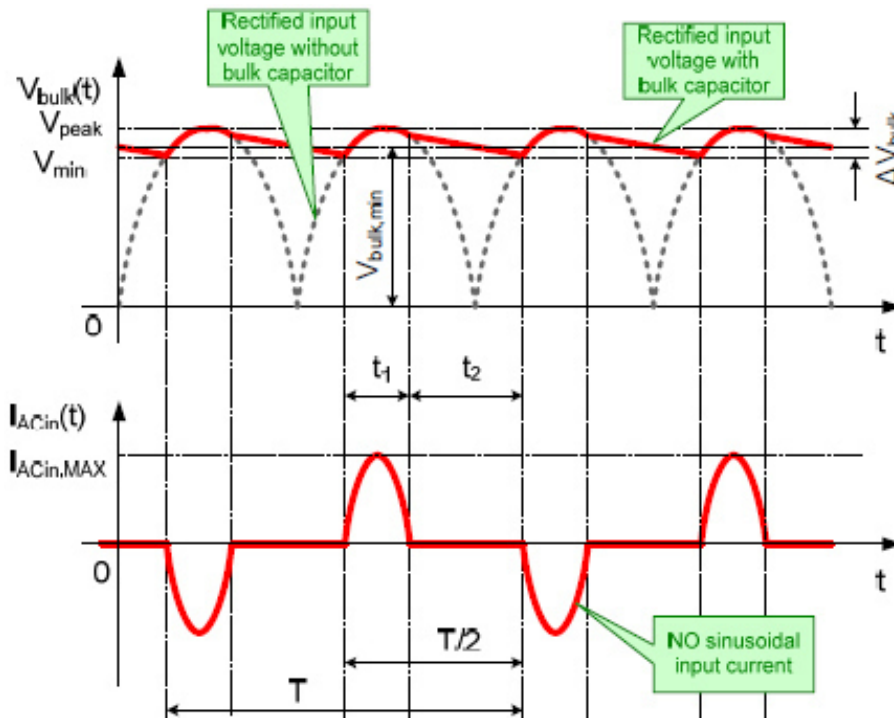


Figura 5.18 – Formas de onda da tensão e da corrente típicas das fontes comutadas sem correção do fator potência (On Semiconductor)

Para dimensionar com precisão o condensador, seria necessário recorrer a simulações para determinar o momento exato de transição, em que o *flyback* deixa de ser alimentado diretamente da rede e passa a ser alimentado pelo condensador. Este instante varia de fonte para fonte. No entanto, pode-se obter um valor funcional assumindo uma aproximação para o valor do tempo de descarga e assumindo que a corrente sai do condensador de forma constante (valor médio).

A capacidade do condensador C3 para o barramento, C_{bulk} , é calculada através da seguinte aproximação:

$$C_{bulk} = \frac{I_{avg} \times t_2}{\Delta V_{bulk}} \quad (1)$$

$$I_{avg} = \frac{P_{in}}{V_{peak} - \frac{\Delta V_{bulk}}{2}} \quad (2)$$

$$V_{peak} = V_{in\ rms} \times \sqrt{2} \quad (3)$$

em que:

- P_{in} : potência consumida. Para dimensionamento, estima-se este valor através da potência fornecida pela fonte (parâmetro de projeto) e da eficiência, que por sua vez também é estimada, tipicamente nos 85%.
- I_{avg} : corrente média fornecida ao *flyback*.
- ΔV_{bulk} : *ripple* da tensão do barramento (parâmetro de projeto).
- V_{peak} : pico da tensão do barramento.

- t_2 : tempo de descarga do condensador, conforme a Figura 5.18. Corresponde ao período em que a tensão aos terminais de C_{bulk} é superior a tensão da rede; para cálculos de dimensionamento, estima-se ser igual a 8.5ms.

Para as especificações indicadas no capítulo 5.4.1, calcula-se o valor de C_{bulk} utilizando as expressões (1), (2) e (3):

$$P_{in} = 15 \text{ W} \quad V_{in \text{ peak}} = 230 \times \sqrt{2} = 326,6 \text{ V} \quad \Delta V_{bulk} = 0,1 \times 326,6 = 32,66 \text{ V}$$

$$I_{avg} = \frac{15}{326,6 - \frac{32,66}{2}} = 0,0483 \text{ A} \quad C_{bulk} = \frac{0,0483 \times 0,0085}{32,66} \cong 12,6 \text{ uF}$$

Por razões logísticas, foi utilizado um condensador de 8,2uF na implementação prática. O efeito que causará é maior amplitude na tensão de *ripple*, que por sua vez dependerá da potência média que a fonte fornecer.

O valor eficaz (rms) da corrente *ripple* do condensador ($I_{C_{bulk}}$) do barramento pode ser calculado da seguinte forma:

$$I_{C_{bulk}} = \frac{I_{pkp} \times D \times \sqrt{\frac{4}{3 \times D} - 1}}{2} \quad (4)$$

$$D = \frac{\sqrt{2,5 \times L_{prim} \times (V_{out} + V_D) \times I_{out} \times F_{sw}}}{V_{in \text{ min}}} \quad (5)$$

em que:

- I_{pkp} : corrente de pico do primário; parâmetro de projeto; especificação do controlador.
- D : duty cycle previsto.
- L_{prim} : indutância primária do transformador.
- V_{out} : tensão DC de saída do *flyback*.
- V_D : tensão de polarização direta do diodo retificador na saída do *flyback*.
- I_{out} : corrente DC de saída do *flyback*.
- f_{sw} : frequência de comutação do controlador da fonte.

$$D = \frac{\sqrt{2,5 \times 233,3 \mu\text{H} \times (40 + 0,7) \times 300 \text{ mA} \times 100 \text{ kHz}}}{326,6 - 32,66} = 0,0908 \quad D = 9,08\%$$

$$I_{pkp} = 1,15 \text{ A} \quad I_{C_{bulk}} = \frac{1,15 \times 0,0908 \times \sqrt{\frac{4}{3 \times 0,0908} - 1}}{2} = 0,193 \text{ A}$$

• Tempo T_{on} do controlador

O tempo T_{on} é o período em que o MOSFET, do primário está em condução. É durante este período que é armazenada energia para ser entregue ao secundário. Este tempo varia instantaneamente com a tensão do barramento DC.

$$T_{on\ max} = \frac{L_{prim} \times I_{pkp}}{V_{in\ min}} \tag{6}$$

$$T_{on\ max} = \frac{233,3\mu H \times 1,15}{326,6 - 32,66} = 0,913\ \mu s$$

• **Balço de energia**

Os parâmetros corrente de pico do primário, frequência de comutação, indutância primária, razão de transformação e tensão de saída da fonte já estão definidos. Então, é necessário calcular a potência disponível do lado do primário para ser entregue no secundário (P_p), com exceção da energia consumida no circuito de *clamping*, através da expressão apresentada em (7).

$$P_p = \frac{1}{2} \times L_{prim} \times I_{pkp}^2 \times f_{sw} \tag{7}$$

em que:

- P_p : potência disponível no primário do transformador para ser transferida para o secundário.

Ou seja:

$$P_p = \frac{1}{2} \times 233,3 \times 10^{-6} \times 1,15^2 \times 100000 = 15,43\ W$$

• **Circuito de amortecimento de tensão do enrolamento primário**

Optou-se por utilizar um circuito de amortecimento de tensão do enrolamento primário, *clamping*, composto pelo díodo roda livre, por um díodo zener supressor e uma resistência em série, para auxílio do díodo zener.

A Figura 5.19 ilustra o circuito de *clamping* utilizado.

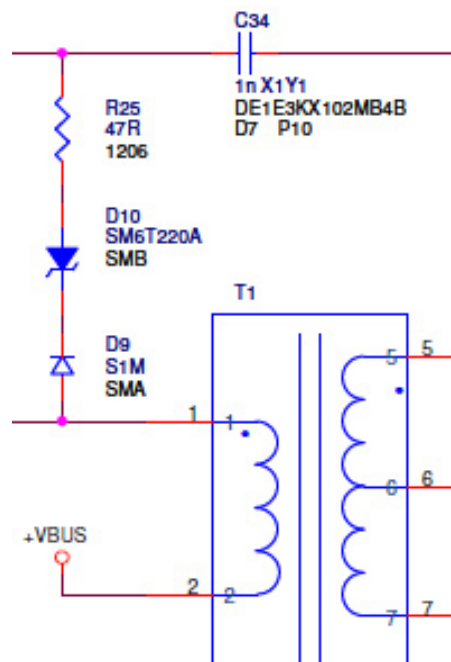


Figura 5.19 – Constituição do circuito de *clamping* utilizado

A Figura 5.20 ilustra como é gasta a energia no circuito de *clamping*, devido às indutância de fuga. As expressões apresentadas na figura não contemplam a existência da resistência em série com o diodo Zener.

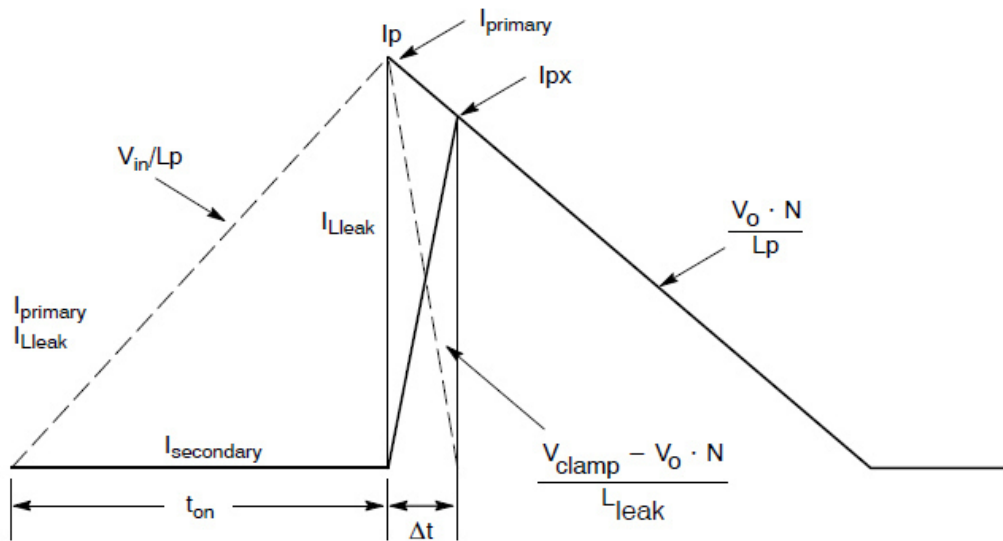


Figura 5.20 – Representação detalhada das formas da corrente nos enrolamentos do transformador (On Semiconductor, 2000)

O gasto dessa energia ocorre durante o período Δt , em que a corrente do primário se esgota, dissipando no circuito de *clamping*. O secundário inicia condução, também, durante o período Δt . A energia ainda presente no circuito primário, durante o período Δt , faz com que a corrente de pico do secundário não é o máximo previsível, mas sim um pouco abaixo.

Aproximando a forma de onda da corrente de onda de descarga no circuito de *clamping* a um triângulo, é possível determinar de forma aproximada a potência dissipada na resistência e no diodo zener:

$$(V_{OR} - V_Z) = L_{lk} \frac{dif(t)}{dt} + R_c \times if(t) \quad (8)$$

em que:

- V_{OR} : tensão do secundário refletida no primário, que é igual à tensão do secundário multiplicado pela razão de transformação do primário para o secundário;
- L_{lk} : indutância de fugas do transformador. Desconhecendo o seu valor, estima-se ser igual a 2% da indutância primária do transformador;
- R_c : resistência em série com o zener no circuito de *clamping*;
- $i_f(t)$: corrente de fugas, provocada pela indutância de fugas L_{lk} ;

Em $t=0$, $if(t)=I_{pkp}$. Logo, conhecendo o valor de R_c , V_{OR} , V_Z e L_{lk} , resolve-se a expressão (8) em ordem a $\frac{dif(t)}{dt}$ e obtém-se: $\frac{dif(t)}{dt} = -33,5 \text{ A/us}$. Esta expressão traduz o declive da curva de decrescimento da corrente no enrolamento primário, assumindo que é uma reta.

Desta forma, pode-se escrever a função da corrente no circuito de *clamping* da seguinte forma:

$$if(t) \cong 1,15 - 33,5(\text{A/us}) \times t(\text{us}) \quad (9)$$

Igualando $if(t)$ a zero, sabe-se que o tempo de descarga Δt é 0,034us.

A potência instantânea dissipada em R_C é $P_{RC} = R_C \times if(t)^2$. A energia dissipada em R_C em cada comutação é $E_{RC} = \int_0^{33,5us} R_C \times if(t)^2 dt$. Resolvendo o integral e substituindo R_C pelo valor utilizando em projeto, $47R$, $E_{RC} = 0,711 \times 10^{-6} J$.

Multiplicando E_{RC} pela frequência máxima de comutação, obtém-se a potência máxima dissipada na resistência:

$$P_{RC} = E_{RC} \times f_{sw} \tag{10}$$

$$P_{RC} = 0,711 \times 10^{-6} \times 100000 = 0,071 W$$

A potência instantânea dissipada no diodo zener é $P_z = V_z \times if(t)$.

Integrando a potência, obtém-se a energia dissipada no zener: $E_z = \int_0^{33,5us} V_z \times if(t) dt$. Resolvendo o integral, obtém-se $E_z = 4,34 \times 10^{-6} J$.

Multiplicando a energia pela frequência de comutação, obtém-se a potência máxima dissipada no diodo zener:

$$P_z = E_z \times f_{sw} = 0,434 W \tag{11}$$

$$P_z = 4,34 \times 10^{-6} \times 100000 = 0,434 W$$

• **MOSFET primário**

Deve ser selecionado um MOSFET com tensão máxima de corte do MOSFET, superior ao valor calculado abaixo, mais uma margem de 50 V a 100 V.

$$V_{DS} = V_{in\ max} + V_z + R_C \times I_{pkp} \tag{12}$$

em que:

- V_{DS} : tensão entre o *drain* e a *source* do MOSFET.
- $V_{in\ máx}$: tensão máxima do barramento primário DC.
- V_z : tensão do zener do circuito de *clamping*. V_z deve ser maior que V_{OR} .

$$V_{DS} = 376 + 220 + 47 \times 1,15 = 650,05 V$$

• **Díodo de saída**

Recomenda-se a escolha do diodo cujo valor de tensão de bloqueio (V_{rrm}) seja 30% superior ao calculado e a corrente de rating 50% superior ao calculado para a corrente secundária eficaz.

$$V_{rrm\ min} = \frac{V_{in\ max}}{n} + V_{out} \tag{13}$$

$$I_{Frmss} = I_{pks} \times \sqrt{\frac{1-Dmax}{3}} \tag{14}$$

em que:

- $V_{rrm\ min}$: tensão reversa mínima do diodo de saída.

- I_{pks} : corrente pico secundário.
- $I_{F_{r_{mss}}}$: corrente eficaz no secundário.

$$V_{rrm \min} = \frac{376}{3} + 40 = 165,3 \text{ V}$$

$$I_{F_{r_{mss}}} = (1,15 \times 3) \times \sqrt{\frac{1-0,0908}{3}} = 1,9 \text{ A}$$

• Condensador de saída

Para efeitos de dimensionamento, pode-se usar as seguintes expressões para determinar o valor da capacidade do condensador de saída C_{out} :

$$I_{sec \text{ DC}} = \frac{I_{sec \text{ DC}}}{f_{sw} \times V_{oripple}} \quad (15)$$

$$I_{sec \text{ DC}} = \frac{P_{out \max}}{V_{out}} \quad (16)$$

em que:

- $I_{sec \text{ DC}}$: corrente média a saída da fonte.
- $V_{oripple}$: oscilação da tensão de saída (*ripple*). Para dimensionamento, convencionou-se que seja 1% da tensão de saída.

$$I_{sec \text{ DC}} = \frac{15,43}{40} = 0,386 \text{ A}$$

$$I_{sec \text{ DC}} = \frac{0,386}{100000 \times 0,01 \times 40} = 9,65 \text{ uF}$$

Além da capacidade, é necessário determinar a corrente de *ripple* eficaz que o condensador deve ser capaz de fornecer ($I_{c_{out \text{ rms}}}$). Para isso, pode ser utilizada a seguinte expressão:

$$I_{c_{out \text{ rms}}} = I_{out} \times \sqrt{\frac{2 \times I_{pkp}}{3 \times K \times I_{out}} - 1} \quad (17)$$

$$K = \frac{(V_{out} + V_D) \times (1-D)}{V_{in \min} \times D} \quad (18)$$

$$K = \frac{(40+0,7) \times (1-0,0908)}{(230 \times 0,85 \times \sqrt{2}) \times 0,0908} = 1,474 \quad I_{c_{out \text{ rms}}} = 0,386 \times \sqrt{\frac{2 \times 1,15}{3 \times 1,474 \times 0,386}} - 1 = 0,228 \text{ A}$$

em que:

- $V_{in \min}$: tensão mínima do barramento primário DC.

• Circuito Regulador de Corrente para o módulo LED

Para simplicidade de processo, utilizou-se o controlador DC-DC de topologia *buck*, específico para controlo de corrente de módulos LED, MP2489 do fabricante Monolithic Power Systems.

O esquema base do circuito de controlo de corrente está apresentado na Figura 5.22, e foi baseado do esquema base fornecido pelo fabricante, Figura 5.21.

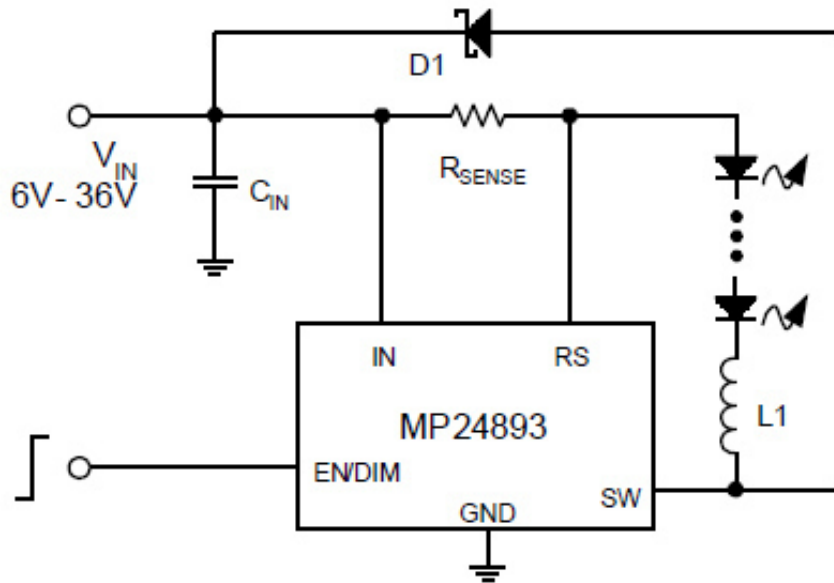


Figura 5.21 – Esquema base fornecido pelo fabricante

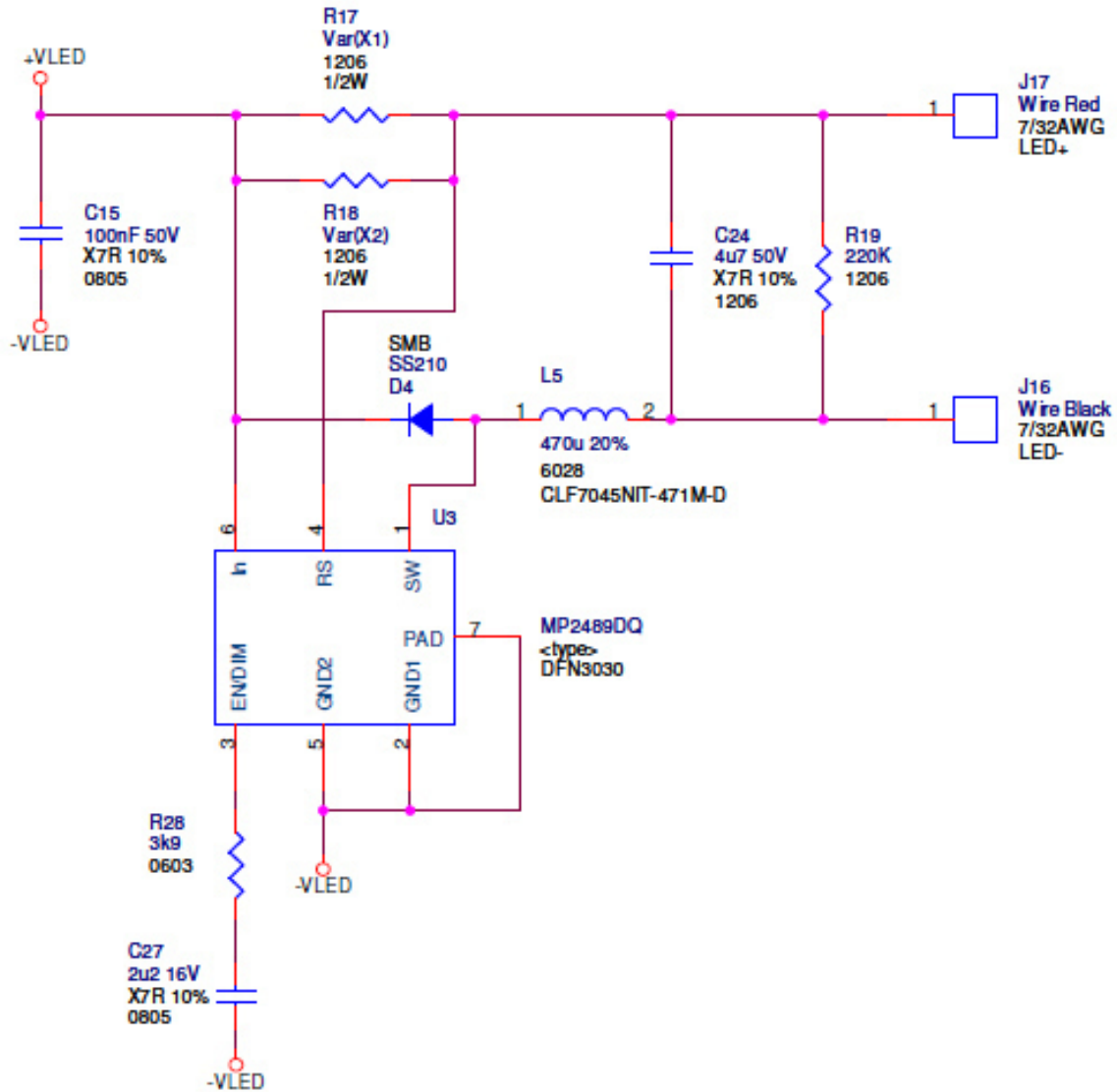


Figura 5.22 – Esquema do circuito de controlo de corrente

As principais especificações do controlador de correntes são as seguintes:

Tensão de entrada: 6 V – 60 V

Intervalo de frequência de operação: 200 kHz – 600 kHz

$R_{\text{DS(on) MOSFET}}$: 0,2 Ω

Corrente LED máxima: 1 A

Frequência recomendada *dimming* PWM: 2 kHz

Referência feedback: 0,202 V

O fabricante define a seguinte expressão para cálculo da resistência sensora de corrente:

$$R_{\text{sense}} = \frac{0,202}{I_{\text{LED}}} = 1,474\Omega \quad (19)$$

em que:

- I_{LED} : Corrente média pretendida no LED. Varia consoante a lâmpada;

O fabricante define a seguinte expressão para cálculo da indutância em série com os LED,

L_{LED} :

$$L_{\text{LED}} = \frac{1 - \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \times V_{\text{out}}}{0,3 \times I_{\text{LED}} \times f_{\text{sw}}} \quad (20)$$

em que:

- L_{LED} : indutância do conversor *buck*, em série com os LED.
- V_{out} : tensão dos LED.
- V_{in} : tensão à entrada do regulador de corrente, proveniente do *flyback*.
- f_{sw} : frequência de comutação do integrado.

O fabricante recomenda que a frequência de comutação esteja localizada entre 200kHz e os 600kHz. Contudo, por sugestão do próprio fabricante, utilizou-se uma bobine de 470uH, para maximizar a eficiência do circuito. Assim, a frequência a que o circuito funciona pode ser calculada através da expressão anterior (20) escrita em função de f_{sw} :

$$f_{\text{sw}} = \frac{1 - \frac{36}{40} \times 36}{470 \times 10^{-6} \times 0,3 \times 0,165} = 154739 \text{ Hz}$$

5.4.3.7 Esquemático Final

O esquemático foi concebido no software OrCAD Capture CIS, versão 16.0.0.s003 da Cadence Design Systems, Inc.

O esquema final segue em anexo ao documento, **Anexo A**.

No **Anexo B**, apresenta-se a lista dos componentes utilizados.

5.4.3.8 Conceção do PCB

A placa de circuitos impressos (*printed circuit board* – PCB) foi concebida no software OrCAD PCB Editor, versão 16.0 da Cadence Design Systems, Inc., tendo a disposição (*layout*) apresentada nas figuras a seguir, Figura 5.23 e Figura 5.24.

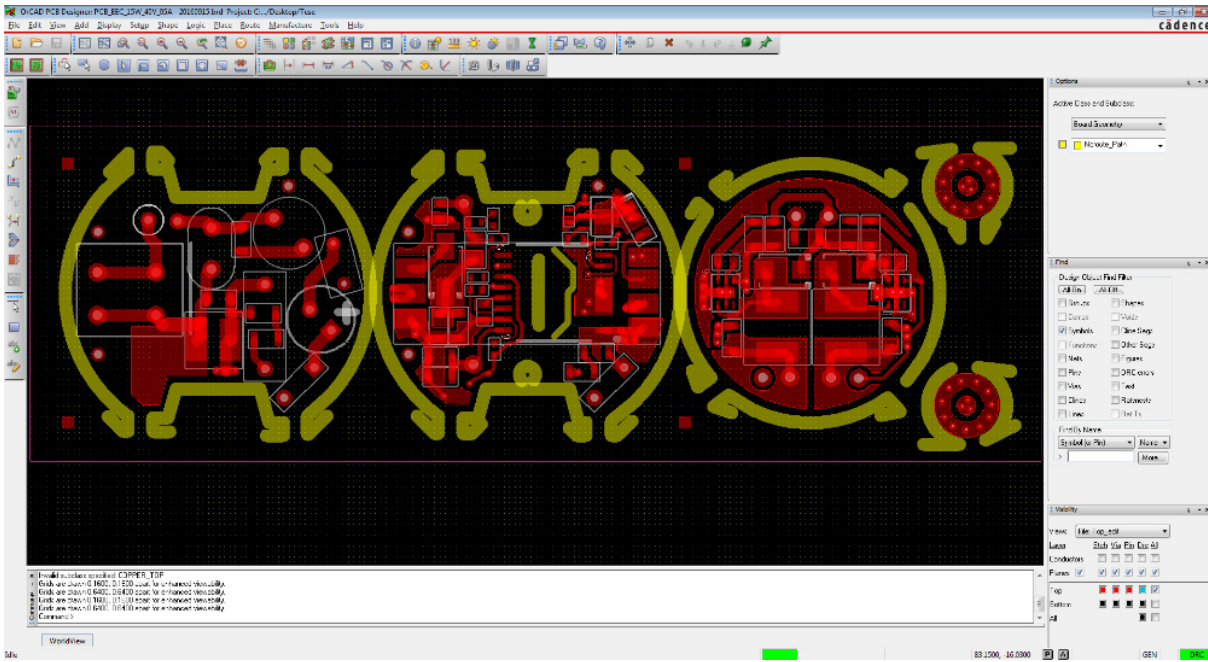


Figura 5.23 – Vista *top* da concepção do PCB no PCB Editor da OrCAD

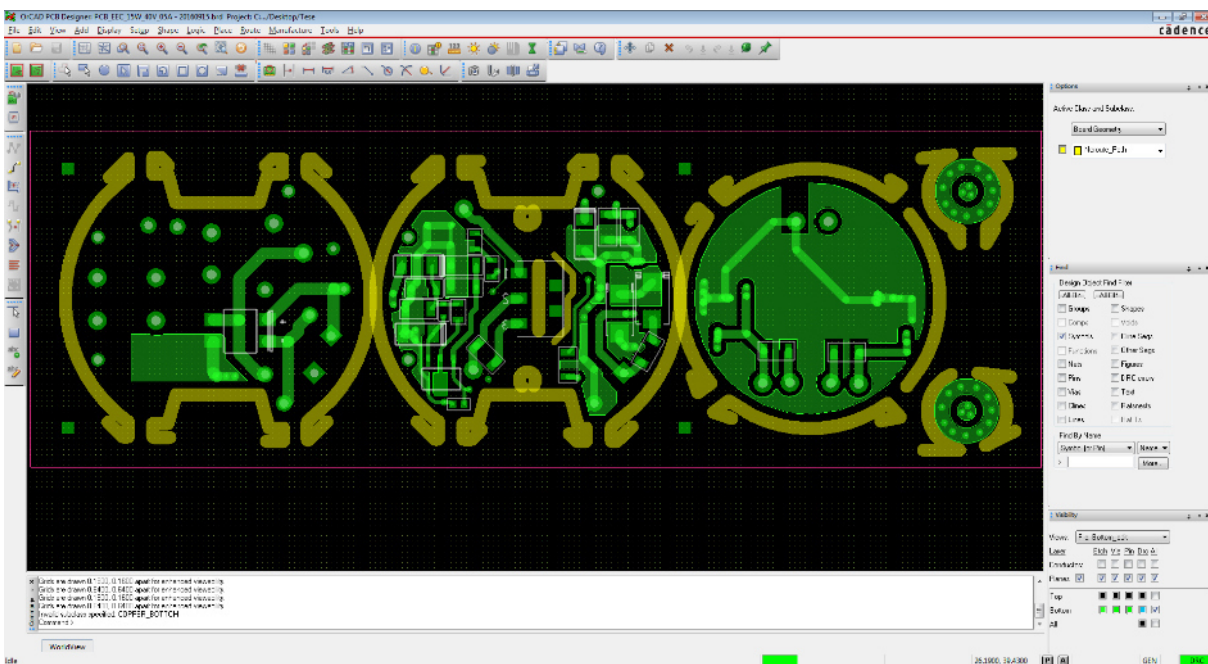


Figura 5.24 – Vista *bottom* da concepção do PCB no PCB Editor da OrCAD

As especificações para fabrico do PCB estão apresentadas no **Anexo C**.

5.4.3.9 Assemblagem e teste do protótipo de PCB

Os PCB foram fabricados na China pelo fabricante PCB Cart. As figuras abaixo ilustram o PCB durante o processo de assemblagem de componentes, Figura 5.25, e após soldadura dos componentes, já em teste, Figura 5.26.

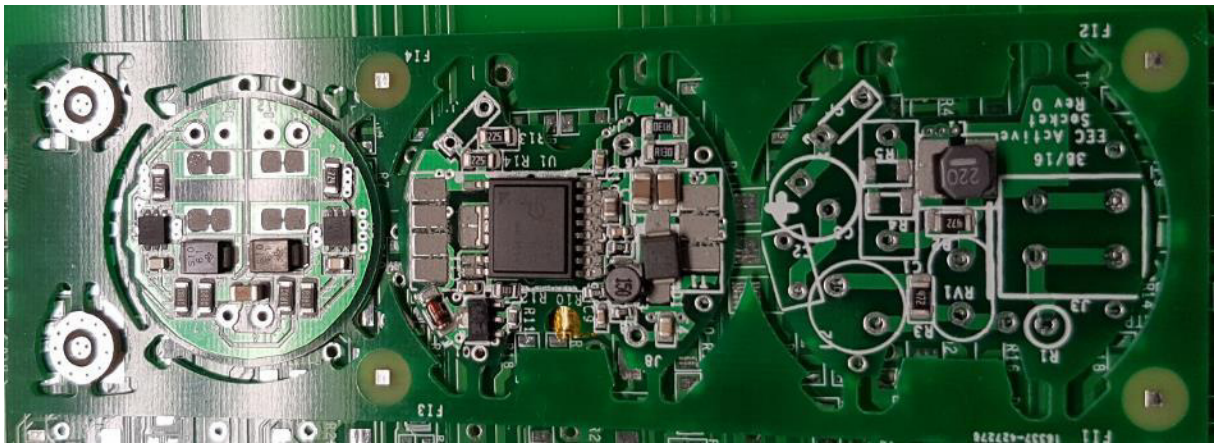


Figura 5.25 – PCB em fase inicial da soldadura dos componentes SMD

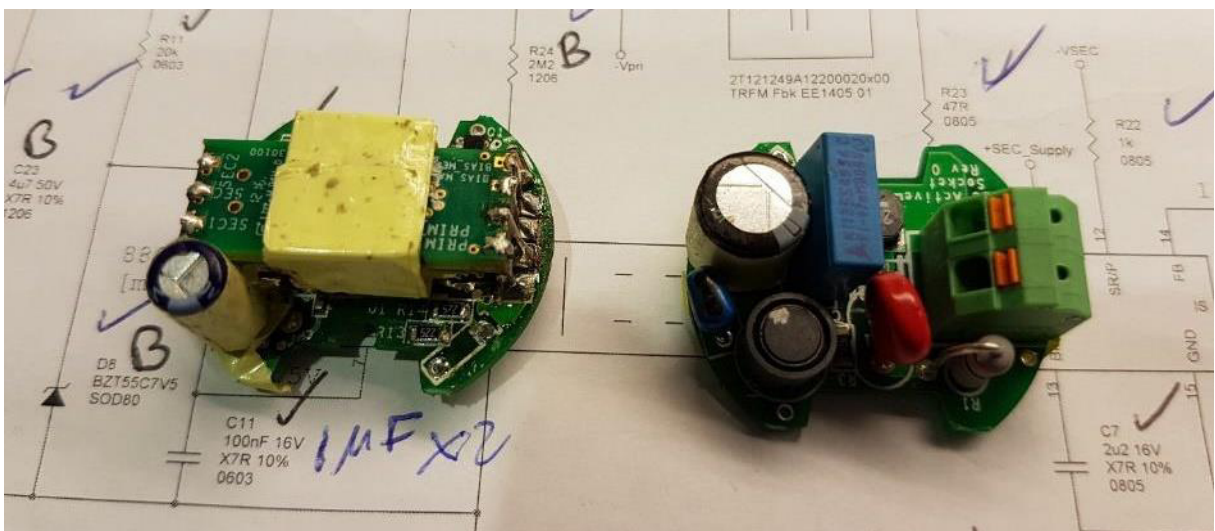


Figura 5.26 – Protótipo da fonte com componentes assembled

A fonte de alimentação e os circuitos de regulação de corrente foram assembled e testados para verificar a sua conformidade perante as especificações e cálculos de dimensionamento. Os resultados das caracterizações da fonte e dos circuitos reguladores de corrente estão apresentados a seguir na Tabela 5.4 e Tabela 5.5.

Tabela 5.4 – Caracterização elétrica da fonte de alimentação

Caracterização elétrica da fonte de alimentação (testado com o circuito regulador de 2x165 mA)

Tensão de entrada: 247 Vac	Tensão de saída: 40 V
Corrente de entrada: 104 mA	Corrente de Saída: 300 mA
Fator de potência: 0,61	Potência de saída da fonte: 12 W
Potência consumida: 15,55 W	Eficiência da fonte: 77,2 %
Tensão média DC: 330 V	Tempo de arranque: \approx 3 ms
Ripple da tensão de entrada: 52 V	

Tabela 5.5 – Caracterização elétrica dos reguladores de corrente

Caracterização elétrica dos reguladores de corrente na lâmpada de 2x165 mA:	Caracterização elétrica do regulador de corrente na lâmpada de 1x235 mA:
Tensão de entrada: 40 V	Tensão de entrada: 40 V
Corrente de entrada: 150 mA	Corrente de entrada: 213 mA
Ripple da corrente nos LED: 57 mA	Ripple da corrente nos LED: 62 mA
Potência de entrada: 6,0 W	Potência de entrada: 8,5 W
Tensão de saída: 34,7 V	Tensão de saída: 34,5 V
Corrente de saída: 165 mA	Corrente de saída: 235 mA
Potência de saída: 5,73 W	Potência de saída: 8,1 W
Eficiência dos <i>step-downs</i> : 95,4 %	Eficiência dos <i>step-downs</i> : 95,2%

O circuito regulador que fornece 2x165 mA de corrente é usado para alimentar a lâmpada DC de 12 W de consumo. O circuito regulador que fornece 1x235 mA de corrente é usado para alimentar a lâmpada DC de 8,5 W de consumo.

Os equipamentos de medida utilizados estão descritos na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Tabela de identificação dos equipamentos de medida

Tipo e Marca	Modelo	Características principais	Número de série
Osciloscópio Fluke	192B	60MHz, 2 canais, digital	DM9070363
Power Meter – HAMEG Instruments	HM8115-2	Programmable Power Meter, V, A, VA, W, PF	052980004

Abaixo estão alguns oscilogramas mais relevantes, recolhidos do teste da fonte.

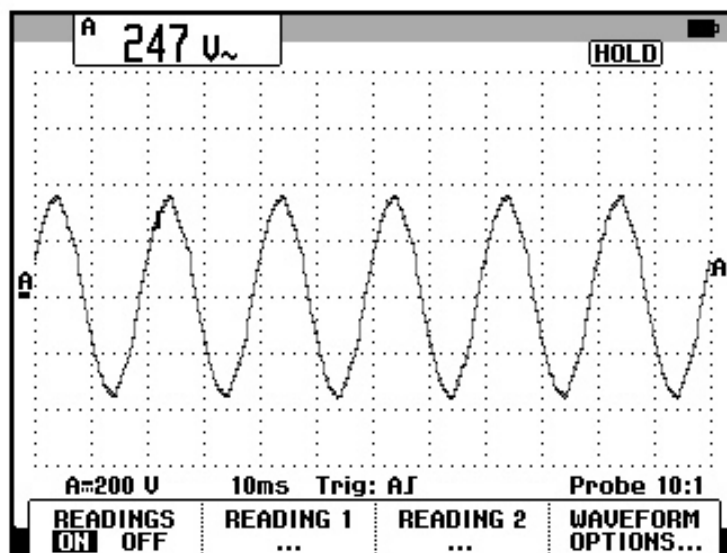


Figura 5.27 – Tensão da rede

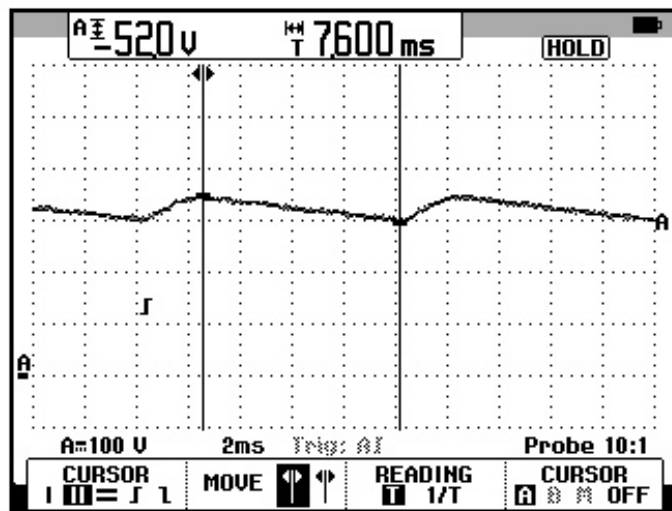


Figura 5.28 – Tensão da rede retificada (tempo descarga do condensador)

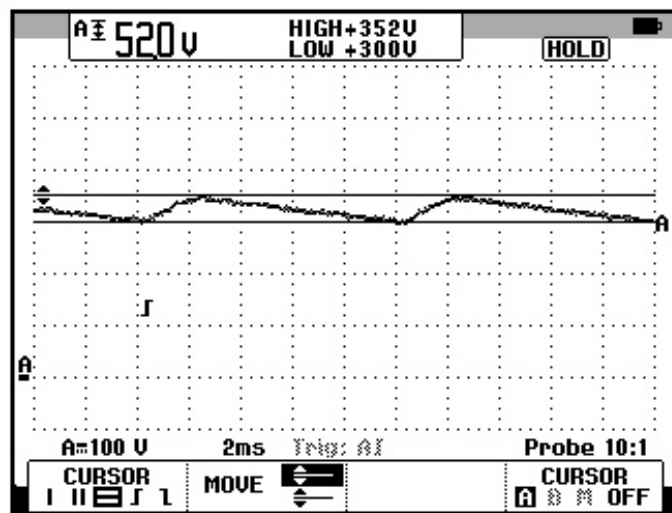


Figura 5.29 – Tensão da rede retificada (*ripple* da tensão do barramento DC do primário)

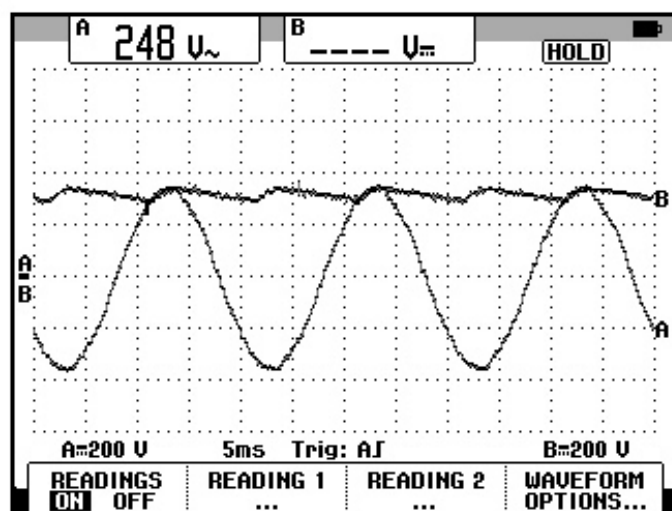


Figura 5.30 – Sobreposição tensão da rede e a tensão retificada

Nas figuras acima, Figura 5.27, Figura 5.28, Figura 5.29 e Figura 5.30, observa-se o formato da tensão da rede elétrica no momento e local onde foi realizado o teste da fonte, bem como a tensão do barramento DC, aos terminais do condensador eletrolítico C_{bulk} . A tensão de entrada tem um valor eficaz de 248 Vac, atingindo no pico 352 V. Aos terminais do condensador C_{bulk} , a tensão máxima verificada é a tensão de pico da rede elétrica, 352 V, e o mínimo é 300 V, pelo que o *ripple* tem amplitude de 52 V, 15 % da tensão média do barramento.

Pode-se verificar também, a partir da Figura 5.28, o tempo de descarga do condensador, que é de aproximadamente 7,6 ms. No dimensionamento havia-se estimado que fosse 8,5 ms.

A forma de onda observada na Figura 5.31 traduz a tensão aos terminais do MOSFET. É possível verificar a oscilação que se previa, quer no momento em que o MOSFET para de conduzir (assinalada a vermelho), quer no momento em que o diodo do secundário para de conduzir e a energia do pulso foi entregue ao secundário (assinalada a verde).

A tensão máxima atingida aos terminais do MOSFET é de aproximadamente 720 V.

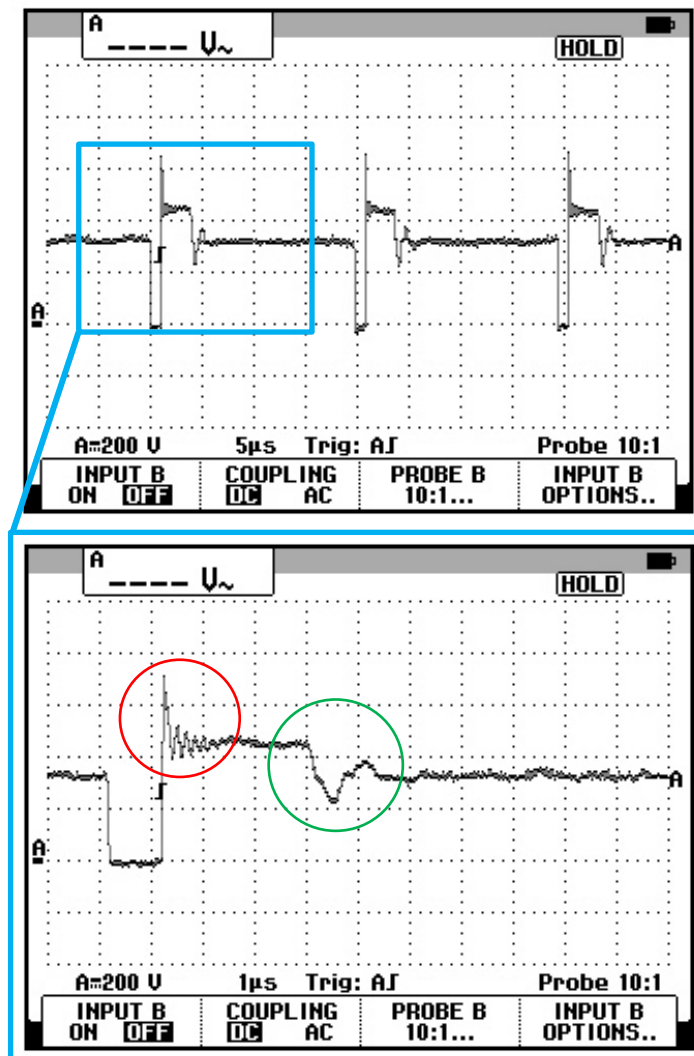


Figura 5.31 – Tensão V_{DS} no MOSFET do regulador INN2904 K

A Figura 5.32 ilustra a tensão aos terminais da resistência no circuito de *clamping*. Uma vez que o sinal é visto aos terminais de uma resistência, este traduz a forma de onda da corrente no circuito de *clamping*. A curva vermelha traduz uma aproximação do que seria o valor médio.

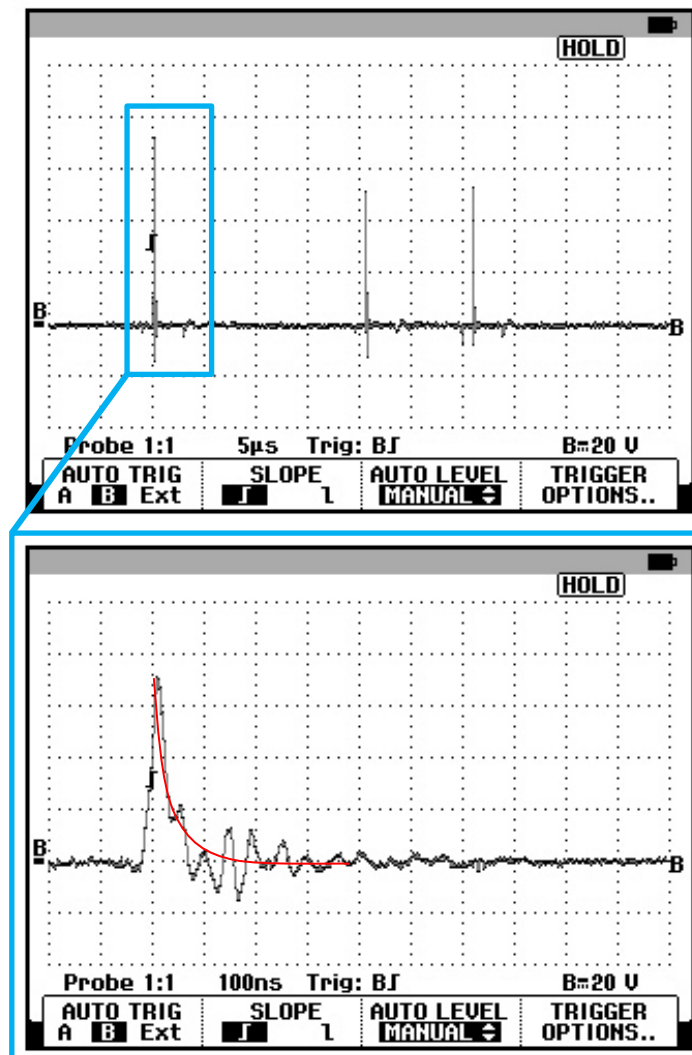


Figura 5.32 – Corrente no circuito *clamping* / Tensão aos terminais da resistência 47R

A Figura 5.33 traduz a forma de onda da corrente no enrolamento primário do transformador. Verifica-se que existe um elevado nível de oscilações e ruído no sinal. É possível que se deva a interferência eletromagnética, derivada da distribuição espacial não adequada dos componentes. Contudo, apenas após ensaios, estudos e otimizações para redução da interferência eletromagnética poderá ser possível determinar se de facto é essa a causa do ruído.

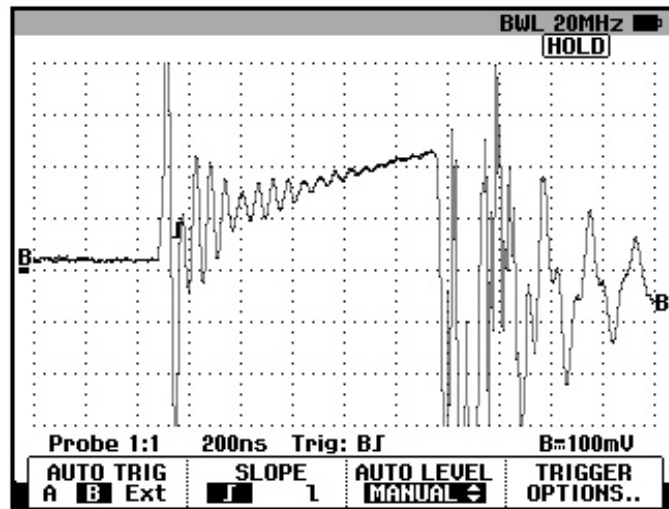


Figura 5.33 – Corrente no enrolamento primário do transformador ($R_{sensora}=100\text{ m}\Omega$)

Verifica-se também que a corrente de pico atinge, aproximadamente 2200 mA, o dobro do que era de esperar. Isto pode dever-se ao facto de o TON real ser demasiado baixo, aproximadamente 1040 ns, que por sua vez, se deve ao baixo valor da indutância do enrolamento primário. A corrente sobe demasiado depressa e, quando o controlador decide terminar o ciclo, já terá ultrapassado o valor de *threshold*. Contudo, como o *duty-cycle* é baixo, o transformador não aquece e não entra em saturação. Isto pode ser confirmado pelo formato da corrente. Se assim não fosse, a forma da corrente começava a aproximar-se de uma exponencial. É um aspeto a ter em consideração em futura revisão da fonte.

Durante os ensaios, verificou-se alguma dificuldade da fonte no arranque, assim, foi acrescentado um condensador de 47 uF, 50 V para melhorar o arranque da fonte. Contudo, ele não é necessário para o seu funcionamento. Uma vez corrigida a razão da dificuldade da fonte no arranque, o condensador poderá ser removido.

As figuras Figura 5.34, Figura 5.35, Figura 5.36, Figura 5.37, ilustram as formas de onda da tensão de saída e da corrente nos LED, ora medida diretamente na resistência sensora do próprio circuito, ora medida com uma resistência externa ao circuito de 100 mΩ.

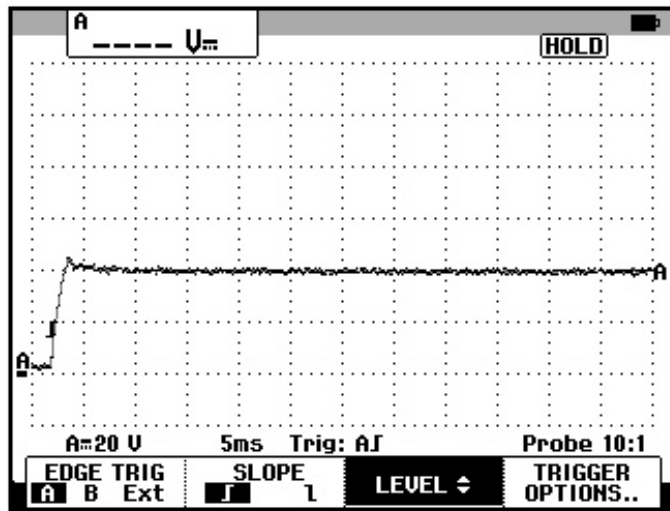


Figura 5.34 – Tensão de saída da fonte

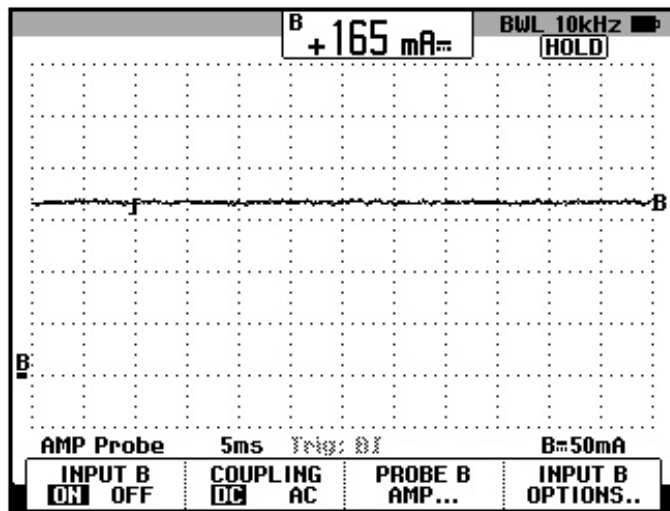


Figura 5.35 – Corrente nos LED (step-down) (sinal filtrado 10kHz)

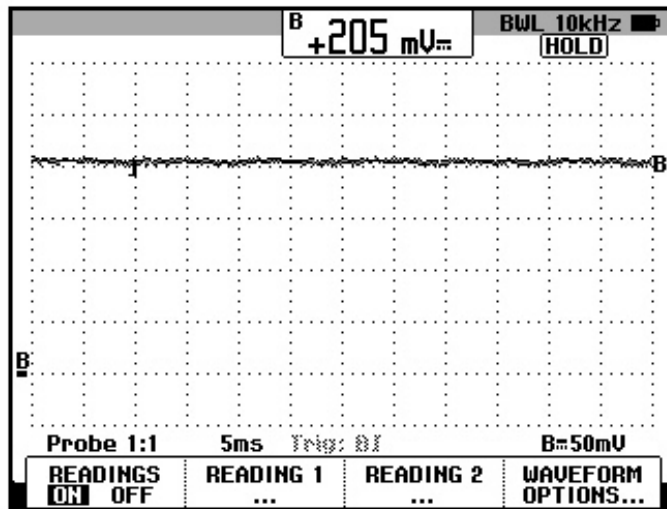


Figura 5.36 – Corrente à saída da fonte (*step-down*; sinal filtrado 10kHz; medido aos terminais das resistências sensoras do *step-down*)

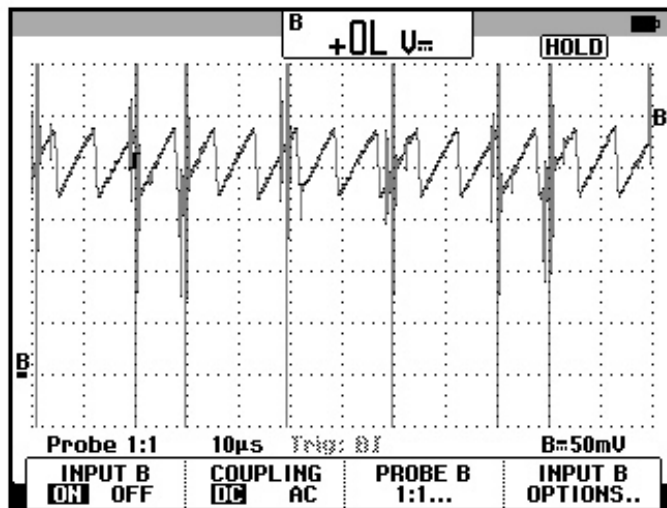


Figura 5.37 – Corrente à saída da fonte (*step-down*; medido aos terminais das resistências sensoras do *step-down*)

5.4.4.Obtenção do protótipo do produto

Para ensaiar o conceito, foi necessário montar um protótipo funcional do produto. O protótipo é constituído por:

- *Active Electronic Socket* (AES): casquilho obtido por impressão 3D do polímero ABS, com a fonte de alimentação integrada;

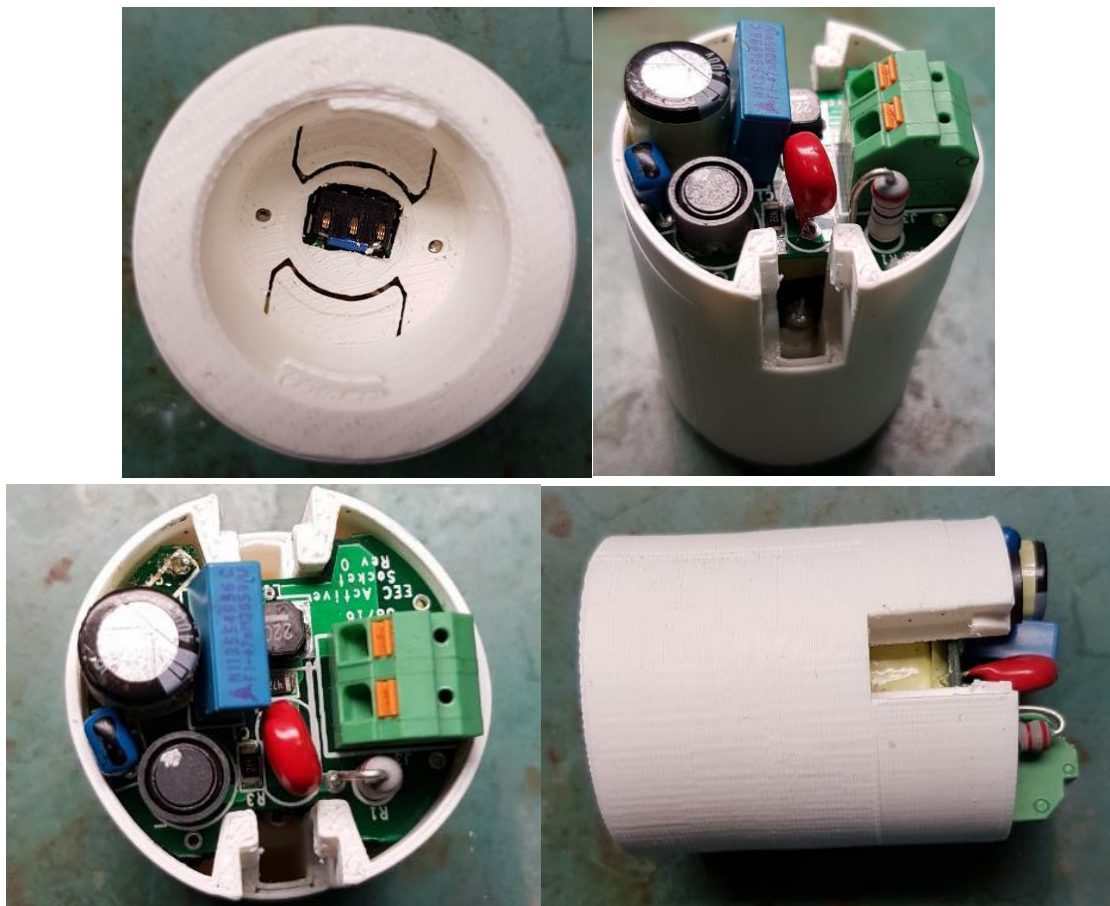


Figura 5.38 – Protótipo de AES assembled

- *Active Electronic Base (AEB)* de 12 W e 8,5 W, para duas lâmpadas distintas:



Figura 5.39 – Protótipo de AEB – conexão DC

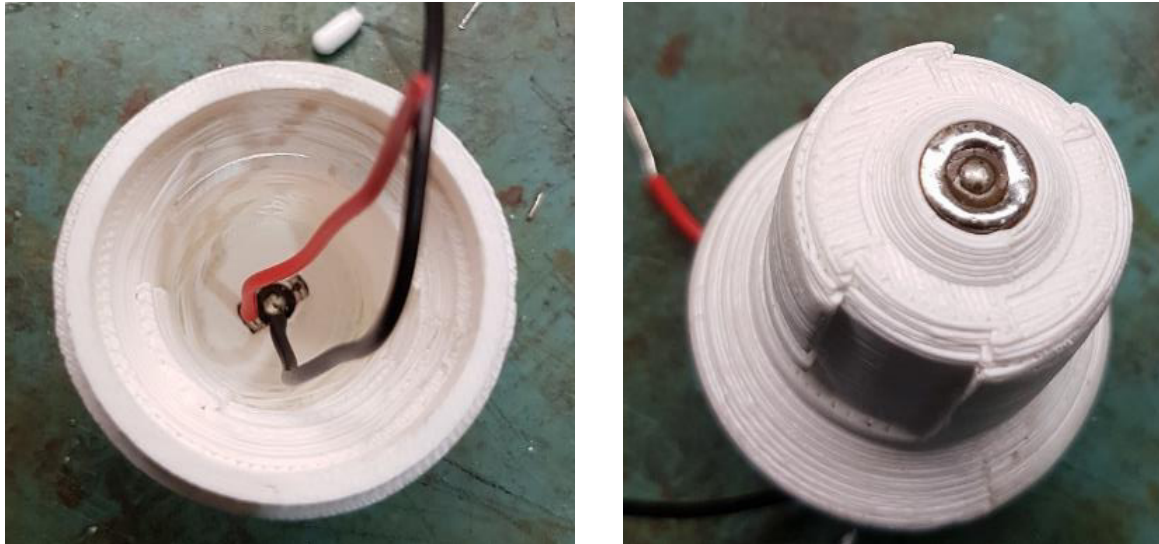


Figura 5.40 – Protótipo de AEB – conexão DC

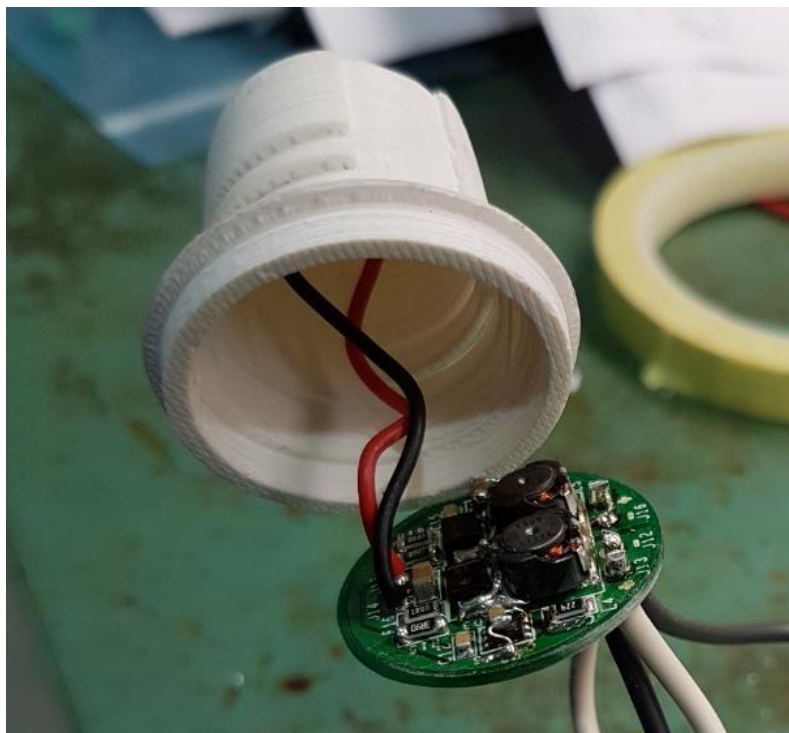


Figura 5.41 – Protótipo de AEB assembled (2 saídas)

5.4.4.1 Montagem das lâmpadas

Para efeito de teste, utilizou-se uma lâmpada LED com dimensões semelhantes a incandescente de 60W, para a qual existem no mercado muitas lâmpadas LED para sua substituição. O dissipador tem o *rating* de 7 W térmicos dado pelo seu fabricante. A ótica é opalina, muito comum neste tipo de lâmpada. Os aspetos fotométricos da lâmpada, tais como diagrama fotométrico, eficiência ótica e o fluxo luminoso total emitidos pela lâmpada, não serão abordados pois não são relevantes para a prova de conceito. Este tipo de parâmetros depende fortemente do *design* da lâmpada, dos materiais e componentes utilizados, logo estão muito dependentes das escolhas de cada fabricante.

Na lâmpada de 12 W, foram utilizadas duas saídas de 6 W, cada uma para alimentar um módulo LED. Na lâmpada de 8,5 W, foi utilizada apenas uma saída e os dois módulos LED foram colocados em paralelo.

A figura abaixo, Figura 5.42, ilustra o dissipador e a ótica utilizados nos protótipos das lâmpadas de 12 W e de 8,5 W.

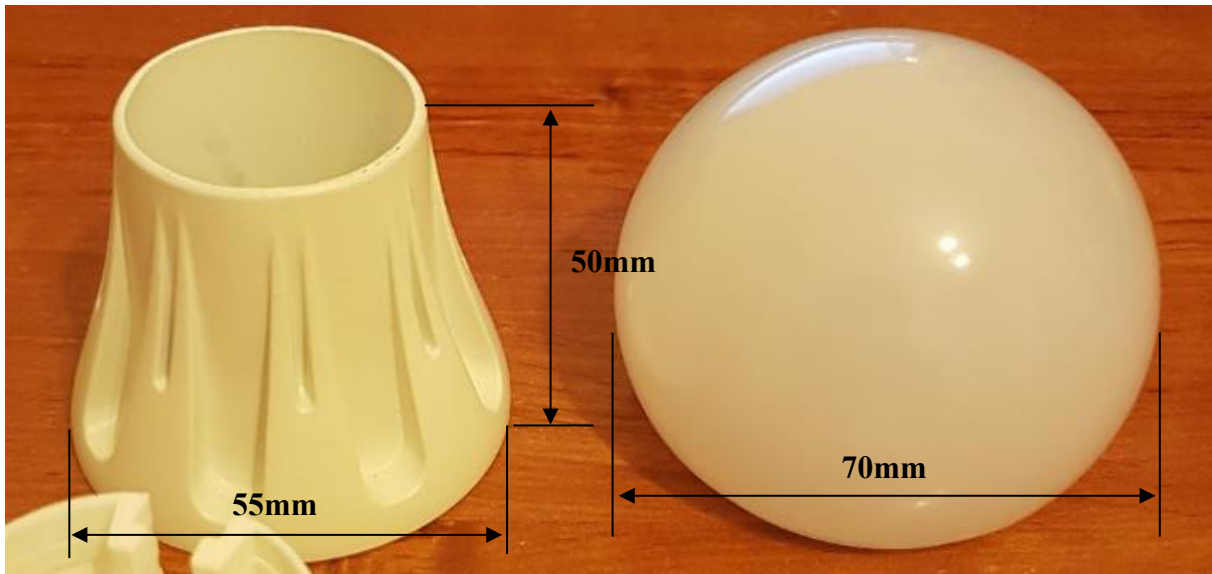


Figura 5.42 – Dissipador e ótica utilizados nos protótipos

O LED utilizado no módulo LED é o MT-G2 *EasyWhite* da CREE, ilustrado na Figura 5.43, versão 36 V 5000 K. Por cada lâmpada, foram utilizados dois módulos, cada módulo com um LED. A Tabela 5.7 e a Tabela 5.8 resumem as características do LED utilizado.



Figura 5.43 – CREE MT-G2 (CREE)

Tabela 5.7 – Características elétricas do LED CREE MT-G2 (CREE)

Characteristics	Unit	Minimum	Typical	Maximum
Viewing angle (FWHM)	degrees		115	
ESD withstand voltage (HBM per Mil-Std-883D)	V			8000
Effective thermal resistance, junction to solder point	°C/W		1.5	
LED junction temperature	°C			150
DC forward current (6 V)	mA			3000
DC forward current (9 V)	mA			2000
DC forward current (36 V)	mA			500
Forward voltage (6 V, 1100 mA, 85 °C)	V		5.7	
Forward voltage (6 V, 1100 mA, 25 °C)	V			7
Forward voltage (9 V, 735 mA, 85 °C)	V		8.55	
Forward voltage (9 V, 735 mA, 25 °C)	V			10.5
Forward voltage (36 V, 185 mA, 85 °C)	V		34.2	
Forward voltage (36 V, 185 mA, 25 °C)	V			42
Temperature coefficient of voltage (6 V)	mV/°C		-4	
Temperature coefficient of voltage (9 V)	mV/°C		-6	
Temperature coefficient of voltage (36 V)	mV/°C		-26	
Reverse voltage (6 V)	V			-5
Reverse current (6 V, 9 V, 36 V)	A			0.1

Tabela 5.8 – Característica fotométrica do LED CREE MT-G2 – Grupo P0 (CREE)

Color	CCT Range	Minimum Luminous Flux (lm) @ 185 mA			2-Step		4-Step	
		Group	Flux (lm) @ 85 °C	Flux (lm) @ 25 °C*	Chromaticity Region	Order Code	Chromaticity Region	Order Code
5000 K		N0	750	863	50H	MTGBEZ-00-0000-0N00N050H	50F	MTGBEZ-00-0000-0N00N050F
		P0	800	920		MTGBEZ-00-0000-0N00P050H		MTGBEZ-00-0000-0N00P050F

As figuras a seguir, Figura 5.44 e Figura 5.45 ilustram o processo de montagem do protótipo da lâmpada de 12 W.



Figura 5.44 – Montagem da lâmpada



Figura 5.45 – Módulos LED acoplados ao dissipador da lâmpada

A Figura 5.46 ilustra o protótipo em funcionamento, ainda em fase de construção.



Figura 5.46 – Lâmpada alimentada pelo AES através do AEB

Os módulos LED foram acoplados termicamente ao dissipador através do uso da cola térmica, com base de silicone, HY910 do fabricante Shenzhen Halnziye Electronics Co., Ltd., representadas na Figura 5.48. As suas especificações estão resumidas na Figura 5.47.

<i>Specification</i>		
Items	HY910	Unit
Color	White	No
Thermal Conductivity	>0.975	W/m-K
Thermal Impedance	<0.246	⁰ C-in ² /W
Gravity	>2.3	g/cm ³
Hardness	78±5	No
Dry Time(25 ⁰ C)	5~15	min
Tensile Strength	2.1	Mpa
Shear Strength	1.8	Mpa
Dielectric Strength	10	KV/mm
Operation Temperature	-60~200	⁰ C
<i>Ingredients</i>		
Silicone Material	30	%
Thermal Conductive Material	40	%
Reinforcing Fillers	20	%
Crossing Agent	10	%

Figura 5.47 – Especificações da cola térmica HY910 (Shenzhen Halnziye Electronics Co., Ltd., s.d.)



Figura 5.48 – Cola térmica HY910 (Shenzhen Halnziye Electronics Co., Ltd., s.d.)

5.4.4.2 Impregnação

A impregnação não constava nos planos iniciais da conceção do produto, embora tenha muitas vantagens e significativas, a baixo custo. No entanto, verificou-se em funcionamento que o PCB tem alguns componentes cujas temperaturas estão acima do adequado para o seu funcionamento.

O díodo Zener e o díodo roda livre do circuito de *clamping* e o controlador da fonte, devido à potência dissipada nos três, a grande proximidade entre eles e a falta de capacidade de dissipação prevista na conceção do PCB e do casquilho, atingiram temperaturas demasiado elevadas. Para compensar, foi introduzida a impregnação, que tem uma condutividade térmica 30 vezes maior do que o ar, reduziu a resistência térmica entre os componentes e a parede do

casquilho, incrementando também a carga térmica do conjunto, o que fez reduzir a temperatura para valores não ideais, mas funcionais.

O impregnante utilizado é o CN-8760 da Dow Corning, ilustrado na Figura 5.49 e com as especificações descritas na Tabela 5.9.



Figura 5.49 – Dow Corning CN-8760

Tabela 5.9 – Principais propriedades do impregnante CN-8760 (Dow Corning)

Property	Unit	Result
One or Two Part		Two
Color		Gray
Viscosity (Part A)	cP	2,900
	Pa-sec	2.9
Viscosity (Part B)	cP	3,200
	Pa-sec	3.2
Viscosity (Mixed)	cP	3,200
	Pa-sec	3.2
Thermal Conductivity	btu/hr ft degf	0.387
	W/mK	0.67
Specific Gravity (Cured)		1.58
Working Time at 25°C (Pot Life - minutes)	minutes	100
Cure Time at 25°C	hrs	24
Durometer Shore A		45
Dielectric Strength	volts/mil	625
	kV/mm	24
Volume Resistivity	ohm *cm	10E + 16
Dielectric Constant at 100 Hz		2.88
Dielectric Constant at 100 kHz		2.66
Dissipation Factor at 100 Hz		0.03
Dissipation Factor at 100 kHz		0.06
UL 94 Flame Classification		94 V-0
UL RTI Rating	°C	150

Tanto o AEB, a lâmpada e o AES foram preenchidos com impregnação para maximizar a sua performance térmica.

O impregnante tem a vantagem de ter condutividade térmica muito superior à condutividade térmica do ar, logo é capaz de transferir melhor o calor do ponto quente para o ponto frio, no caso, dos componentes para as paredes do casquilho, que estão em contacto com o ar frio. Outra vantagem é que, antes de curar (solidificar) o impregnante está em estado líquido, logo faz o acoplamento perfeito aos componentes. A Figura 5.50 ilustra a impregnação do AEB.



Figura 5.50 – Impregnação do AEB

Uma vez conhecida a necessidade de baixar as temperaturas dos componentes, algumas medidas adicionais podem ser tomadas na revisão do PCB para reduzir ainda mais as temperaturas:

- Afastar os componentes uns dos outros para que a temperatura de um não influencie o outro.
- Utilizar um encapsulamento maior em D10 (díodo zener) para aumentar a sua capacidade de dissipação.
- Colocar planos de cobre para dissipação no PCB-
- Se possível, colocar chapa metálica para transferir calor desses componentes para a periferia do encapsulamento do casquilho.

A figura a seguir, Figura 5.51, ilustra o protótipo da lâmpada de 12 W com a AEB de 2x165 mA e o AES com a fonte de alimentação embebida, em funcionamento.



Figura 5.51 – Protótipo AES e lâmpada 12 W com AEB 2x165 mA (com fios termopares)

5.4.5. Ensaio Térmico

Os ensaios térmicos são a prova final de que o conceito pensado e desenvolvido funciona. Através dos ensaios, é possível verificar a que temperaturas os constituintes da lâmpada irão operar e se há ou não redução das temperaturas dos componentes, em relação ao que é normal nas lâmpadas de mesma dimensão e potência.

Havendo redução das temperaturas, significa que todas as vantagens enumeradas e as possibilidades colocadas em aberto podem ser implementadas nas lâmpadas LED para iluminação geral.

5.4.4.3 Produtos sujeitos a ensaio

As tabelas a seguir descrevem cada elemento que foi sujeito ao ensaio térmico, Tabela 5.10, e Tabela 5.11 e Tabela 5.12.

Tabela 5.10 – Identificação do produto sujeito a ensaio: AES

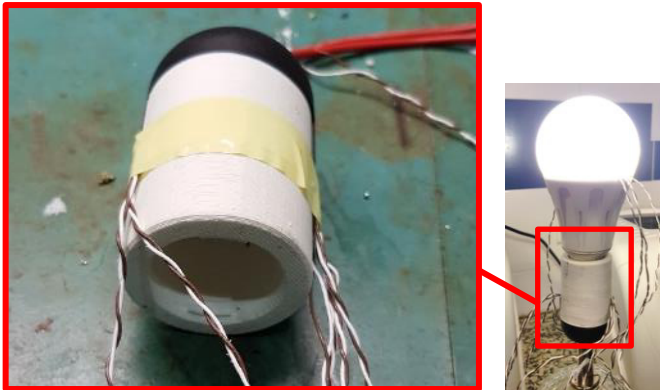
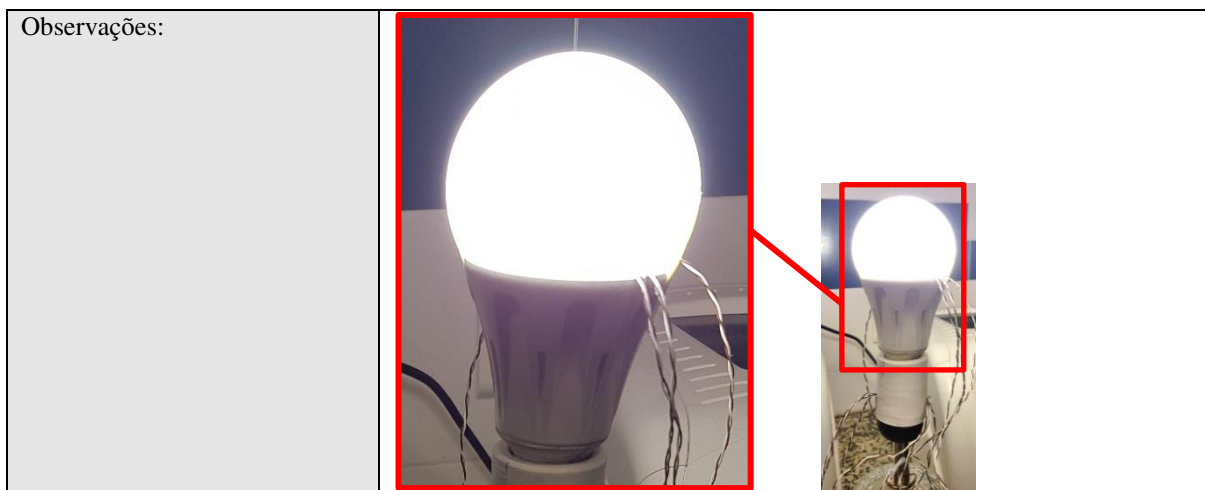
Designação:	Active Electronic Socket: 230V 15 W 40V
Composição:	<p>Casquilho protótipo em plástico ABS impresso</p> <p>Fonte de Alimentação Comutada:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Potência Máxima Consumida: 15 W - Tensão de Saída: 40 V - PF: 0,61 <p>Impregnante: Dow Corning CN-8760:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cor: cinzento - Composição: duas partes (A+B) - Condutividade térmica: 0,67 W/m K - Rigidez dielétrica: 24 kV/mm²
Observações:	

Tabela 5.11 – Identificação do produto sujeito a ensaios: Lâmpada 8,5W

Designação:	Lâmpada DC 8,5 W
Composição:	<p>Base protótipo em plástico ABS impresso</p> <p>Reguladores de Corrente para uma <i>string</i> de LED:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Potência consumida: 8,5 W - Tensão dos LED: 36 V - Corrente por <i>string</i>: 235 mA - Número LED por <i>string</i>: 2 <p>Impregnante: Dow Corning CN-8760:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cor: cinzento - Composição: duas partes (A+B) - Condutividade térmica: 0,67 W/m K - Rigidez dielétrica: 24 kV/mm²
Observações:	-

Tabela 5.12 – Identificação dos produtos sujeitos a ensaios: Lâmpada 12W

Designação:	Lâmpada DC 12 W
Composição:	<p>Base protótipo em plástico ABS impresso</p> <p>Reguladores de corrente para duas <i>strings</i> de LED:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Potência consumida por <i>string</i>: 6 W - Tensão dos LED: 36 V - Corrente por <i>string</i>: 165 mA - Número LED por <i>string</i>: 1 <p>Impregnante: Dow Corning CN-8760</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cor: cinzento - Composição: duas partes (A+B) - Condutividade térmica: 0,67 W/m K - Rigidez dielétrica: 24 kV/mm²



5.4.4.4 Equipamento de Medida:

O equipamento utilizado para medição das temperaturas está caracterizado a seguir, na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Identificação dos equipamentos de medida

Tipo	Multímetro digital					
Marca	Modelo	Entradas	Comutação	Termopares	Tensão/Corrente	Número de Série
Keithley	2700	20 analógicas	< 3ms	Tipo T (-150 a 350 °C)	300V/1A (max.)	91130517

5.4.4.5 Colocação dos Termopares:

Foram colocados termopares tipo “k” nos componentes, considerados críticos, enumerados na Tabela 5.14:

Tabela 5.14 – Componentes caracterizados termicamente

Active Electronic Socket 230 V 15 W 40 V	Lâmpada DC 12 W	Lâmpada DC 8,5 W
Díodo – D1 Regulador INN2904 K – U1 Díodo – D10 Condensador – C3 Condensador Saída – C100 Dissipador Ambiente Exterior	LED Solderpoint -Tsp LED Bobine Step Down – L5 Regulador Step Down – L5	- Não ensaiada

5.4.4.6 Resultados dos Ensaios:

Os resultados obtidos estão apresentados a seguir (temperaturas máximas em regime estacionário), na Tabela 5.16, Figura 5.52 e Figura 5.53:

Tabela 5.15 – Resultados do ensaio térmico com lâmpada DC de 8,5 W

<i>Active Electronic Socket 230V 15 W 40 V com lâmpada DC 8,5 W</i>	
Consumo real total: 10,5W	
Díodo – D1	78,9 °C
Regulador INN2904 K – U1	77,6 °C
Díodo – D10	85,3 °C
Condensador do barramento DC – C3	54,6 °C
Condensador de saída – C100	62,2 °C
Dissipador	55,7 °C
Ambiente exterior	25,0 °C
LED <i>solderpoint</i> -Tsp LED	62,3 °C
Bobine do <i>step down</i> – L5	-
Regulador do <i>step down</i> – L5	-

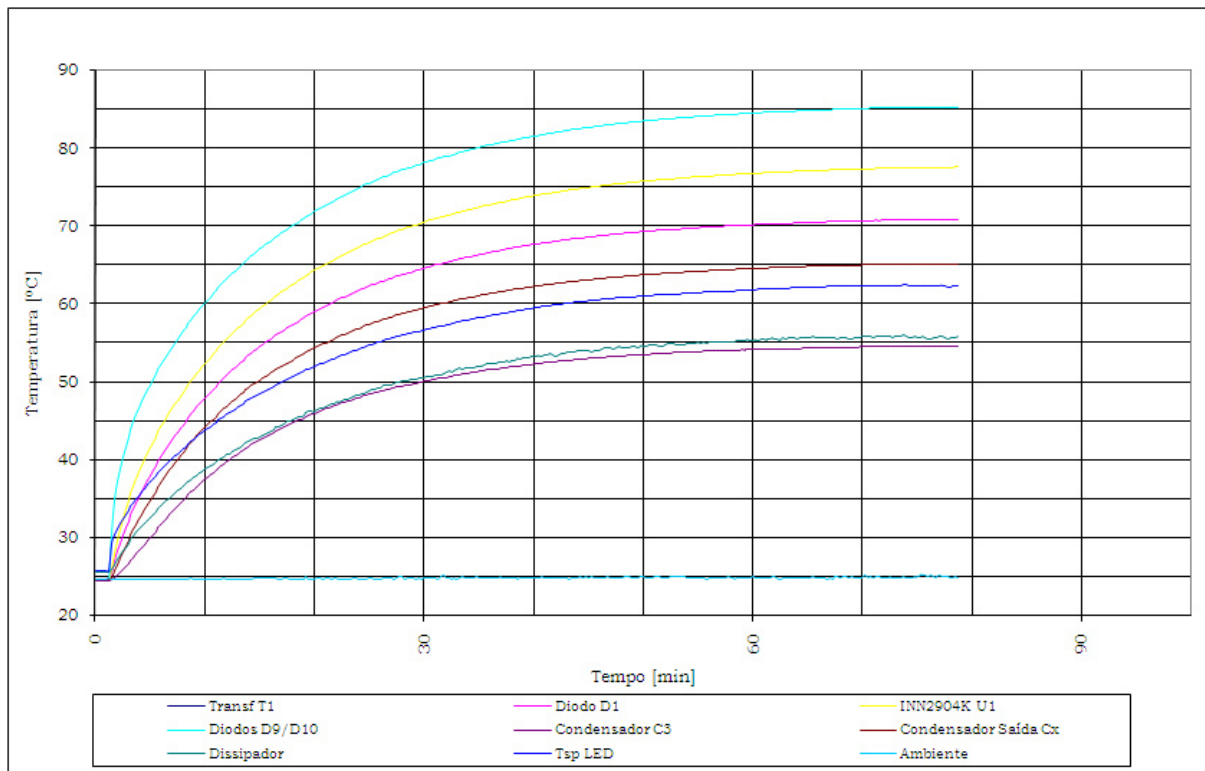


Figura 5.52 – Evolução das temperaturas nos componentes críticos na montagem AES 230 V 15 W 40 V com Lâmpada DC de 8,5 W

Tabela 5.16 – Resultados do ensaio térmico com lâmpada DC de 12 W

<i>Active Electronic Socket 230 V 15 W 40 V com Lâmpada DC 12 W</i>	
Consumo total real: 15,5W	
Díodo – D1	98,1 °C
Regulador INN2904 K – U1	110,0 °C
Díodo – D10	124,1 °C
Condensador do barramento DC – C3	72,3 °C
Condensador de saída – C100	88,6 °C
Dissipador	66,0 °C
Ambiente exterior	26,4 °C
LED solderpoint -Tsp LED	79,5 °C
Bobine do step sown – L5	75,5 °C
Regulador do step down – L5	76,2 °C

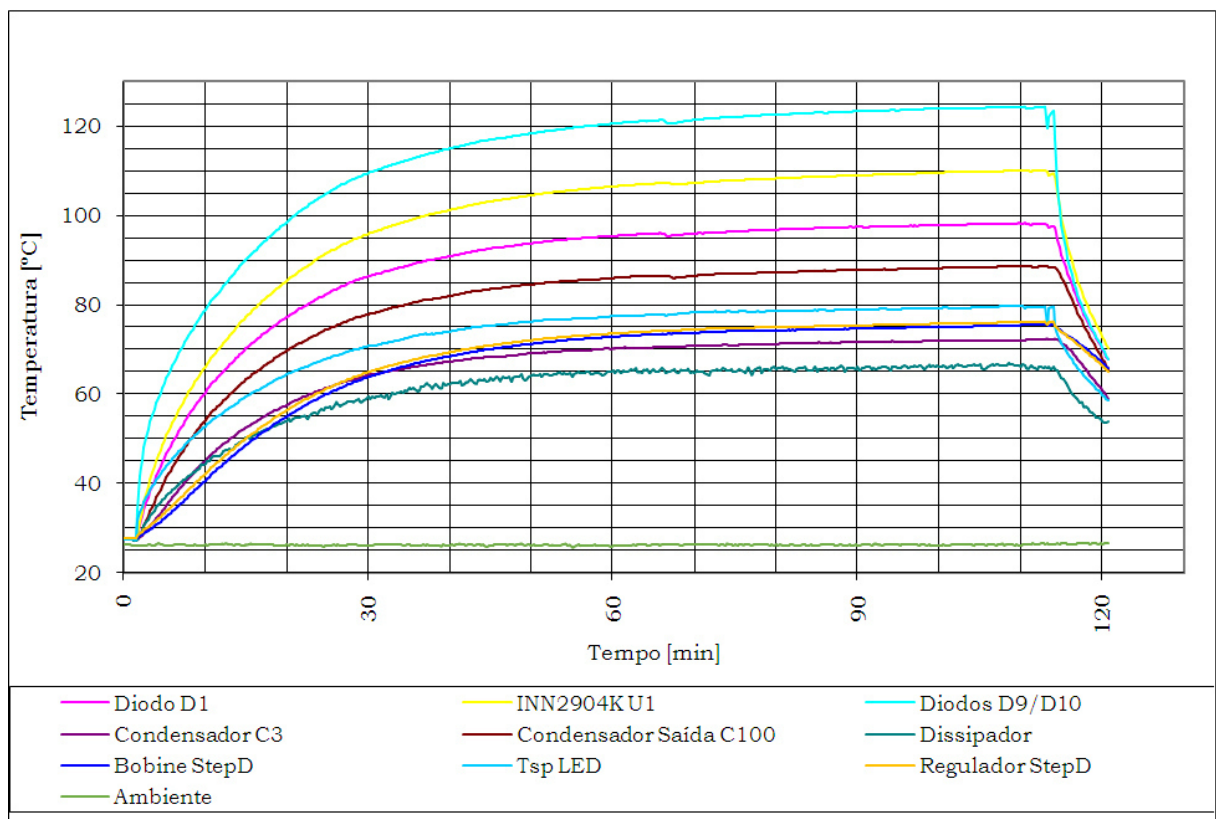


Figura 5.53 – Evolução das temperaturas nos componentes críticos na montagem AES 230 V 15 W 40 V com Lâmpada DC 12W

NOTA: Não foram registados os valores de temperaturas nos circuitos de regulação de corrente na lâmpada de 8,5 W pois já se tinha os resultados para a lâmpada de 12 W e estavam muito longe do seu limite pelo que se conservou a lâmpada de 8,5 W sem sensores sondas termopares para apresentação do produto.

5.4.4.7 Análise e discussão dos resultados

Os resultados obtidos apontam para o que se esperava:

- Com um consumo total de 10 W (casquilho e lâmpada), o ponto de funcionamento térmico da lâmpada está muito abaixo do que é comum na indústria.

Com efeito, segundo o *website LED Benchmark* (<http://www.ledbenchmark.com/>), um site que testa várias lâmpadas de vários fabricantes escolhidas do mercado, a temperatura das lâmpadas de 10 W tem-se verificado sempre acima dos 80 °C, como nos exemplos abaixo, Figura 5.54 e Figura 5.55:



Figura 5.54 – Resultados térmicos da lâmpada Philips 11 W 830 lm Dimmable Ambient LED Daylight (ledbenchmark.com, s.d.)



Figura 5.55 – Resultados térmicos da lâmpada GE 11 W 570 lm A19 Bulb (ledbenchmark.com, s.d.)

Como estas, existem muitas outras lâmpadas. O desempenho normal espectável no momento para as lâmpadas LED equivalentes às incandescentes de 60 W. Ora, temperaturas no encapsulamento de 88 °C ou 92 °C significam que os componentes no seu interior têm como referência estas temperaturas ambientes. Estas lâmpadas têm ratings de 25000 h e 15000 h. De facto, apenas recorrendo a componentes de topo e caros é possível que elas durem este tempo, se o atingirem.

- O dissipador da lâmpada do produto proposto opera a 55,7 °C e os LED à 62,3 °C no ponto de soldadura, algo que não é possível encontrar em nenhuma lâmpada comercial nesta gama de potências.
- Os LED são normalmente caracterizados considerando a temperatura do ponto de soldadura de 85 °C e, normalmente, são dadas curvas de conversão dos parâmetros para temperaturas mais elevadas, pois espera-se que deverão funcionar bem mais quentes. O caso proposto, a temperatura nem sequer atinge os 85°, o valor mínimo no qual se espera que operem.
- Com estes valores de temperaturas, o dissipador pode ser consideravelmente reduzido para ganhar espaço para desenvolvimento de óticas verdadeiramente omnidirecionais, para redução do custo da lâmpada e para redução do peso da lâmpada.
- A fonte de alimentação está a operar a baixas temperaturas, com os condensadores muito abaixo dos 85 °C, sua temperatura de rating.
- O condensador de 47 uF na saída da fonte, utilizado para auxílio da fonte no arranque, é o mais quente dos dois eletrolíticos, devido à sua proximidade ao transformador. No entanto, se a sua utilização vier a ser confirmada como indispensável, pode ser escolhido um local melhor para a sua colocação aquando da revisão do PCB, fazendo com que opere a menor temperatura.
- Tendo como referência o condensador de entrada, crítico para o funcionamento da fonte, e a temperatura registada nele, utilizando a regra para determinação do tempo de vida dos condensadores, um condensador barato de 5000 h @ 85 °C poderá durar 40000 h e um de 5000 h @ 105 °C poderá durar 160000 h. Assim, a limitação do tempo de vida das lâmpadas devido ao curto tempo de vida dos condensadores eletrolíticos está completamente ultrapassada.
- Os restantes componentes, principalmente os semicondutores, estão a operar a temperaturas baixas ou aceitáveis, pelo que não constituirão qualquer limitação para o tempo de vida da fonte;
- Aumentando a potência para 15 W de consumo total e 12 W DC na lâmpada, as temperaturas na fonte sobem, fazendo com que alguns componentes estejam perto do seu limite. Isto indica que a fonte, tal como está, carece de correções para melhoria do funcionamento à potência máxima;
- As altas temperaturas verificadas devem-se essencialmente ao espaço reduzido disponível para colocação da fonte e para dissipação térmica dos componentes e à escolha de componentes de média/baixa gama para constituição da fonte. Ainda assim,

introduzindo as correções indicadas anteriormente, no capítulo 5.4.4.2, resolve-se facilmente o problema através da impregnação do protótipo;

- As temperaturas verificadas na lâmpada continuam muito abaixo do que é comum para uma lâmpada nesta gama de potência e também para potências abaixo;

Em suma, este conceito permite atingir os objetivos propostos:

- Reduzir o custo da lâmpada através da utilização de componentes com menor rating, mais baratos, menos componentes e menor volume de alumínio para dissipação;
- Aumento do tempo de vida da lâmpada e da fonte de alimentação fazendo os componentes críticos operarem a temperaturas mais baixas;
- Melhorar a performance da lâmpada fazendo os LED operarem a temperaturas mais baixas;
- Possibilitar o *overdrive* dos LED sem o risco de limitar fortemente o tempo de vida da lâmpada;
- Simplificar o produto “Lâmpada” transformando-a num simples módulo de LED;
- Possibilitar a melhoria dos diagramas fotométricos deixando mais volume na lâmpada para a parte ótica;
- Simplificar o fabrico das lâmpadas através da simplificação do próprio produto;
- Manter o conceito de “Lâmpada” e “Casquilho”;
- Manter a dimensão dos casquilhos tal como os consumidores estão habituados e a compatibilidade com as estruturas já existentes;
- Simplificar a montagem da lâmpada sendo mais rápida a colocação, igualmente firme e fiável;
- Manter a segurança do utilizador e a fiabilidade do produto recorrendo a fontes isoladas;
- Eliminar o risco de choques elétricos ao tocar nos contactos de alimentação da lâmpada;
- Em termos de custos de produção e de comercialização do produto, estes variam com o fabricante, com os seus meios e métodos de fabrico. Logo é difícil obter um valor específico para o custo de produção e comercialização.
- Uma última vantagem não mencionada até ao momento é a facilitação da possível transição de redes domésticas AC para DC. Com a integração das energias renováveis e aumento da micro-geração doméstica para consumo, já se ouve falar das redes DC para cargas domésticas DC. Alguns fabricantes já começaram a desenvolver tecnologias nesse sentido como as baterias de armazenamento Powerwall da Tesla, Figura 5.56, que permitem armazenar energia das fontes renováveis para consumo próprio. Embora ainda se faça a conversão para AC, é provável que não tardem a aparecer casas com redes DC, evitando a transformação da corrente DC para AC para ser novamente convertida em DC. Desta forma, as lâmpadas sendo módulos DC com capacidade de alimentar os LED a partir de qualquer fonte de tensão DC, desde que dentro dos seus limites de tensão de

operação, poderiam ser diretamente ligadas à rede DC dispensando por completo a fonte AC-DC no interior do casquilho. Desta forma, não haveria transição, as mesmas lâmpadas usadas no conceito apresentado poderiam ser usadas nas redes DC, desde que os valores de tensão sejam os mesmos.

Isto é uma especulação para o futuro, mas há probabilidades que se venha a concretizar.



Figura 5.56 – Tesla Powerwall (Tesla, s.d.)

6. Conclusão

A tecnologia SSL é a tecnologia mais promissora para o futuro das lâmpadas de iluminação geral. É atualmente a tecnologia mais eficiente, economicamente viável e versátil para criação de produtos sustentáveis, indo ao encontro das metas estabelecidas pelas instituições governamentais, que por sua vez estabelecem leis e regulamentos que conduzam a melhoria da eficiência energética e melhor aproveitamento de recursos disponíveis na natureza.

Contudo, a tecnologia SSL, apesar de muito mais eficiente do que as suas concorrentes, ainda não atinge o que pode ser considerado como uma fonte eficiente. Os melhores LED atingem 30 % de eficiência, correspondendo a 200 lm/W de eficácia luminosa, somando ainda a perda de eficiência provocadas pelas óticas das lâmpadas. A margem de progressão das tecnologias SSL preveem que o seu potencial máximo seja de 50 % de eficiência. Isto significa que, na melhor das hipóteses, os LED desperdiçarão metade da energia que lhes é fornecida, maioritariamente sobre a forma de calor. Esse calor é fortemente prejudicial quer para os restantes elementos das lâmpadas quer para os próprios LED que perdem eficiência com o aumento da temperatura.

O calor gerado pelos LED obrigam à existência de elementos que se encarreguem da gestão térmica da lâmpada, os dissipadores. Os dissipadores têm a função de transferir o calor gerado pelos LED para o ar ambiente, por convecção natural. Normalmente, para uma lâmpada de aproximadamente 10W à LED, equivalente a incandescente de 60 W, os dissipadores operam a temperaturas acima dos 80 °C. Os dissipadores ocupam mais de metade da área superficial das lâmpadas sobrando apenas uma pequena porção para as óticas.

A temperatura de operação do dissipador e o facto das lâmpadas normalmente terem fontes de alimentação integradas, sujeitam os componentes da fonte de alimentação a temperaturas elevadas, o que faz reduzir o tempo de vida desses mesmos componentes e consequentemente de toda a lâmpada. Para compensar, são utilizados componentes mais resistentes ao calor, contudo mais caros. Ainda assim, apesar dos LED terem tempos de vida útil superior às 100000 h, as lâmpadas normalmente não ultrapassam as 25000 h.

O facto de os dissipadores ocuparem grande parte da área superficial da lâmpada faz também com que sobre pouco espaço para a parte ótica da lâmpada, fazendo com que a maioria dos fabricantes optem por fazer lâmpadas omnidirecionais, mas que só emitem luz para um lado, normalmente o lado oposto ao casquilho. Isto pode constituir um problema quando a zona a iluminar está do lado do casquilho, como por exemplo nos cadeeiros de teto, onde as lâmpadas estão montadas com o casquilho para baixo.

Com base nos problemas e limitações atuais das lâmpadas LED para iluminação geral, foi pensado e concebido um novo conceito para essas mesmas lâmpadas, que maximize o seu potencial, pois com as lâmpadas como são atualmente, não se está a obter o máximo que elas podem fornecer.

Este novo conceito de produto passa por separar a fonte de alimentação dos LED da matriz iluminante e da parte ótica da lâmpada. Desta forma, o dissipador pode ser reduzido; a temperatura a que os LED funcionam reduz; a superfície disponível para a parte ótica aumenta, possibilitando melhorias nos diagramas de emissão de luz da lâmpada; a eficiência dos LED

melhora; o tempo de vida da lâmpada passa a depender dos LED e não da fonte, logo esta também aumenta fortemente; a fonte passa a funcionar a temperatura muito mais baixa, pelo que o único aquecimento com que os seus componentes terão que lidar está relacionado com as perdas na própria fonte; o tempo de vida da fonte aumenta grandemente, uma vez que os componentes sensíveis ao calor operarão a temperaturas mais baixas; os componentes da fonte poderão ser mais baratos, assim como os LED; o custo quer das lâmpadas quer das fontes reduzirão.

Mas havia um desafio: como separar a fonte dos LED de forma a que seja um produto comercializável e aceitável no mercado? O mercado não aceita lâmpadas com uma caixa auxiliar ao lado.

Para resolver este problema, o conceito desenvolvido tirou vantagem da existência da base e dos casquilhos de rosca que normalmente são utilizados nas lâmpadas. São elementos de ligação elétrica, volumosos, concebidos para muito elevadas potências e temperaturas, algo que não se verifica nas lâmpadas LED. Logo, estes elementos são sobredimensionados para a sua finalidade nas lâmpadas LED.

Desta forma, a fonte de alimentação do módulo LED passaria a ficar no casquilho, e do lado da base fica um pequeno circuito regulador de corrente ajustado para os LED da lâmpada. Desta forma, as lâmpadas passam a ser meros módulos LED.

Neste projeto, foi desenvolvido um protótipo funcional que comprova a aplicabilidade do conceito.

Os resultados obtidos dos ensaios térmicos do protótipo comprovam há uma redução considerável da temperatura, abrindo possibilidades para melhoria do produto em todos os aspetos mencionados.

Para trabalhos futuros, é possível melhorar a fonte de alimentação desenvolvida e os circuitos de controlo de corrente, desenvolver módulo LED e dissipador para se obter máxima eficácia luminosa de uma lâmpada, com *design* inovador, diagramas fotométrico mais próximo do omnidirecional, com baixo custo e todas as outras vantagens possíveis de obter do novo conceito de produto.

7. Referências

- apartmenttherapy.com. (s.d.). Obtido de <http://www.apartmenttherapy.com/led-light-bulbs-energy-savings-147030>
- BBC. (Janeiro de 2016). *New development could lead to more effective light bulbs*. Obtido de News: <http://www.bbc.com/news/science-environment-35284112>
- Center for Climate and Energy Solutions. (04 de 2011). *Lighting Efficiency*. Obtido de <http://www.c2es.org/technology/factsheet/LightingEfficiency>
- Clarion. (s.d.). Obtido de <http://www.clarionsafety.com/WEEE-Directive/>
- CREE. (2016). Obtido de Recall Page: <http://www.cree.com/Support/Recalls/T8-R-Recall>
- CREE. (s.d.). Product Family Data-sheet. *Cree XLamp XT-E LEDs Rev 14C*.
- CREE. (s.d.). Product Family Data-sheet: XLamp MT-G2 EasyWhite [CLD-DS49 Rev 3F].
- DGEG. (s.d.). *Eficiência Energética: Iluminação*. Obtido de <http://www.dgeg.pt/>
- Digikey. (s.d.). *Article Library*. Obtido de <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/mar/smart-lighting-technologies-feature-cfl-dimming-wireless-control>
- DOE. (08 de 2014). Manufacturing Roadmap: Solid-State Lighting Research and Development. p. 25.
- DOE. (08 de 2014). Manufacturing Roadmap: Solid-State Lighting Research and Development. p. 24.
- DOE. (2016). Solid-State Lighting R&D Plan. p. 54.
- Dow Corning. (s.d.). *CN-8760 data-sheet*.
- EE Publishers. (s.d.). *Mercury treatment techniques for compact fluorescent lamps*. Obtido de <http://www.ee.co.za/article/mercury-treatment-techniques-compact-fluorescent-lamps.html>
- Electrical Engineering Portal. (s.d.). Obtido de <http://electrical-engineering-portal.com/luminous-measurement-graphic-representation>
- Electronic Engineering Time. (s.d.). Obtido de http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1280899
- electronicdesign.com. (s.d.). Obtido de <http://electronicdesign.com/components/great-thermal-design-enhances-led-reliability>

- Electronics Cooling. (s.d.). *Thermal Challenges In LED Cooling*. Obtido de <https://www.electronics-cooling.com/2006/11/thermal-challenges-in-led-cooling/>
- elprocus.com. (s.d.). Obtido de <https://www.elprocus.com/switch-mode-power-supply-working/>
- emaze.com. (s.d.). Obtido de <https://www.emaze.com/@AILTQIRO/OUR-ENERGY-SAVING>
- Energy Star. (2010). *Frequently Asked Questions Information on Compact Fluorescent Light Bulbs (CFLs) and Mercury*.
- energy.gov. (s.d.). *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy*. Obtido de <http://www.energy.gov/eere/ssl/led-basics>
- European Commission. (2008). *Press Release IP/08/1909*. Obtido de Member States approve the phasing-out of incandescent bulbs by 2012: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-08-1909_en.htm?locale=en
- European Commission. (2009). *DIRECTIVA 2009/125/EC*. Obtido de <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32009L0125>
- European Commission. (2009). *Memorandum MEMO/09/368*. Obtido de Phasing out conventional incandescent bulbs: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-09-368_en.htm
- European Commission. (2010). *DIRECTIVA 2010/30/EU*. Obtido de <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0030>
- European Commission. (s.d.). *Ecodesign*. Obtido de http://ec.europa.eu/growth/industry/sustainability/ecodesign_pt
- fire9prevention.wordpress.com. (s.d.). Obtido de <https://fire9prevention.wordpress.com/2011/08/26/fire-safety-and-compact-fluorescent-lights-cfls/>
- geek.com. (s.d.). Obtido de <http://www.geek.com/gadgets/crees-led-bulb-looks-like-an-incandescent-and-lights-like-one-for-under-10-1541531/>
- Global Footprint Network. (2012). *Dados de Portugal*. Obtido de <http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/trends/portugal/>
- Global Footprint Network. (2016). *World Footprint*. Obtido de http://www.footprintnetwork.org/ar/index.php/GFN/page/world_footprint/

- Green, P. B. (2011). *Flyback topology offers superior balance in LED drivers*. International Rectifier Corp. Obtido de <http://www.edn.com/design/led/4368731/Flyback-topology-offers-superior-balance-in-LED-drivers>
- Infineon Technologies. (s.d.). *Design Guide for Off-line FixedFrequency DCM Flyback Converter*.
- ledbenchmark.com. (s.d.). Obtido de <http://www.ledbenchmark.com/>
- ledlampinchina.wordpress.com. (s.d.). Obtido de <https://ledlampinchina.wordpress.com/2014/11/11/is-led-light-really-harmful-to-the-eyes/>
- LIFX. (s.d.). *How hot are LED light bulbs?* Obtido de <http://www.lifx.com/blogs/light-matters/19032975-how-hot-are-led-light-bulbs>
- Lighting Design Lab. (s.d.). Obtido de <https://www.lightingdesignlab.com/resources/articles/articles-lighting-fundamentals/color-temperature>
- Lumos Lighting. (s.d.). Obtido de <http://www.lumoslighting.com/guide/2014/0813/3.html>
- Modular Lighting Instruments. (s.d.). Obtido de <http://www.supermodular.com/en/products/nomad-minimal/>
- Monolithic Power Systems. (s.d.). *MPS2489 data-sheet*.
- Murphy, T. W. (2013). Maximum Spectral Luminous Efficacy of White Light. (p. 1). San Diego: Department of Physics, University of California.
- National Geographic. (s.d.). *Causes of Global Warming*. Obtido de <http://environment.nationalgeographic.com/environment/global-warming/gw-causes/>
- National Geographic. (s.d.). *Effects of Global Warming*. Obtido de <http://environment.nationalgeographic.com/environment/global-warming/gw-effects/>
- On Semiconductor. (s.d.). *Step by Step Design Tutorial of a fixed-frequency adapter <75W with very low power consumption*.
- On Semiconductor. (2000). *AN1680/D: Design Considerations for Clamping Networks for Very High Voltage Monolithic Off-line PWM Controllers*.
- Our World In Data. (2010). Obtido de <https://ourworldindata.org/world-population-growth/>
- Philips Lighting. (s.d.). Obtido de http://www.lighting.philips.com/main/prof/lamps/led-lamps-and-systems/led-lamps/corepro-ledbulb/929000220662_EU/product
- Philips. (s.d.). Understanding power LED lifetime analysis. *Technology White Paper*, 3.

- Power Integrations. (2016). *INN2603-2605 & INN2904 InnoSwitch-EP Family*.
- powersystemdesign.com. (s.d.). Obtido de <https://www.powersystemdesign.com/clamp-sizing-protection/22>
- quora.com. (s.d.). Obtido de <https://www.quora.com/Can-LED-lights-be-used-to-generate-electricity>
- researchgate.net. (s.d.). Obtido de https://www.researchgate.net/figure/224399650_fig1_Figure-3-Sketches-of-some-mainstream-power-LED-packages
- Shenzhen Halnziye Electronics Co., Ltd. (s.d.). Obtido de http://www.halnziye.net/products_detail/productId=99.html
- Sylvania (OSRAM). (s.d.). *Incandescent and Halogen Technology*. Obtido de Light and Color: <https://www.sylvania.com/en-us/innovation/education/light-and-color/Pages/incandescent-halogen-technology.aspx>
- Tesla. (s.d.). Obtido de <https://www.tesla.com/powerwall>
- Tisva Illuminology. (January de 2015). Obtido de <https://illuminologybytisva.com/2015/01/20/incandescent-lamps/>
- Topbulb. (s.d.). Obtido de <http://www.topbulb.com/color-rendering-index>
- U.S. Energy Information Administration. (09 de 02 de 2011). Obtido de <https://www.e-education.psu.edu/eme803/node/502>
- U.S. Environmental Protection Agency. (s.d.). *Learn About Sustainability*. Obtido de <https://www.epa.gov/sustainability/learn-about-sustainability>
- Wikidot. (21 de 06 de 2011). *Dlp Projectors Optics*. Obtido de <http://3dprinter.wikidot.com/dlp-projectors-optics>
- Wikipedia. (s.d.). *Halogen lamp*. Obtido de https://en.wikipedia.org/wiki/Halogen_lamp
- Wikipedia.org. (s.d.). Obtido de https://en.wikipedia.org/wiki/Flyback_converter

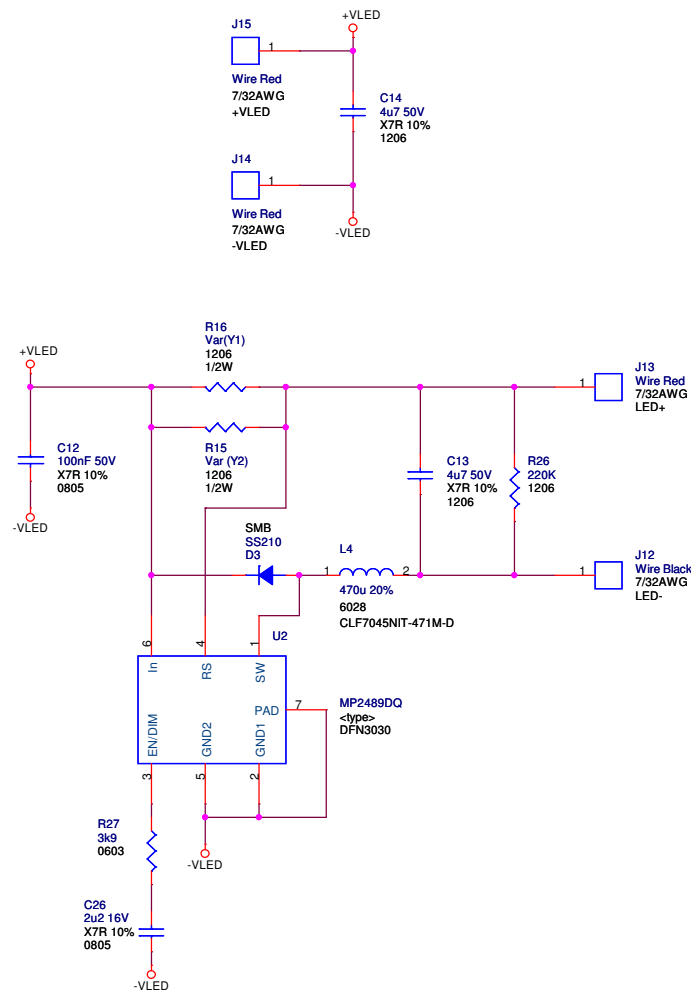
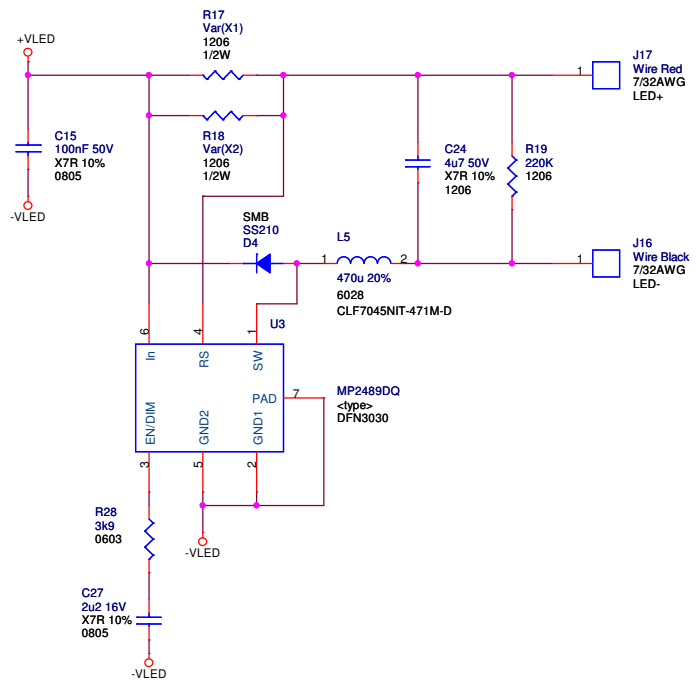
8. Lista de Anexos

Anexo A: Esquemático da fonte de alimentação e circuito regulador de corrente da prova de conceito.

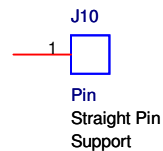
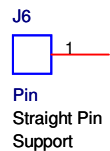
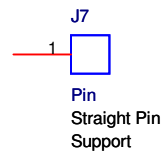
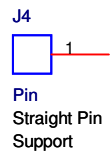
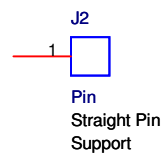
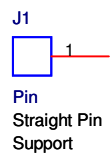
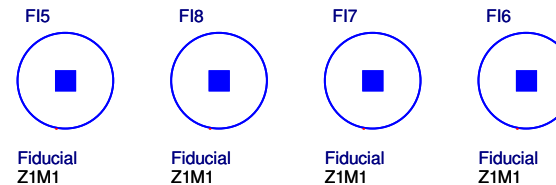
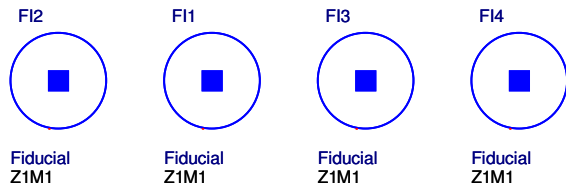
Anexo B: Lista de componentes utilizados na prototipagem da fonte de alimentação e circuito regulador de corrente.

Anexo C: Especificações para fabrico do PCB da fonte de alimentação comutada e circuitos reguladores de corrente.

ANEXO A



CWJ Projecto		Entidade EEC Active Socket 15W 20out 40V/0.33A	Documento Esquemático	
Realizou A. Santiago	Data 2016-08-16	Título da Página Current Controllers		Revisão 0
				Página 2 de 3



CWJ Projecto		Entidade EEC Active Socket 15W 1Out 40V/0.5A	Documento Esquemático	
Realizou A. Santiago	Data 2016-08-16	Título da Página Mechanicals and Fiducials		Revisão 0
				Página 3 de 3

ANEXO B

Anexo B: Lista de Material da fonte de alimentação principal e circuitos reguladores de corrente

Qt.	Ref. PCB	Valor	Ref. Fabricante
1	C1	47nF X2	TDK B32921C3473M289
1	C2	22nF 630V	TDK FK22C0G2J223J
1	C3	8u2 400V	Rubycon 400AX8.2M10X9
3	C4,C12,C15	100nF 50V	AVX 08055C104K4Z2A
12	C5,C8,C13,C14,C16,C17,C19,C20,C21,C22,C23,C24	4u7 50V	Murata GRM31CR71H475KA12L
1	C6	330pF 10V	Vishay VJ0603Y331KXXPW1BC
1	C7	2u2 16V	Murata GCM21BR71C225KA64L
1	C9	1nF 50V	Vishay VJ0603Y102KXAPW1BC
3	C10,C11,C18	100nF 16V	Vishay VJ0603Y104KXXPW1BC
1	C34	1n X1Y1	Murata DE1E3KX102MB4BN01F
1	C25	47uF 50V	Jamicon TBP470M1HE11M
2	C26,C27	2u2 16V	Samsung CL21B225KOFNNNE
1	D1	MURS140T3G	ON Semiconductor MURS140T3G
1	D2,D6	BAV202	Vishay BAV202-GS08
2	D3,D4	SS210	Vishay SS210-E3/52T
1	D5	MB10S	LGE MB10S
1	D7	BZT55C12	Vishay BZT55C12-GS08
1	D8	BZT55C7V5	Vishay BZT55C7V5-GS08
1	D9	S1M	Vishay S1M-E3/5AT
1	D10	SM6T220A	ST Micro SM6T220A
1	J3	PC SPTA 1.5/5.08	Phoenix Contact 1751163
1	J18	DC Connector 3P P3mm	TE Connectivity 1932076-1
1	L1	NR 5040T 220M	Taiyo Yuden NR5040T220M
1	L2	4.7mH	3L Electronic FS0807-472K
2	L4,L5	470u 20%	TDK CLF7045NIT-471M-D
2	Q1,Q2	BCX54-16	NXP BCX54-16,115
1	RV1	V320LC7P	Littelfuse V320LC7P
1	R1	22R	TT Electronics Welwyn ULW2-22RJA25
2	R2,R3	4k7	Vishay CRCW1206-BC 200 4K7 5% RT5
2	R6,R7	0R13 1/2%	Yageo RL1206FR-070R13L
1	R8	6k8 1%	ASJ CR16-682-JL
1	R9	3k6 1%	Vishay CRCW0603-BC 100 3K65 1% RT6
1	R10	110k 1%	Vishay CRCW0603-BC 100 110K 1% RT6
1	R11	20k	Vishay CRCW0603-BC 100 20K 1% RT5
1	R12	100R	Vishay CRCW0805-BC 200 100R 5% RT5
3	R13,R14,R24	2M2	Yageo RC1206JR-072M2L
4	R15,R16,R17,R18	"var table"	"var table"
2	R19,R26	220K	Vishay CRCW1206-BC 200 220K 5% RT6
1	R20	6k2	Vishay CRCW0603-BC 100 6K2 1% RT6
1	R21	100R	Vishay CRCW0805-BC 200 100R 5% RT5
1	R22	1k	Vishay CRCW0805-BC 100 1K 1% RT6
1	R23	47R	Vishay CRCW0805-BC 200 47R 5% RT5
1	R25	47R	Yageo RC1206JR-0747RL
2	R27,R28	3k9	Vishay CRCW0603-BC 200 3K9 5% RT6
1	T1	2T121249A12200020x00	CWJ TRFM Fbk EE1405 01
1	U1	INN2904K	Power Integrations INN2904K
2	U2,U3	MP2489DQ	MPS MP2489DQ-LF-P

Tabela de componentes variáveis

Qt.	Ref. PCB	Valor	Ref. Fabricante	Variante
2	R16,R17	1R8 1%	Vishay CRCW1206-BC 100 1R8 1% RT1	Lâmpada 2x6W
2	R15,R18	3R9 1%	Vishay CRCW1206-BC 100 3R9 1% RT5	Lâmpada 2x6W
2	R16,R17	1R1 1%	Vishay CRCW1206-HP 100 1R1 1% ET1	Lâmpada 1x8,5W
2	R15,R18	3R9 1%	Vishay CRCW1206-BC 100 3R9 1% RT5	Lâmpada 1x8,5W

ANEXO C

Anexo C: Especificações para fabrico do PCB

Glass Transition Temperature:	TG135
Laminate Material:	FR4
Base Material Thickness:	1.2 mm
Number of Layers:	2
Cooper Thickness (CT-Oz(um)):	1Oz (30-45 um)
Top/Bottom Surfaces Finishing:	HASL
Solder Mask Color Top Layer:	Green
Solder Mask Color Bottom Layer:	Green
Silk Screen Color Top Layer:	White
Silk Screen Color Bottom Layer:	White
Graphite Layer (GL) or conductive Carbon ink:	NULL
Scoring Angle (V-Cut-°):	NULL
Scoring Web Depth:	NULL
Routing Tool Diameter T01 (RTD-T01-mm):	1.6 mm
Routing Tool Diameter T02 (RTD-T02-mm):	0.8 mm
Peeling Solder Mask:	NO
Description Mark in Silk Screen Top Layer:	YES
Description Mark in Silk Screen Bottom Layer:	NO
"UL94 V-0" Mark in Silk Screen Top Layer:	NO
"UL94 V-0" Mark in Silk Screen Bottom Layer:	NO
Date Code Format "WWYY" Mark in Silk Screen Top Layer:	YES
Date Code Format "WWYY" Mark in Silk Screen Bottom Layer:	NO
LxW Dimensions (Lmm x Wmm):	120.30x40 mm
Acceptance Criteria:	IPC-A-600-G Class 2
Reference Standards:	IPC-A-600-G Class 2
Approvals:	UL, CSA, VDE
Pb Free:	YES
Halogen Free:	NULL
RoHS Compliant:	YES
Scoring Angle (V-Cut-°):	NULL
Scoring Web Thickness (SWT-mm):	NULL
Acceptance Criteria (AC):	IPC-A-600-G Class 2
Compliance with International Standard Certification Marks:	UL
Compliance with Standards for Safety in Flammability:	UL94-V0
Automotive Qualification :	NULL
Reference Standards :	IPC-A-600-G Class 2
Approvals :	UL, CSA, VDE
Pb Free :	YES
Halogen Free :	NULL
RoHS Compliant :	YES