

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
TELECOMUNICAÇÕES

ANA CAROLINE TORRES DE CARVALHO

CLASSIFICAÇÃO DE TOPOLOGIAS EMPREGADAS EM LÂMPADAS LED A PARTIR  
DE APRENDIZADO SUPERVISIONADO

NITERÓI, RJ

2019

ANA CAROLINE TORRES DE CARVALHO  
MATRÍCULA: M054.118.001

CLASSIFICAÇÃO DE TOPOLOGIAS EMPREGADAS EM LÂMPADAS LED A PARTIR  
DE APRENDIZADO SUPERVISIONADO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Marcio Zamboti Fortes, Dr.

Niterói, RJ

2019

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

C331c Carvalho, Ana Caroline Torres de  
Classificação de topologias empregadas em lâmpadas LED a  
partir de aprendizado supervisionado / Ana Caroline Torres de  
Carvalho ; Marcio Zamboti Fortes, orientador. Niterói, 2019.  
103 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Niterói, 2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2019.m.14807044745>

1. Lâmpada. 2. Aprendizado de máquina. 3. Reconhecimento  
de padrão. 4. Produção intelectual. I. Fortes, Marcio  
Zamboti, orientador. II. Universidade Federal Fluminense.  
Escola de Engenharia. III. Título.

CDD -

Bibliotecária responsável: Fabiana Menezes Santos da Silva - CRB7/5274

ANA CAROLINE TORRES DE CARVALHO

**"Classificação de Topologias Empregadas em Lâmpadas LED a partir de  
Aprendizado Supervisionado"**

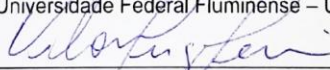
Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa de Pós Graduação em Engenharia  
Elétrica e de Telecomunicações da Universidade  
Federal Fluminense como requisito parcial para a  
Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia  
Elétrica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Energia  
Elétrica

BANCA EXAMINADORA



**Prof. Dr. Márcio Zamboti Fortes** – Orientador  
Universidade Federal Fluminense – UFF



**Prof. Dr. Vitor Hugo Ferreira**  
Universidade Federal Fluminense – UFF



**Prof. Dr. Rodrigo Flora Calili**  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC

Niterói  
(Fevereiro/2019)

Dedico este trabalho aos meus pais.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de expressar os meus agradecimentos aos meus pais, irmãos e noivo por toda a motivação, compreensão e apoio incondicional.

Ao Professor Marcio Zamboti Fortes, orientador da presente dissertação, pela orientação, disponibilidade e paciência durante as fases de concepção deste estudo, seu direcionamento foi fundamental. Muito obrigada pelo exaustivo trabalho de revisão de textos e correções, por sempre se fazer presente nos momentos em que precisei de auxílio ao longo do curso e pelo aprendizado, que vai além dos ensinamentos acadêmicos.

Ao Professor Hélio Amorim por ter acreditado no meu potencial e pelo direcionamento ao longo de toda a minha trajetória acadêmica.

Ao Professor Guilherme Sotelo pela paciência, confiança, generosidade e ensinamentos durante o período que estive em estágio em docência.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense por me proporcionar a oportunidade de fazer parte do quadro de alunos desta Instituição, a qual tenho muito carinho.

A CAPES por ter me concedido apoio financeiro.

Ao LABLUX, Laboratório de Luminotécnica da UFF e ao Laboratório FRIENDS (*Flexible, Resilient and Intelligent*

*Energy Delivery Systems*) por disponibilizarem espaços onde pude desenvolver a presente dissertação.

Aos professores, funcionários, alunos e colegas da UFF, expresso a minha gratidão a todos pelo incentivo.

Deixo ainda um agradecimento a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização do presente documento.

## RESUMO

O presente trabalho visa classificar topologias de conversores CC-CC, utilizados em fontes chaveadas, que são empregadas em dispositivos de controle de lâmpadas LED, através do aprendizado de máquina. O estudo traz uma contextualização acerca de parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia, regulamentos técnicos, fontes chaveadas e redes neurais artificiais, necessários para o entendimento do trabalho, e mostra, na sequência, ensaios realizados para registrar parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia das amostras selecionadas. Os valores medidos foram analisados e compuseram uma matriz de entrada de uma rede neural de aprendizado supervisionado. Os dispositivos de controle das dezoito amostras de lâmpadas LED selecionadas são constituídos por conversores CC-CC de três tipos, os de topologia *buck* sem filtro, os de topologias *buck* e os *flyback* com filtro. Os resultados indicam que as lâmpadas *buck* com filtro obtiveram os melhores desempenhos e que a classificação das topologias das amostras de lâmpadas LED atingiu um percentual de acerto de 99,5%. O presente estudo incentiva o desenvolvimento e o aprimoramento tecnológico de lâmpadas LED e mostra a possibilidade da criação de uma ferramenta capaz de determinar aspectos construtivos de lâmpadas LED através do aprendizado supervisionado.

**Palavras-chave:** lâmpadas LED, qualidade de energia, fontes chaveadas, aprendizado supervisionado, redes neurais, reconhecimento de padrão.

## ABSTRACT

This work aims to classify topologies of DC-DC converters, used in switched sources, present in control devices of LED lamps, through machine learning. The study provides a contextualization of the parameters of lighting and energy quality, technical regulations, switching sources and artificial neural networks, necessary for the understanding of the work, and shows, in the sequence, tests carried out to record lighting parameters and energy quality of the selected samples. The measured values were analyzed and composed an input matrix of a neural network of supervised learning. The control devices of the eighteen samples of selected LED lamps are composed of three types of DC-DC converters, those of buck topology without filter and those of buck and flyback topologies with filter. The results indicate that buck lamps with filter obtained the best performances and that the classification of the topologies of the samples of LED lamps reached a percentage of success of 99.5%. The study encourages the development and technological improvement of LED lamps and shows the possibility of creating a tool capable of determining constructive aspects of LED lamps through supervised learning.

**Keywords:** LED lamps, power quality, switching circuits, supervised learning, neural network, pattern recognition.

## SUMÁRIO

|                                                                 |      |
|-----------------------------------------------------------------|------|
| LISTA DE FIGURAS .....                                          | xi   |
| LISTA DE TABELAS .....                                          | xiv  |
| LISTA DE ABREVIATURAS.....                                      | xv   |
| LISTA DE SÍMBOLOS .....                                         | xvii |
| 1. Introdução .....                                             | 1    |
| 1.1 Motivação .....                                             | 3    |
| 1.2 Objetivos.....                                              | 4    |
| 1.3 Principais contribuições .....                              | 5    |
| 1.4 Estrutura do documento .....                                | 5    |
| 2. Fundamentação Teórica .....                                  | 7    |
| 2.1 Lâmpadas LED .....                                          | 7    |
| 2.2 Parâmetros luminotécnicos .....                             | 9    |
| 2.2.1 Fluxo luminoso.....                                       | 10   |
| 2.2.2 Eficácia luminosa .....                                   | 11   |
| 2.2.3 Temperatura de cor correlata.....                         | 11   |
| 2.2.4 Índice de reprodução de cor .....                         | 13   |
| 2.3 Parâmetros de qualidade de energia.....                     | 14   |
| 2.3.1 Corrente harmônica .....                                  | 14   |
| 2.3.2 Distorção harmônica total .....                           | 14   |
| 2.4 Conclusão.....                                              | 15   |
| 3. Fontes Chaveadas.....                                        | 16   |
| 3.1 Contextualização.....                                       | 16   |
| 3.2 Topologia <i>buck</i> .....                                 | 17   |
| 3.3 Topologia <i>flyback</i> .....                              | 19   |
| 3.4 Filtro EMI, dispositivos de proteção e correção de FP ..... | 21   |
| 3.4.1 Filtro EMI.....                                           | 21   |
| 3.4.2 Correção de FP .....                                      | 22   |
| 3.4.3 Supressor de tensão transiente.....                       | 23   |
| 3.4.4 Dispositivos de proteção .....                            | 23   |
| 3.5 Topologia <i>buck versus</i> topologia <i>flyback</i> ..... | 25   |
| 3.6 Conclusão.....                                              | 27   |
| 4. Redes Neurais Artificiais .....                              | 28   |
| 4.1 Inteligência artificial e inteligência computacional .....  | 28   |

|       |                                                            |    |
|-------|------------------------------------------------------------|----|
| 4.2   | História das redes neurais artificiais .....               | 29 |
| 4.3   | Modelagem de neurônio artificial.....                      | 30 |
| 4.4   | Arquiteturas de rede.....                                  | 33 |
| 4.5   | Algoritmos de aprendizagem .....                           | 36 |
| 4.6   | Treinamento .....                                          | 38 |
| 4.7   | Aplicações.....                                            | 39 |
| 4.8   | Conclusão.....                                             | 41 |
| 5.    | Metodologia .....                                          | 42 |
| 5.1   | Laboratório.....                                           | 42 |
| 5.2   | Amostras ensaiadas.....                                    | 42 |
| 5.3   | Equipamentos utilizados .....                              | 44 |
| 5.4   | Rotina de ensaio .....                                     | 46 |
| 5.5   | Implementação da rede neural .....                         | 47 |
| 5.6   | Conclusão.....                                             | 51 |
| 6.    | Análise de Resultados .....                                | 52 |
| 6.1   | Parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia .....  | 52 |
| 6.2   | Rede neural .....                                          | 64 |
| 6.3   | Discussão dos Resultados .....                             | 67 |
| 6.4   | Conclusão.....                                             | 69 |
| 7.    | Conclusões .....                                           | 71 |
| 7.1   | Trabalhos futuros .....                                    | 72 |
| 7.1.1 | Ferramenta de baixo custo.....                             | 72 |
| 7.1.2 | Otimização de <i>drivers</i> de lâmpadas LED.....          | 73 |
| 7.1.3 | Avaliação do impacto de lâmpadas LED na rede .....         | 73 |
| 7.1.4 | Revisão das portarias nº 389 e nº 144 .....                | 73 |
| 7.1.5 | Análise de características de partida de lâmpadas LED..... | 74 |
|       | Referências Bibliográficas.....                            | 75 |
|       | Anexo A – SINMETRO, CONMETRO e INMETRO.....                | 80 |
| A.1   | Portarias: definições e requisitos .....                   | 82 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Estrutura do consumo de eletricidade por classe em 2017 (GWh).....                                           | 1  |
| Figura 2 - Consumo de energia elétrica por serviço energético no setor residencial, referente ao ano de 2020 (GWh)..... | 2  |
| Figura 3 - Lâmpada LED e seus componentes. ....                                                                         | 8  |
| Figura 4 - Esfera integradora e espectro-radiômetro. ....                                                               | 10 |
| Figura 5 - Representação gráfica de fluxo luminoso. ....                                                                | 11 |
| Figura 6 – Representação de temperatura de cor.....                                                                     | 12 |
| Figura 7 - Diagrama de cromaticidade. ....                                                                              | 13 |
| Figura 8 - Representação índice de reprodução de cor.....                                                               | 14 |
| Figura 9 - Fontes chaveadas de lâmpadas LED.....                                                                        | 17 |
| Figura 10 - Circuito do conversor CC-CC de topologia buck. ....                                                         | 18 |
| Figura 11 - Caminhos de corrente do conversor buck.....                                                                 | 18 |
| Figura 12 - Circuito do conversor CC-CC de topologia flyback.....                                                       | 20 |
| Figura 13 - Caminhos de corrente do conversor flyback.....                                                              | 20 |
| Figura 14 - Exemplo de aplicação de TVS em fontes chaveadas.....                                                        | 23 |
| Figura 15 - Resistor fusível e sua representação. ....                                                                  | 24 |
| Figura 16 - Varistor e sua representação. ....                                                                          | 25 |
| Figura 17 - Circuitos dos conversores CC-CC de topologias buck e flyback. ....                                          | 25 |
| Figura 18 - Diagrama esquemático de dois neurônios biológicos.....                                                      | 30 |
| Figura 19 - Diagrama esquemático um neurônio artificial sem bias.....                                                   | 31 |
| Figura 20 - Diagrama esquemático um neurônio artificial com bias. ....                                                  | 32 |
| Figura 21 - RNA de camada única. ....                                                                                   | 34 |
| Figura 22 - RNA de múltiplas camadas.....                                                                               | 35 |
| Figura 23 - Exemplos de problemas de regressão e classificação.....                                                     | 37 |
| Figura 24 - Fluxo de sinais os ressaltando os detalhes do neurônio de saída j.....                                      | 38 |
| Figura 25 - O aprendizado de máquina e suas aplicações. ....                                                            | 40 |
| Figura 26 - Lâmpada LED bulbo E-27 .....                                                                                | 44 |
| Figura 27 – Fonte Lisun Group .....                                                                                     | 45 |
| Figura 28 – Esfera integradora Ulbricht.....                                                                            | 45 |
| Figura 29 –Wattímetro Yokogawa WT-210.....                                                                              | 45 |
| Figura 30 – Espectroradiômetro HAAS-200 .....                                                                           | 45 |
| Figura 31 –Saída do software Everfine HaasSuite .....                                                                   | 45 |

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 32 – Saída do software WTVViewer .....                                                  | 45 |
| Figura 33 – Esquema de disposição de equipamentos em laboratório. ....                         | 47 |
| Figura 34 – Modelo de rede feedforward de camadas múltiplas.....                               | 48 |
| Figura 35 – Exemplo do vetor de entrada.....                                                   | 49 |
| Figura 36 – Exemplo do vetor de saída. ....                                                    | 50 |
| Figura 37 – Percentual de dados utilizados nas etapas de treinamento, validação e testes. .... | 50 |
| Figura 38 – Rede feedforward de duas camadas com neurônios de saídas sigmóides.....            | 51 |
| Figura 39 – Potência medida. ....                                                              | 55 |
| Figura 40 – Fator de potência. ....                                                            | 56 |
| Figura 41 – Corrente harmônica.....                                                            | 57 |
| Figura 42 – Fluxo luminoso. ....                                                               | 58 |
| Figura 43 – Eficácia luminosa. ....                                                            | 59 |
| Figura 44 – Temperatura de cor correlata. ....                                                 | 60 |
| Figura 45 – Índice de reprodução de cor. ....                                                  | 61 |
| Figura 46 – Distorção Harmônica Total. ....                                                    | 62 |
| Figura 47 – Forma de onda de entrada de lâmpada de topologia flyback. ....                     | 63 |
| Figura 48 – Forma de onda de entrada de lâmpada de topologia buck. ....                        | 63 |
| Figura 49 – Forma de onda de entrada de lâmpada de topologia buck sem filtro.....              | 63 |
| Figura 50 – DHT de lâmpada de topologia flyback (DHT = 14%).....                               | 64 |
| Figura 51 – DHT de lâmpada de topologia buck sem filtro (DHT = 204%).....                      | 64 |
| Figura 52 – Melhor desempenho da validação. ....                                               | 65 |
| Figura 53 – Treinamento. ....                                                                  | 65 |
| Figura 54 – Histograma do erro.....                                                            | 66 |
| Figura 55 – Curvas características.....                                                        | 66 |
| Figura 56 – Matrizes para treinamento.....                                                     | 67 |
| Figura 57 - Organograma parcial do SINMETRO. ....                                              | 80 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Principais diferenças entre as topologias buck e flyback. ....         | 27 |
| Tabela 2 - Descrição de amostras. ....                                            | 43 |
| Tabela 3 – Média de amostras de lâmpadas LED de topologia flyback com filtro..... | 53 |
| Tabela 4 – Média de amostras de lâmpadas LED de topologia buck com filtro.....    | 53 |
| Tabela 5 – Média de amostras de lâmpadas LED de topologia buck sem filtro. ....   | 54 |
| Tabela 6 – Classificação de TCC em categorias. ....                               | 84 |
| Tabela 7 – Limites de parâmetros estabelecidos pelas portarias RTQ e RAC.....     | 85 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|          |                                                                      |
|----------|----------------------------------------------------------------------|
| EPE      | Empresa de Pesquisa Energética                                       |
| PDE      | Plano Decenal de Expansão de Energia                                 |
| MME      | Ministério de Minas e Energia                                        |
| PROCEL   | Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica                 |
| LED      | <i>Light Emitting Diode</i>                                          |
| INMETRO  | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia             |
| ABILUX   | Associação Brasileira da Indústria de Iluminação                     |
| IA       | Inteligência Artificial                                              |
| NPRTOOL  | <i>Neural Pattern Recognition</i>                                    |
| IEC      | <i>International Electrotechnical Commission</i>                     |
| LFC      | Lâmpadas Fluorescentes Compactas                                     |
| PCB      | <i>Printed Circuit Board</i>                                         |
| CC       | Corrente Contínua                                                    |
| SI       | Sistema Internacional                                                |
| TCC      | Temperatura de Cor Correlata                                         |
| IRC      | Índice de Reprodução de Cor                                          |
| CIE      | <i>International Commission on Illumination</i>                      |
| DHT      | Distorção Harmônica Total                                            |
| CA       | Corrente Alternada                                                   |
| SINMETRO | Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial  |
| CONMETRO | Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial |

|      |                                             |
|------|---------------------------------------------|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas    |
| SBN  | Sistema Brasileiro de Normalização          |
| CBN  | Comitê Brasileiro de Normalização           |
| NBR  | Normas Brasileiras                          |
| ENCE | Etiqueta Nacional de Conservação de Energia |
| PBE  | Programa Brasileiro de Etiquetagem          |
| RTQ  | Regulamento Técnico de Qualidade            |
| FP   | Fator de Potência                           |
| RAC  | Requisitos de Avaliação da Conformidade     |
| EL   | Eficácia Luminosa                           |
| EMI  | <i>Electromagnetic Interference</i>         |
| PWM  | <i>Pulse Width Modulation</i>               |
| PFC  | <i>Power Factor Correction</i>              |
| PPFC | <i>Passive Power Factor Correction</i>      |
| APFC | <i>Active Power Factor Correction</i>       |
| TVS  | <i>Transient Voltage Suppressor</i>         |
| RNA  | Rede Neural Artificial                      |
| IC   | Inteligência Computacional                  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|        |                                          |
|--------|------------------------------------------|
| $\Phi$ | - Fluxo luminoso                         |
| $D_x$  | - Distorção harmônica total              |
| $X_1$  | - Componente fundamental                 |
| $X_n$  | - Conteúdo harmônico de ordem “n”        |
| S      | - Dispositivo de comutação <i>switch</i> |
| L      | - Indutor                                |
| VD     | - Diodo                                  |
| $U_i$  | - Tensão de entrada                      |
| $U_o$  | - Tensão de saída                        |
| $I_L$  | - Corrente                               |
| C      | - Capacitor                              |
| $R_L$  | - Carga                                  |
| $I_o$  | - Corrente que passa por $R_L$           |
| $T$    | - Ciclo                                  |
| $t$    | - Tempo                                  |
| T      | - Transformador de alta frequência       |
| $I_P$  | - Passa pelo lado primário               |
| $I_S$  | - Passa pelo lado secundário             |
| $L_P$  | - Indutor do primário                    |
| $D$    | - Ciclo de trabalho                      |
| $f$    | - Função de transferência                |
| S      | - Saída escalar                          |

|                    |   |                                |
|--------------------|---|--------------------------------|
| $E$                | - | Entrada escalar                |
| $P$                | - | Peso escalar                   |
| $B$                | - | <i>Bias</i> escalar            |
| $v_j(k)$           | - | Campo local induzido           |
| $w_{ji}(k)$        | - | Peso sináptico                 |
| $y_i(k)$           | - | Saída do neurônio $j$          |
| $b_j$              | - | <i>Bias</i> do neurônio $j$    |
| $\phi_j$           | - | Função de ativação do neurônio |
| $\delta_j(k)$      | - | Gradiente local                |
| $e_j(k)$           | - | Sinal de erro                  |
| $\Delta w_{ji}(k)$ | - | Ajuste dos pesos               |

# 1. Introdução

O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade, refletindo tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto a capacidade da população para adquirir bens e serviços [1]. O consumo de energia elétrica no Brasil no ano de 2017 foi de 465 TWh, sendo que 28,79% deste consumo refere-se ao setor residencial, como pode ser visto na Figura 1, que apresentou um crescimento de 0,8% quando comparado ao ano anterior, 2016 [2]. Um estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) [3], mostrou a projeção do consumo de energia elétrica por serviço energético no setor residencial no ano de 2020, disposto na Figura 2, onde é possível observar que a iluminação é responsável por 10,77% do consumo residencial.

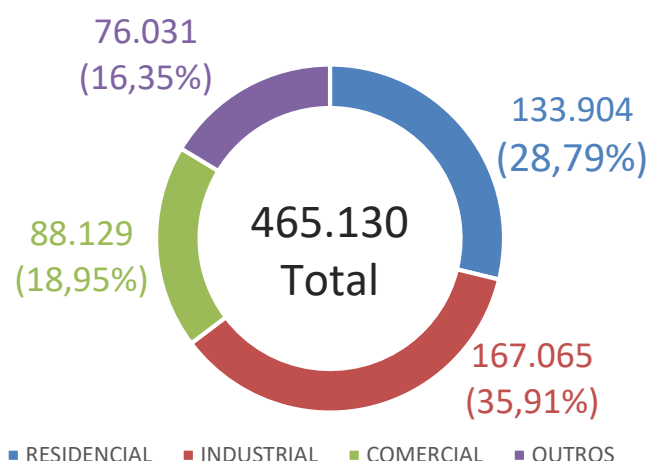


Figura 1 - Estrutura do consumo de eletricidade por classe em 2017 (GWh).

Fonte: Autoria própria, elaborado a partir de [2].

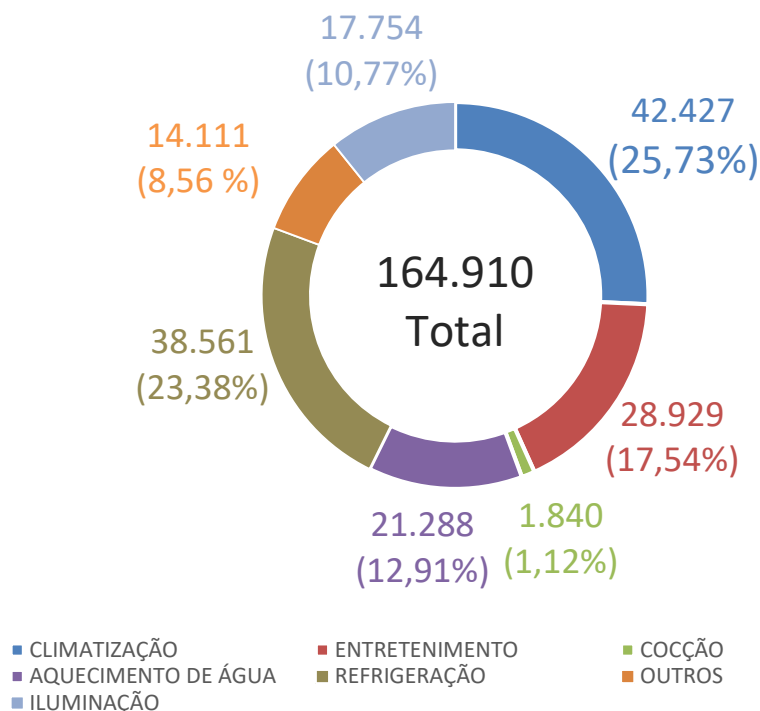


Figura 2 - Consumo de energia elétrica por serviço energético no setor residencial, referente ao ano de 2020 (GWh).

Fonte: Autoria própria, elaborado a partir de [3].

A expansão do consumo de energia, embora possa refletir o aquecimento econômico e a melhoria da qualidade de vida, tem aspectos negativos. Um deles é a possibilidade do esgotamento dos recursos utilizados para a produção deste insumo. Uma das maneiras mais utilizadas para conter a expansão do consumo sem comprometer qualidade de vida e desenvolvimento econômico tem sido o estímulo ao uso eficiente de energia. No Brasil, no que concerne à energia elétrica, esse estímulo tem sido aplicado de maneira sistemática desde 1985, quando o Ministério de Minas e Energia (MME) criou o Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), de âmbito nacional e coordenado pela Eletrobrás, [1] que vem estimulando a substituição de equipamentos de consumo elevado por outros mais eficientes em diferentes áreas de atuação, e a iluminação têm recebido grande incentivo.

O estoque de lâmpadas gira rapidamente e as taxas de cobertura aumentam com a implementação de uma nova política. No entanto, uma vez que a iluminação representa uma pequena quantidade de consumo global de energia final, sua participação na cobertura global é inferior a 2% [4].

Os dispositivos de iluminação serão os responsáveis pela maior parte da conservação de energia nos domicílios, resultado da redução da comercialização de lâmpadas incandescentes, mais populares nas residências em 2016, e da maior penetração de lâmpadas fluorescentes compactas e de LED (*Light Emitting Diode*). Recentemente tem sido possível observar a popularização das lâmpadas LED no mercado. Dessa forma, a conservação de energia elétrica no setor residencial será de 4% do consumo total. Cabe destacar que o aumento da renda, acima da trajetória considerada, levaria a um crescimento da venda de equipamentos novos mais eficientes e taxas mais elevadas de conservação de energia [5].

O baixo consumo de energia, vida útil mais longa e menor impacto ambiental são as principais características das lâmpadas LED. Regulamentadas pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), devem ser certificadas, atendendo a requisitos mínimos com foco no desempenho energético, segurança elétrica e compatibilidade eletromagnética. Com grande diversidade de modelos, esse tipo de lâmpada possui características específicas que a diferencia dos produtos que estão no mercado há mais tempo [6].

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Iluminação (Abilux), o mercado brasileiro dos produtos de LED cresce mais de 30% ao ano, enquanto as importações de LED cresceram 10,6% em 2017, as compactas fluorescentes recuaram 64% no período. Estima-se que cerca de 90% das lâmpadas LED no Brasil sejam importadas. Cerca de 30% das compras, atualmente, são de unidades com preços até 80% abaixo do praticado no mercado de iluminação e fora dos padrões de segurança exigidos no Brasil [7]. Portanto, a necessidade de aperfeiçoar os requisitos técnicos e de avaliação da conformidade para as lâmpadas LED comercializadas no Brasil é evidente e fundamental para garantir que os produtos comercializados nos próximos anos tenham níveis de qualidade adequados, atendendo às especificações das normas Brasileiras, trazendo segurança e confiança para o consumidor ao adquirir um produto de iluminação de tecnologia LED.

## 1.1 Motivação

Pensando na expansão da parcela do consumo de energia do setor de iluminação da classe residencial, tendo em vista a ascensão do mercado de iluminação e considerando a crescente preocupação dos órgãos regulamentadores com os problemas de compatibilidade

eletromagnética, segurança, eficiência energética e durabilidade de produtos de iluminação, é possível perceber a necessidade de incentivar o desenvolvimento e aprimoramento tecnológico de tais produtos. Em especial as lâmpadas LED que, devido à inserção de um grande número de lâmpadas fora do padrão no mercado brasileiro, pela importação, apresentam características de funcionamento variadas devido às mais diversas tecnologias empregadas em seus *drivers*. Desta maneira, o assunto em questão assume uma grande importância no contexto do problema apresentado.

Para que o desenvolvimento e o aprimoramento tecnológico das lâmpadas LED sejam alavancados, é necessário que haja estudos aprofundados das características de funcionamento de tais dispositivos. Atualmente diversos equipamentos de medição de parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia são utilizados em desenvolvimentos de estudos, porém não existe uma ferramenta capaz de realizar diagnósticos de lâmpadas LED que permita a possibilidade de determinar seus aspectos construtivos sem que a lâmpada seja desmontada ou até mesmo danificada.

A Inteligência Artificial (IA) vem apresentando constantes avanços em suas ramificações permitindo o desenvolvimento de algoritmos de aprendizado de máquinas principalmente no reconhecimento de padrões. A IA proporciona funcionalidades cada vez mais similares ao funcionamento do cérebro humano, uma tecnologia acessível, de algoritmos diversificados, atendendo as mais diversas aplicações sem a interferência humana. Tais características destacam a possibilidade da eficácia do algoritmo na aplicação da classificação de topologias empregadas em lâmpadas LED, através do comportamento de parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia, instigando a verificação da aplicabilidade do método ao problema.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo a elaboração de uma metodologia que determine aspectos construtivos de dispositivos de controle empregados em lâmpadas LED utilizando o aprendizado de máquina como ferramenta para encontrar padrões de funcionamento de diferentes lâmpadas LED. O algoritmo desenvolvido empregado neste trabalho utiliza o ambiente do programa MATLAB com o propósito de classificar lâmpadas LED a partir da análise de parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia que caracterizam seu

comportamento. A classificação de padrões é realizada através do modelo de aprendizado supervisionado empregado na *Toolbox* de reconhecimento de padrões neurais *Neural Pattern Recognition* (NPRTOOL). As características a serem classificadas podem ser resumidas como tecnologia, topologia e existência de filtro. Além disso, o presente trabalho visa realizar análises de parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia e estudar as diferenças de comportamentos de lâmpadas de acordo com a topologia empregada em seus *drivers*.

## 1.3 Principais contribuições

Até o momento, dois trabalhos completos no âmbito desta dissertação foram publicados, um trabalho em anais de congresso e um artigo em periódico. As produções bibliográficas estão descritas na sequência.

- CARVALHO, ANA C. T.; BARRIENTOS, LUIZ E.; FORTES, MARCIO Z.; FERREIRA, VITOR H.; OLIVEIRA, LORENN A. B. Topologies classification employed in LED lamps through supervised learning. In: 2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE) [VII Brazilian Electrical Systems Symposium (SBSE)], 2018, Niterói. 2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 2018.
- CARVALHO, A. C. T.; FORTES, MARCIO Z.; BARRIENTOS, LUIZ E.; GUARDIOLA, JUAN F. H. Analysis of the Voltage Variation Effects in LED Lamps. *International Journal of Energy Science and Engineering*, v. Vol. 4, p. 17, 2018.

## 1.4 Estrutura do documento

A dissertação será dividida em sete capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução, a motivação do trabalho, o objetivo e a estrutura da dissertação. Os capítulos dois, três e quatro contextualizam assuntos necessários para o entendimento do trabalho e os capítulos cinco, seis e sete trazem a metodologia, a análise de resultados e as conclusões.

O segundo capítulo realiza uma revisão teórica a respeito das lâmpadas LED, que abordará os parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia utilizados ao longo da dissertação. Além disso, os aspectos construtivos e as características de funcionamento de

lâmpadas LED também serão descritos neste capítulo, assim como as normas do INMETRO para lâmpadas LED de até 60W.

O terceiro capítulo será inteiramente dedicado a fontes chaveadas, descrevendo as topologias utilizadas em conversores CC-CC de fontes chaveadas empregadas em *drivers* de lâmpadas LED, apresentando seus circuitos e principais componentes eletrônicos.

O quarto capítulo abordará redes neurais, dando ênfase aos métodos de classificação e de aprendizado supervisionado.

O quinto capítulo apresentará a metodologia do trabalho que será dividida em 2 partes. A primeira irá descrever os ensaios realizados em lâmpadas LED para a medição de parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia. A segunda abordará a viabilidade do trabalho apresentando o reconhecimento de padrões das diferentes topologias empregadas em lâmpadas LED através da NPRTOOL do MATLAB.

O sexto capítulo apresentará as análises dos resultados e no capítulo sete encontram-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. Fundamentação Teórica

Neste capítulo serão apresentados conceitos necessários para o entendimento de assuntos abordados no presente trabalho, onde realiza-se um breve contexto histórico sobre a evolução das tecnologias de iluminação, aspectos construtivos de diferentes tecnologias de lâmpadas, características de funcionamento de lâmpadas LED, parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia utilizados ao longo da dissertação. Além disso, serão mostradas as normas brasileiras utilizadas neste estudo, onde listam-se os limites de parâmetros de lâmpadas LED. As normas brasileiras vigentes que estabelecem os critérios de conformidade de produtos de iluminação de tecnologia LED, bem como, os órgãos que as regulamentam estão apresentados no Anexo A.

### 2.1 Lâmpadas LED

Segundo a *International Electrotechnical Commission* (IEC), LED é um dispositivo de estado sólido que incorpora uma junção p-n, emitindo radiação óptica quando excitado por uma corrente elétrica. A luz gerada a partir dos semicondutores se dá através da eletroluminescência que é um fenômeno em que o material emite luz quando uma corrente elétrica ou um campo elétrico passa por ele, onde os elétrons são capazes de se recombinar dentro do dispositivo, liberando energia na forma de fótons. Seu desempenho varia significativamente com a temperatura de operação do LED e da densidade de corrente elétrica. O desenvolvimento tecnológico do LED permitiu a aplicação de diodos emissores de luz à tecnologia de iluminação, tornando viáveis substituições em aplicações gerais de iluminação artificial, deixando de ser empregado apenas para fins que exigem luz de baixa intensidade como sinalizações e circuitos. Atualmente, os LEDs operam com eficiências de 220 lm/W, sob condições favoráveis. Como a tecnologia continua a evoluir, nos próximos anos a eficácia melhorará e os custos diminuirão [8].

As lâmpadas LED são consideradas o futuro da iluminação artificial devido ao avanço tecnológico e à procura para o atendimento da demanda de dispositivos de iluminação. A redução da comercialização de lâmpadas incandescentes no Brasil, devido ao não atendimento aos níveis mínimos de eficiência energética [9], impulsionou a disseminação da tecnologia LED que se tornou atrativa devido à sua eficiência e vida útil prolongada. De acordo com [8] o tempo

de vida útil da lâmpada LED equivale de 10 até 15 vezes o tempo de vida útil da lâmpada incandescente e o dobro do tempo de vida útil da lâmpada fluorescente e sua eficácia luminosa é de 4 até 6 vezes maior que a eficácia luminosa da lâmpada incandescente e até 2 vezes maior que a eficácia luminosa da lâmpada fluorescente. A lâmpada LED, em comparação com as lâmpadas incandescente e fluorescente, é mais resistente ao choque e à vibração, oferece melhor desempenho em ambientes operacionais frios, é instantânea e alguns modelos são reguláveis, além de apresentar consumo de energia inferior e tempo de vida útil superior às demais. As lâmpadas LED são encontradas em grande variedade de modelos no mercado de iluminação, dentre eles, as lâmpadas LED bulbo se destacam sendo geralmente aplicadas a residências substituindo as lâmpadas incandescentes e Lâmpadas Fluorescentes Compactas LFCs de potência até 20W.

As lâmpadas LED bulbo omnidirecionais de até 20W são constituídas por base, corpo, *driver*, LED *Printed Circuit Board* (PCB) e difusor. A Figura 3 ilustra uma lâmpada LED e seus componentes, de forma detalhada, onde é possível observar as partes que a constituem. A base é responsável pelo contato entre o receptáculo e o circuito de alimentação da lâmpada, o corpo da lâmpada serve de suporte para o *driver* e o LED PCB. O *driver* é composto por dispositivos eletrônicos e fornece níveis de tensão e corrente seguros aos *chips* de LED. Os *chips* de LED são arranjados em uma placa, de material que assume a função de dissipador de calor, que é chamada de LED PCB. O difusor é constituído de material plástico, de cor fosca, com a finalidade de distribuir a luz de forma uniforme e confortável aos olhos.

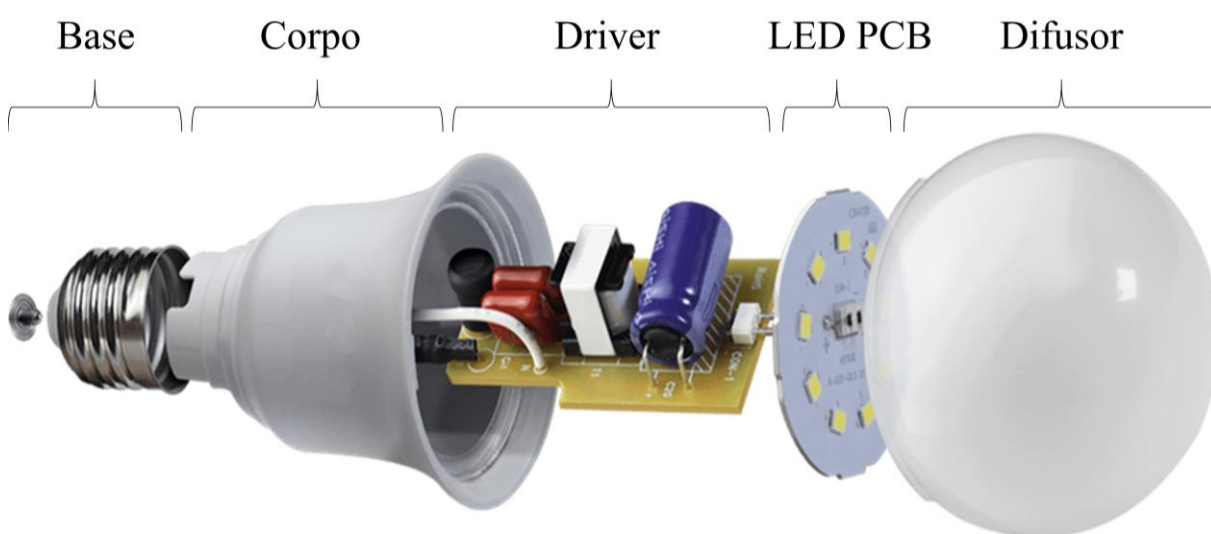


Figura 3 - Lâmpada LED e seus componentes.

Fonte: Adaptado de [10].

A classificação da base das lâmpadas LED bulbo omnidirecionais de até 20W é E27, onde a letra “E” faz referência a Thomas Edison e o número 27 corresponde ao diâmetro da base da lâmpada em milímetros. O formato de rosca da base permite a fixação da base ao receptáculo possibilitando o contato entre a rede e o dispositivo de controle e alimentação (*driver*). O corpo da lâmpada protege o *driver* e serve de suporte para o LED PCB e o difusor, garantindo o isolamento entre as partes energizadas da lâmpada e o meio externo. O dispositivo de controle e alimentação é essencial para as lâmpadas LED pois permite que os *chips* de LED, que exigem alimentação em Corrente Contínua (CC), funcionem de forma segura além de proporcionar a aplicabilidade do produto, tendo em vista que, na maioria dos casos, garante o funcionamento da lâmpada LED em níveis de tensão 127V e 220V. A operação dos *chips* de LED gera aquecimento que é prejudicial para a manutenção de fluxo luminoso e de vida útil dos *chips* de LED, portanto, o material utilizado nas placas onde os *chips* de LED são arranjados (LED PCB) deve contribuir para a dissipação de calor. O difusor é fixo ao corpo da lâmpada e é necessário para a eficácia da distribuição de luz de forma homogênea.

Impactos ambientais causados pelas lâmpadas LED e prováveis soluções estão sendo estudados. Segundo [8], permitir a coleta adequada de lâmpadas LED ao final do seu ciclo devido, que contém resíduos eletrônicos e outros componentes que precisam ser eliminados de forma consciente, bem como separar o fluxo de resíduos de lâmpadas LED, aumenta a taxa de recuperação de dispositivos eletrônicos e é uma possibilidade de contribuição para a redução de possíveis impactos ambientais. Além disso, aumentar a conscientização entre os consumidores sobre produtos de iluminação orienta suas decisões de compra e no momento do descarte.

## 2.2 Parâmetros luminotécnicos

Neste item serão apresentados definições e conceitos de alguns dos parâmetros luminotécnicos, necessários para o entendimento do texto. Os parâmetros apresentados são: Fluxo Luminoso, Eficácia Luminosa, Temperatura de Cor Correlata e Índice de Refração de Cor. A medição de tais parâmetros é efetuada a partir de dois equipamentos: esfera integradora e um detector denominado espectro-radiômetro, ilustrados na Figura 4. A estrutura esférica possui pintura reflexiva de cor branca em seu revestimento interno, contém uma haste com receptáculo para instalação fixa da lâmpada em seu interior e um rebatedor para evitar a

exposição direta de luz no detector pela fonte luminosa. O espectro-radiômetro realiza medição espectral de diferentes fontes de radiação em determinadas faixas de comprimentos de onda.



Figura 4 - Esfera integradora e espectro-radiômetro.

Fonte: [11].

### 2.2.1 Fluxo luminoso

O fluxo luminoso é representado pelo símbolo  $\Phi$  e é determinado a partir da potência radiante emitida por uma fonte de luz pontual em todas as direções entre o limite de comprimento de onda de 380nm e 780nm. Em outras palavras, é a quantidade de luz emitida por uma fonte luminosa e sua unidade no Sistema Internacional (SI) é o Lúmen (lm) e a representação gráfica deste parâmetro é mostrada na Figura 5. O lúmen pode ser definido como o fluxo luminoso emitido segundo um ângulo sólido de um esterradiano, por uma fonte puntiforme de intensidade invariável em todas as direções e igual a um candela [12]. A medição de fluxo luminoso utiliza uma lâmpada padrão, de fluxo luminoso conhecido, para realizar o cálculo de fluxo luminoso da lâmpada sob teste.

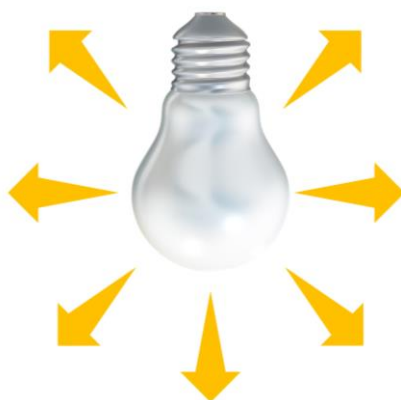


Figura 5 - Representação gráfica de fluxo luminoso.

Fonte: Autoria Própria.

### 2.2.2 Eficácia luminosa

É a relação entre o fluxo luminoso emitido e a potência consumida pela fonte luminosa [12], cuja unidade é o Lúmen por Watt, como é mostrado na Equação 1, onde FL é o fluxo luminoso e  $P_{con}$  é a potência consumida. A eficácia luminosa é um parâmetro importante para verificar o nível de eficácia da fonte de luz, indicando a quantidade de lúmens gerados por watts consumidos, portanto, quanto maior o número de lm/W, maior é a eficácia. As lâmpadas LED geralmente apresentam valores de eficácia luminosa aproximadamente entre 70 e 130 lm/W.

$$\text{Eficácia Luminosa} = \frac{FL}{P_{con}} \text{ (lm/W)} \quad (1)$$

### 2.2.3 Temperatura de cor correlata

As definições de Temperatura de Cor Correlata (TCC) e Temperatura de Cor por vezes se confundem. Seu conceito foi desenvolvido para mapear os espectros de fontes de luz que fogem às coordenadas de cromaticidade no locus de Planck, que não são bem definidos na escala de temperatura de cor. Já a temperatura de cor é a temperatura absoluta de um radiador de corpo negro com uma cromaticidade igual à da fonte de luz [13] que avalia a sensação de tonalidade de cor de uma fonte luminosa incandescente, cujas coordenadas atendem a cromaticidade no locus de Planck.

Os termos “branco quente” e “branco frio” são empregados comercialmente para classificar a temperatura de cor e é uma analogia ao fluxo de calor irradiado de uma fonte de luz incandescente, remetendo à percepção de tonalidade por temperatura. A unidade de TCC no SI é o Kelvin onde, quanto menor a TCC, mais amarelada é a tonalidade e quanto maior a TCC, mais azulada é a tonalidade, como pode ser observado na Figura 6, que retrata diferentes temperaturas de cor de acordo com a escala em graus Kelvin.



Figura 6 – Representação de temperatura de cor.

Fonte: Adaptado de [14].

As lâmpadas LED bulbo apresentam diferentes temperaturas de cor, variando aproximadamente entre 2.700K até 6.400K. Não há um método aprovado para a computação do valor de TCC, porém, o cálculo pode ser realizado a partir de uma aproximação de coordenadas no diagrama de cromaticidade. A Figura 7 mostra as coordenadas de uma fonte luminosa no diagrama de cromaticidade e foi obtida a partir de um ensaio, realizado no LABLUX, na UFF, em uma amostra de lâmpada LED. Através do diagrama de cromaticidade é possível verificar o limite de todas as cores visíveis e a localização da fonte de luz de acordo com as coordenadas XY.

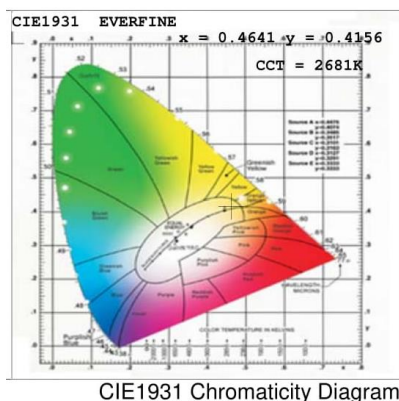


Figura 7 - Diagrama de cromaticidade.

Fonte: Imagem gerada pelo *software Everfine HaasSuit*.

## 2.2.4 Índice de reprodução de cor

Objetos idênticos, quando submetidos a fontes luminosas de diferentes valores de índice de reprodução de cor, podem aparentar diferentes tonalidades. O Índice de Reprodução de Cor (IRC ou Ra) é a medida do grau de deslocamento de cor sofrida por objetos quando iluminados por uma fonte de luz em comparação com a cor desses mesmos objetos quando iluminados por uma fonte de referência de temperatura de cor comparável [12]. É uma escala de reprodução de cor criada para avaliar o desempenho de outras fontes de luz em relação a um padrão que varia de 1 até 100. Quanto maior a diferença da tonalidade do objeto iluminado em comparação com a referência, menor o valor do IRC, onde o valor ideal é igual a 100, expressando maior fidelidade e precisão das cores dos objetos, como ilustrado na Figura 8. O método utilizado para realizar o cálculo do IRC é definido pela *International Commission on Illumination* (CIE) em “*Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Source*” (CIE,1995) e consiste em uma média entre valores de curvas espectrais.



Figura 8 - Representação índice de reprodução de cor.

Fonte: Adaptado de [14].

## 2.3 Parâmetros de qualidade de energia

Neste item serão apresentados definições e conceitos de alguns dos parâmetros de qualidade de energia, necessários para o entendimento deste trabalho. Os parâmetros apresentados são: Corrente Harmônica e Distorção Harmônica Total (DHT).

### 2.3.1 Corrente harmônica

O termo corrente harmônica é empregado quando a corrente contém frequências múltiplas da fundamental, apresentando forma de onda distorcida devido à presença de cargas não lineares na rede ocasionando o aumento de perdas, redução da eficiência do sistema e da vida útil de equipamentos. As correntes harmônicas são somadas à corrente na frequência fundamental e podem afetar negativamente instalações elétricas e equipamentos elétricos, ocasionando efeitos como perdas, superaquecimento, sobrecarga, entre outros. Por isso, é importante considerar seu impacto na rede elétrica e em equipamentos ao planejar um sistema [12].

### 2.3.2 Distorção harmônica total

A DHT é um parâmetro utilizado para quantificar o nível de harmônicos presente em formas de onda de tensão e corrente. Segundo [12], o conteúdo harmônico presente em uma forma de onda é comparado ao valor na frequência fundamental e a relação, expressa como uma

porcentagem do valor rms do sinal de Corrente Alternada (CA). Depois que a componente fundamental é removida e os componentes inter-harmônicos são ignorados para o valor eficaz da componente fundamental, pode ser observada na Equação 2, onde  $X_1$  é o valor da componente fundamental,  $X_n$  é o valor do conteúdo harmônico de ordem “n”. Lembrando que as variáveis “ $X_1$ ” e “ $X_n$ ” podem representar tensão ou corrente, e podem ser expressas como valores rms ou de pico, desde que todos sejam expressos da mesma maneira.

$$D_x = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} x_n^2}}{X_1} \times 100\% \quad (2)$$

## 2.4 Conclusão

No presente capítulo de título “Fundamentação Teórica” foram abordados temas relevantes ao entendimento deste estudo. O assunto inicial, acerca os aspectos construtivos de lâmpada LED, onde ficaram definidas as 5 partes que as constituem: base, corpo, *driver*, LED PCB e difusor. Além disso, também foram tratadas definições de parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia como fluxo luminoso, TCC, IRC, corrente harmônica e DHT, que serão abordados nos capítulos 5, 6 e 7 onde serão apresentadas metodologia, análise de resultados e conclusões, respectivamente.

### 3. Fontes Chaveadas

A fonte de alimentação assume um papel específico dentro de um sistema típico, fornecendo energia consistente para seu circuito. Neste capítulo serão apresentadas as fontes chaveadas e suas topologias, dando ênfase as topologias *buck* e *flyback*. Além disso, serão apresentados dispositivos supressores de efeitos indesejados, dispositivos de proteção e de correção de fator de potência, que podem influenciar nos parâmetros de qualidade de energia de lâmpadas LED. O capítulo inicia com uma breve contextualização das fontes chaveadas, seguido dos princípios de funcionamento das topologias *buck* e *flyback*, onde serão apresentados seus respectivos circuitos e principais aplicações. Na sequência serão abordadas as principais diferenças entre as topologias *buck* e *flyback*, os tipos de dispositivos que atuam como supressores de efeitos indesejados, dispositivos de proteção e de correção de fator de potência, utilizados nos *drivers* de lâmpadas LED, e por fim, a conclusão do capítulo.

#### 3.1 Contextualização

Fontes chaveadas podem ser definidas como conversores de corrente alternada em corrente contínua com regulação por chaveamento. São comumente utilizadas em sistemas eletrônicos devido à sua eficiência de conversão de energia superior com tamanho e peso menores em comparação com fontes de alimentação lineares. Apesar de suas vantagens, gera ruídos de alta frequência, causando problemas de interferência eletromagnética (*Electromagnetic interference* - EMI) [15]. Consomem pouca energia, de modo que sua eficiência, definida como a relação entre a potência de entrada e a de saída, pode chegar a 70–90%, duas vezes mais alta que a da fonte de alimentação regulada linear padrão [16]. As fontes chaveadas podem ser resumidas em duas partes. A primeira é a retificação, onde é feito o uso de um circuito retificador para converter a tensão CA em CC. A segunda é a regulação de tensão através de um conversor CC-CC, chaveado em alta frequência, que ajusta a tensão de saída, que pode ser maior ou menor que a tensão de entrada, dependendo do tipo de conversor empregado.

O conversor CC-CC é um regulador de tensão integrado com interruptor (*switch*), desenvolvido nas décadas de 1980 e 1990, que possui eficiência superior a 90% [16]. A maioria dos conversores CC-CC presentes em fontes chaveadas empregados em lâmpadas LED de

potência inferior a 20W fazem o uso das topologias *buck* e *flyback* para controlar o nível de tensão entregue aos *chips* de LED devido ao baixo custo de manufatura. A Figura 9 ilustra uma fonte chaveada de uma lâmpada LED e a representação dos circuitos CA e CC em blocos.

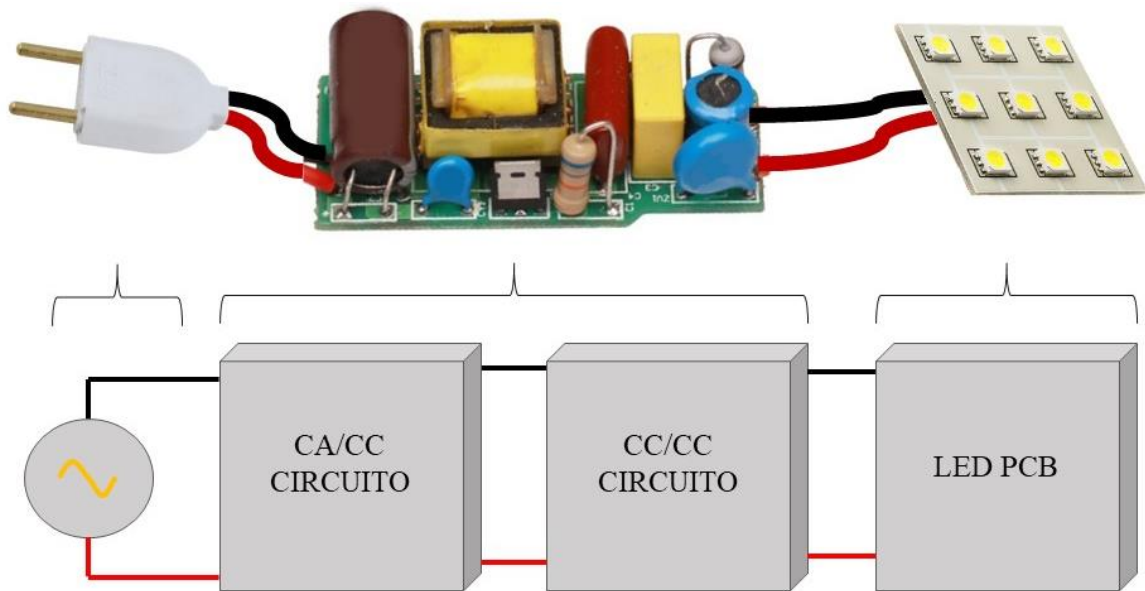


Figura 9 - Fontes chaveadas de lâmpadas LED.

Fonte: Autoria Própria.

### 3.2 Topologia *buck*

Segundo [16], o conversor *buck* é o conversor mais utilizado e o seu princípio básico é mostrado na Figura 16. Através deste tipo de conversor, pode-se converter uma tensão CC em um nível mais baixo, com pouca perda de energia durante a conversão. Além disso, é possível utilizar um MOSFET n-p-n como dispositivo de comutação *switch*, representado por S na Figura 10, fazendo com que a tensão de entrada conecte e desconecte alternadamente o indutor L de armazenamento de energia sob o controle do sinal *Pulse Width Modulation* (PWM).

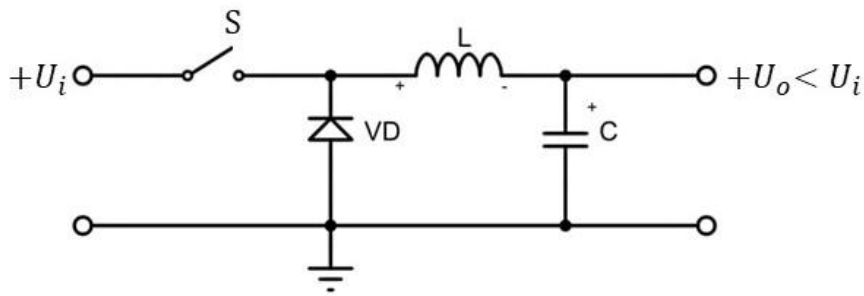


Figura 10 - Circuito do conversor CC-CC de topologia *buck*.

Fonte: Autoria Própria.

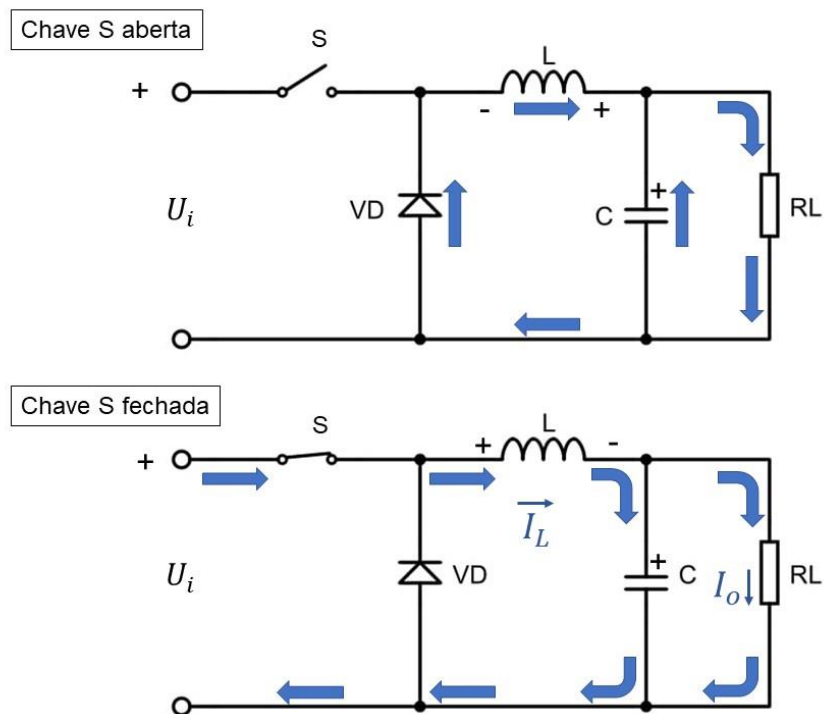


Figura 11 - Caminhos de corrente do conversor *buck*.

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 11 ilustra o circuito simplificado de regulação de tensão por chaveamento, que mostra os caminhos de corrente com o interruptor ligado e desligado. Quando a chave S é fechada, o diodo VD é cortado. Como a tensão de entrada  $U_i$  é conectada ao indutor L de armazenamento de energia, a diferença de tensão de entrada-saída ( $U_i - U_o$ ) é adicionada ao indutor L, aumentando linearmente a corrente  $I_L$  passando por L. Durante esse processo, a energia é fornecida à carga e parte da energia elétrica é armazenada no indutor L e no capacitor C. O esquema de corrente passando por  $R_L$  é  $I_o$ , ilustrado na Figura 11, é mostrado quando o

interruptor S está desligado, e o indutor L é desconectado com a  $U_i$ , mas como a corrente do indutor não pode mudar subitamente em um instante, a força contra eletromotriz é produzida no indutor L para manter a corrente constante passando pelo indutor. Neste momento, o diodo VD é conduzido, e a energia elétrica armazenada no indutor L é transmitida para a carga através do circuito constituído por VD para manter uma tensão de saída constante. Quando o *switch* está desligado, o capacitor C fornece energia para a carga, o que ajuda a manter  $U_o$  e  $I_o$  inalterados [16].

A expressão da tensão de saída do conversor *buck* é descrita na Equação 3, onde  $T$  é o ciclo e  $t$  é o tempo.

$$U_o = \frac{t}{T} U_i \quad (V) \quad (3)$$

O conversor *buck* possui quatro principais características que devem ser ressaltadas. O fato de o conversor reduzir apenas a tensão de entrada é uma delas. Se a tensão de entrada estiver abaixo da tensão de saída desejada, o conversor não funcionará. Outra é que pode funcionar nos modos contínuo e descontínuo, mas sua corrente de entrada é sempre descontínua. A terceira é que o conversor *buck* tem apenas uma saída. Além disso, quando o MOSFET está desligado, a corrente de entrada será reduzida a zero. Isso requer melhor desempenho do filtro de interferência eletromagnética de entrada (EMI) [16].

### 3.3 Topologia *flyback*

Segundo [16], o conversor *flyback* é uma das topologias isoladas mais básicas empregadas em conversores e fontes chaveadas, sendo utilizado em uma ampla variedade de aplicações. Produzem energia para a carga durante o corte do MOSFET e são desenvolvidos a partir do conversor *buck-boost*. A Figura 12 mostra o princípio básico do conversor *flyback*, onde  $U_i$  é a tensão de entrada de CC,  $U_o$  é a tensão de saída CC, T é o transformador de alta frequência, S refere-se ao *switch*, VD é o diodo retificador de saída e C, o capacitor do filtro de saída.

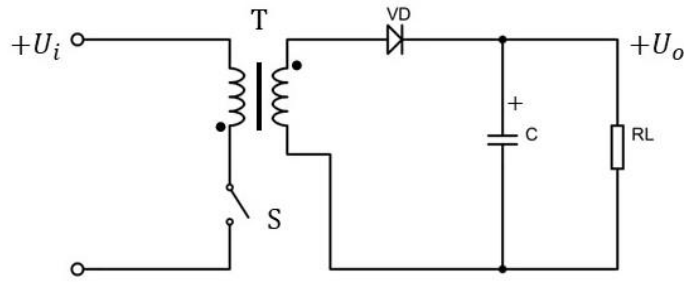


Figura 12 - Circuito do conversor CC-CC de topologia *flyback*.

Fonte: Autoria Própria.

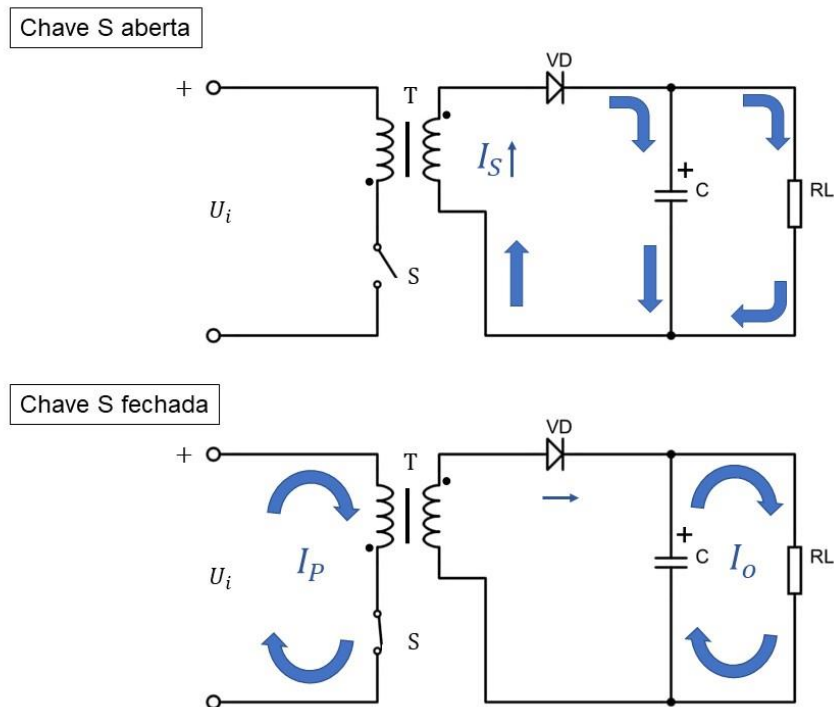


Figura 13 - Caminhos de corrente do conversor *flyback*.

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 13 ilustra o circuito simplificado de regulação de tensão por chaveamento, que mostra os caminhos de corrente com o interruptor ligado e desligado. Durante o semi-ciclo positivo do sinal PWM, a chave S está fechada e o  $I_P$  atual passa pelo lado primário para armazenar energia no enrolamento primário. Neste ponto, a tensão de saída do enrolamento secundário é negativa na extremidade superior e positiva na extremidade inferior em termos de polaridade, de modo que a VD é cortada e não tem saída. C fornece energia para a carga e a corrente de carga  $I_o$ . Durante o semi-ciclo negativo, a chave S é aberta e nenhuma corrente

passa pelo lado primário. A VD é conduzida e a tensão de saída é obtida após a retificação e filtragem passando por VD e C. Devido à alta frequência de comutação, a tensão de saída é mantida basicamente constante, conseguindo assim o propósito de regular a tensão [16].

A expressão de tensão de saída do conversor *flyback* é descrita na Equação 4, em que  $U_o/I_o$  refere-se à impedância de saída e  $L_p$  ao indutor do primário do conversor *flyback* e  $D$  é o ciclo de trabalho.

$$U_o = D \sqrt{\frac{TU_o}{2I_oL_p}} U_i \quad (V) \quad (4)$$

O conversor *flyback* possui diversas características, dentre elas, quatro se destacam. A primeira é que a tensão de saída pode ser menor ou maior que a tensão de entrada, dependendo da relação do transformador de alta frequência. A segunda, é que este tipo de conversor é capaz de funcionar em modos contínuos (a corrente do enrolamento secundário é sempre maior que zero) e descontínuo (a corrente do enrolamento secundário é reduzida a zero no final de cada ciclo de chaveamento). A terceira é que múltiplas saídas podem ser obtidas apenas adicionando o enrolamento secundário e os circuitos associados. A última é que os indutores que constituem o transformador do conversor *flyback* podem minimizar os impactos de efeitos de EMI. Portanto, dependendo do dimensionamento dos componentes empregados no conversor *flyback*, não existe a necessidade do uso de filtro EMI na entrada da fonte, como pode ser visto em [17].

### 3.4 Filtro EMI, dispositivos de proteção e correção de FP

Neste item serão discutidos os usos de dispositivos utilizados em fontes chaveadas para atuar na supressão de efeitos, como EMI, tensão transiente e na correção de fator de potência.

#### 3.4.1 Filtro EMI

O filtro EMI é um tipo de dispositivo que pode efetivamente suprimir o ruído da rede de energia e reduzir a interferência dos dispositivos eletrônicos melhorando a confiabilidade do sistema. É composto por capacitores, indutores e outros componentes, com as vantagens de estrutura simples e baixo custo, facilitando a aplicação e a popularização e, portanto, é

amplamente utilizado em fontes chaveadas [16]. Segundo [18], o filtro EMI é parte integrante de qualquer circuito de correção de fator de potência, suprimindo os harmônicos gerados pelo chaveamento, melhorando o fator de potência. Os conversores CC-CC, isolados ou não, geram interferência eletromagnética conduzida, que pode ser minimizada pelo uso de filtros passivos na entrada do circuito. O design de filtro EMI é descrito em [19] e não será apresentado no presente trabalho, pois foge do objetivo do trabalho.

De acordo com [18], [16] e [20], o uso de filtro EMI em conversores de topologia *buck* é recomendado devido ao fato da descontinuidade da corrente de entrada gerar altos níveis de EMI. De acordo com [17], o transformador presente no conversor *flyback* pode ser dimensionado de forma que não haja a necessidade da aplicação de filtro EMI, devido a atuação dos indutores que constituem o transformador, porém, as referências [21], [22] e [23] trazem exemplos de conversores de topologia *flyback* que fazem o uso de filtro EMI.

### 3.4.2 Correção de FP

Para evitar a redução do fator de potência e a distorção harmônica da rede devido ao uso de fontes chaveadas, a correção/compensação de fator de potência deve ser considerada. O circuito de correção do fator de potência, do termo em inglês *Power Factor Correction* (PFC) é utilizado para filtrar correntes harmônicas, aumentando o fator de potência do equipamento para um valor predeterminado próximo a 1. É exigido pelos padrões obrigatórios em [24] que o PFC deve ser adicionado entre o retificador de ponte do conversor de energia acima de 25W e o filtro de capacitor eletrolítico com grande capacidade.

O PFC pode ser dividido em PFC passivo, referido como *Passive Power Factor Correction* (PPFC) e PFC ativo, referido como *Active Power Factor Correction* (APFC). O circuito PPFC geralmente usa elementos passivos - indutores - para correção para reduzir a diferença de fase entre a corrente fundamental e a tensão da entrada CA para aumentar o fator de potência. O circuito APFC adiciona um circuito de conversão de energia entre o retificador da ponte de entrada e o capacitor do filtro de saída para corrigir a corrente de entrada para a onda sinusoidal de não distorção da mesma fase da tensão de entrada, tornando o fator de potência próximo de 1.

### 3.4.3 Supressor de tensão transiente

A tensão transiente é causada pela liberação repentina de energia elétrica armazenada em um tempo muito curto ou por uma grande indutância. O Supressor de Tensões Transientes, do termo em inglês *Transient Voltage Suppressor* (TVS) é um novo tipo de dispositivo de proteção contra sobretensão. A característica estrutural da TVS é que a junção p-n tem sua área de seção transversal maior do que a do diodo semicondutor convencional. Uma vez que a tensão transiente reversa ocorre, o TVS inicia a condução elétrica e suprime a tensão transiente.

O TVS pode ser usado como dispositivo de proteção de sobretensão transitória devido à sua resposta extremamente rápida, capaz de suportar grande potência de pulso de pico, tamanho reduzido e preço baixo. Segundo [16], TVS's podem ser utilizados para os circuitos de proteção de entrada da fonte de alimentação CA e CC, conectados em paralelo aos terminais de entrada e saída do transformador de isolação para absorver a energia do grande pulso transiente em direções positivas e negativas e fixar a tensão do circuito dentro uma faixa permitida, realizando assim proteção contra sobretensão, como ilustrado na Figura 14. Além disso, também pode ser aplicado a um circuito de proteção de entrada da fonte de alimentação CC, constituído por TVS unidirecional.

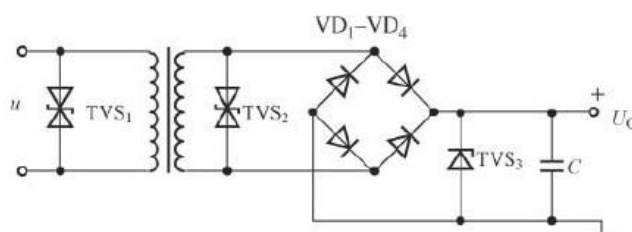


Figura 14 - Exemplo de aplicação de TVS em fontes chaveadas.

Fonte: [16].

### 3.4.4 Dispositivos de proteção

Os principais elementos de proteção, comumente utilizados em fontes chaveadas, podem ser resumidos em três, os fusíveis, os resistores fusíveis e os varistores.

O fusível é indispensável para quase todos os tipos de equipamentos eletrônicos. O fusível, apresenta baixo ponto de fusão, alta resistividade e velocidade de fusão rápida. Em circunstâncias normais, é usado para conectar o circuito de entrada na fonte chaveada. Em caso de sobrecarga ou falha de curto-circuito, ele será imediatamente fundido quando a corrente que passa por ele exceder a corrente de fusão para desconectar o circuito de entrada, realizando assim a proteção de sobrecorrente [16].

O resistor fusível tem a dupla função de resistor e fusível, equivalente a um pequeno resistor em operação normal. Quando a corrente aumenta para exceder a corrente de fusão devido à falha do circuito, o resistor fusível será queimado rapidamente para fornecer ao circuito e seus elementos uma proteção contra sobrecorrente. O resistor fusível é aplicável ao dispositivo de segurança da fonte de alimentação de baixa tensão e sua representação é ilustrada na Figura 15.

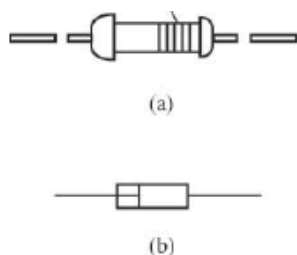


Figura 15 - Resistor fusível e sua representação.

Fonte: [16].

Varistor é um tipo de elemento de proteção contra sobretensão que apresenta ampla faixa de tensão de trabalho, resposta rápida a pulsos de sobretensão, preço baixo e tamanho pequeno e é ideal para ser usado como elemento de proteção e sua representação é ilustrada na Figura 16. Ele pode ser usado para constituir circuito de proteção contra sobretensão, circuito de proteção contra raios e circuito de absorção de tensão de surto [16].

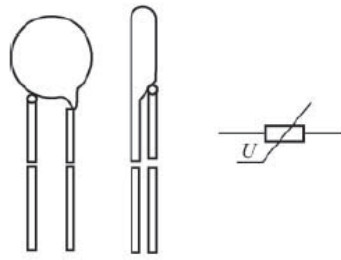


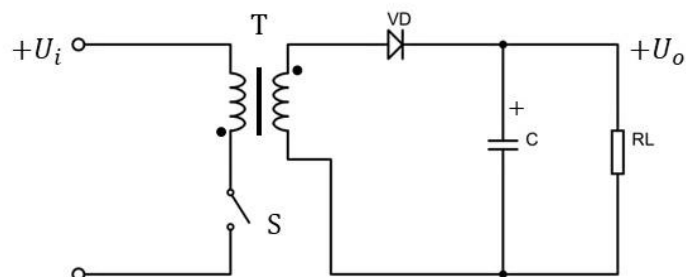
Figura 16 - Varistor e sua representação.

Fonte: [16].

### 3.5 Topologia *buck* versus topologia *flyback*

Os conversores CC-CC de topologias *buck* e *flyback* são amplamente empregados em fontes chaveadas. Este tópico irá abordar as principais diferenças entre os conversores de topologias *buck* e *flyback*. A Figura 17 ressalta as principais diferenças entre os circuitos.

Flyback



Buck

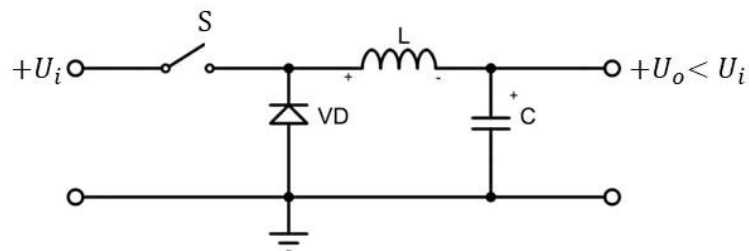


Figura 17 - Circuitos dos conversores CC-CC de topologias *buck* e *flyback*.

Fonte: Autoria Própria.

Os conversores *buck* são baratos, simples e muito comuns, embora não sejam adequados para aplicações em que o isolamento entre a fonte de alimentação e o circuito é necessário, sendo uma topologia indicada para fins que exigem a tensão de saída inferior à tensão de entrada. Outra característica do conversor *buck* é que requer apenas um indutor, e a desvantagem do seu uso é o elevado nível de EMI produzido por ele, resultante da corrente de entrada, que é sempre descontínua. Os conversores CC-CC de topologia *buck* são os mais comuns em fontes chaveadas de lâmpadas LED.

O conversor *flyback* tem sido amplamente utilizado devido ao baixo consumo, proporcionando simplicidade, robustez e isolamento [25]. Sua aplicação é indicada quando é necessário o isolamento e/ou tensão de saída variada, em lâmpadas LED que fazem o uso de *dimmer* para controlar o fluxo luminoso, por exemplo. Outra característica do conversor *flyback* é que possui dois indutores como transformador, que podem contribuir com a redução da influência de EMI e a melhora do fator de potência. A desvantagem do seu uso é o custo elevado, quando comparado com a topologia *buck*, e por isso, o emprego deste tipo de conversor CC-CC é menos comum em fontes chaveadas de lâmpadas LED.

A Tabela 1 ressalta as principais características dos conversores *buck* e *flyback* vistas no presente capítulo, como função de transferência, o isolamento do circuito, a necessidade do uso de filtro EMI, o funcionamento em modos contínuo e descontínuo, a capacidade de permitir múltiplas saídas e a condição da tensão de entrada. A função de transferência é obtida através das Equações 3 e 4.

Tabela 1 – Principais diferenças entre as topologias *buck* e *flyback*.

|                                                 | <b><i>Buck</i></b>                  | <b><i>Flyback</i></b>                             |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Função de Transferência:</b>                 | $\frac{U_o}{U_i} = \frac{t}{T} = D$ | $\frac{U_o}{U_i} = D \sqrt{\frac{TU_o}{2I_oL_P}}$ |
| <b>O circuito é isolado?</b>                    | Não                                 | Sim                                               |
| <b>É necessário o uso de filtro EMI?</b>        | Sim                                 | Depende                                           |
| <b>Funciona em modo contínuo e descontínuo?</b> | Sim                                 | Sim                                               |
| <b>Permite múltiplas saídas?</b>                | Não                                 | Sim                                               |
| $U_o < U_i$ ?                                   | Sim                                 | Depende                                           |
| <b>Custo:</b>                                   | Baixo                               | Alto                                              |

### 3.6 Conclusão

No presente capítulo de título “Fontes Chaveadas” foi realizada, inicialmente, uma contextualização acerca de fontes chaveadas, onde sua definição, constituição e aplicações foram comentadas. Na sequência as topologias *buck* e *flyback* de conversores CC-CC foram abordadas e as diferenças entre as topologias foram ressaltadas, onde foi possível observar que o conversor *buck* não é isolado e o conversor *flyback* é isolado e que a característica construtiva de cada conversor pode fazer com que o uso de filtro EMI seja necessário, no caso do conversor *buck* e opcional no caso do conversor *flyback*. Outro tópico presente no capítulo, a respeito de filtros EMI, define aplicações e traz referências de trabalhos onde o filtro EMI foi utilizado e outras em que o uso não se fez necessário. O capítulo traz uma abordagem ao assunto fontes chaveadas direcionando o leitor a aplicação em lâmpadas LED, necessário para o entendimento do presente trabalho.

## 4. Redes Neurais Artificiais

Redes Neurais Artificiais (RNA's) são ferramentas que obtiveram sucesso em aplicações de problemas que não podem ser tratados adequadamente pelas técnicas estatísticas convencionais. Este capítulo é dedicado aos conceitos introdutórios e teóricos de RNA's, com ênfase em aprendizado supervisionado, fornecendo o conteúdo necessário para o entendimento do trabalho e apresentando uma breve contextualização sobre Inteligência Artificial (IA) e Inteligência Computacional (IC). Na sequência, é abordada a história das RNA's, a modelagem de neurônios artificiais, as características de arquiteturas de redes, os algoritmos de aprendizado, o treinamento de redes *feedforward*, as principais aplicações de RNA's e alguns exemplos de aplicação, finalizando com uma breve conclusão sobre o assunto.

### 4.1 Inteligência artificial e inteligência computacional

A relação entre IA e IC é controversa pois ambas são campos que abrangem uma grande variedade de subgrupos e, por vezes, seus conceitos se confundem devido a forma como o assunto é reportado. Por isso, é importante definir a IA e a IC para situar cada grupo e posicionar o tema RNA da forma adequada. Inteligência artificial é uma teoria cujo seu objetivo é “automatizar as atividades associadas ao pensamento humano, como a tomada de decisões, a resolução de problemas, o aprendizado ...” [26] e pode ser definida como “a simulação da inteligência humana em uma máquina, de modo a tornar a máquina eficiente para identificar e usar a peça certa de "conhecimento" [26] em uma determinada etapa da solução de um problema.”. Dois tipos de metodologia se tornaram dominantes em IA. A primeira está preocupada apenas com conjuntos de regras e sua ativação e a segunda diz respeito à problemas mais gerais da organização do conhecimento, além de uma necessidade de cooperação entre várias fontes de conhecimento de maneira sinérgica [27].

Segundo [28], o IEEE *Computational Intelligence Society*, IC é a teoria, projeto, aplicação e desenvolvimento de paradigmas computacionais biologicamente e linguisticamente motivados, que pode ser dividida em três pilares que são as Redes Neurais, os Sistemas Difusos e a Computação Evolucionária. Usando o cérebro humano como fonte de inspiração, as RNA's são redes massivamente distribuídas paralelamente que têm a capacidade de aprender e generalizar a partir de exemplos. Esta área de pesquisa inclui RNA's *feedforward*, RNA's

recorrentes, RNA's auto-organizáveis, aprendizagem profunda, redes neurais convolucionais, dentre outras. Os Sistemas Difusos utilizam a linguagem humana como fonte de inspiração, modelando a imprecisão linguística e resolvendo problemas incertos baseados na generalização da lógica tradicional, o que nos permite realizar um raciocínio aproximado. Utilizando a evolução biológica como fonte de inspiração, a computação evolucionária resolve problemas de otimização, gerando, avaliando e modificando uma população de possíveis soluções.

## 4.2 História das redes neurais artificiais

A história das RNA's progrediu através de inovações conceituais e desenvolvimentos de implementação. Alguns dos trabalhos de base para o campo das redes neurais ocorreram no século XX. O trabalho foi conduzido por muitos cientistas famosos das áreas de física, psicologia e neurofisiologia. Nessa etapa, a pesquisa de redes neurais enfatizava teorias gerais de aprendizagem, visão, condicionamento e assim por diante, e não incluía modelos matemáticos específicos da operação dos neurônios. A visão moderna das redes neurais começou na década de 1940 com o trabalho de Warren McCulloch e Walter Pitts, que mostraram que redes de neurônios artificiais poderiam, em princípio, computar qualquer função aritmética ou lógica. Então, os cientistas propuseram um mecanismo para aprender em neurônios biológicos [29].

A primeira aplicação prática de redes neurais surgiu no final da década de 1950, com a invenção da rede *perceptron* e a regra de aprendizagem associada [30]. Em 1959, Bernard Widrow e Marcian Hoff, de Stanford, desenvolveram modelos que denominaram *adaline* e *madaline*. *Madaline* foi a primeira rede neural a ser aplicada a um problema do mundo real [31]. Em 1969, Minsky e Papert causaram um grande revés para a pesquisa de RNA's com o livro *Perceptrons*, em que concluíram que a extensão de *perceptrons* simples a *perceptrons* multicamadas é limitada. Isso fez com que as pesquisas na área entrassem em hibernação até meados dos anos 80 e durante este período, alguns pesquisadores continuaram seus esforços de pesquisa [29].

O retorno da pesquisa de RNA's surgiu com publicações importantes de Hopfield, Hinton e Rumelhart e McLelland no início e meados da década de 1980. A partir do final da década de 1980, a pesquisa na Carolina do Norte começou a explodir e hoje é uma das maiores áreas de pesquisa em Ciência da Computação [29]. Muitos dos avanços das RNA's tiveram a

ver com novos conceitos, como arquiteturas e regras de treinamento inovadoras, assim como a disponibilidade de computadores eficientes para testar esses novos conceitos [32]. Portanto, o desenvolvimento da tecnologia das RNA's está atrelado ao desenvolvimento de hardware, devido à necessidade de capacidade de processamento das redes neurais.

### 4.3 Modelagem de neurônio artificial

O cérebro humano consiste em um grande número de elementos altamente conectados, aproximadamente 104 conexões por elemento, chamados neurônios [32] que possuem três componentes principais: os dendritos, o corpo celular e o axônio. Os dendritos são redes receptivas, semelhantes a árvores, de fibras nervosas que transportam sinais elétricos para o corpo celular. O corpo celular efetivamente computa e limita esses sinais de entrada. O axônio é uma única fibra longa que transporta o sinal do corpo celular para outros neurônios. O ponto de contato entre um axônio de uma célula e um dendrito de outra célula é chamado de sinapse. É o arranjo dos neurônios e as forças das sinapses individuais, determinadas por um processo químico complexo, que estabelece a função da rede neural. A Figura 18 mostra um diagrama esquemático simplificado de dois neurônios biológicos [29].

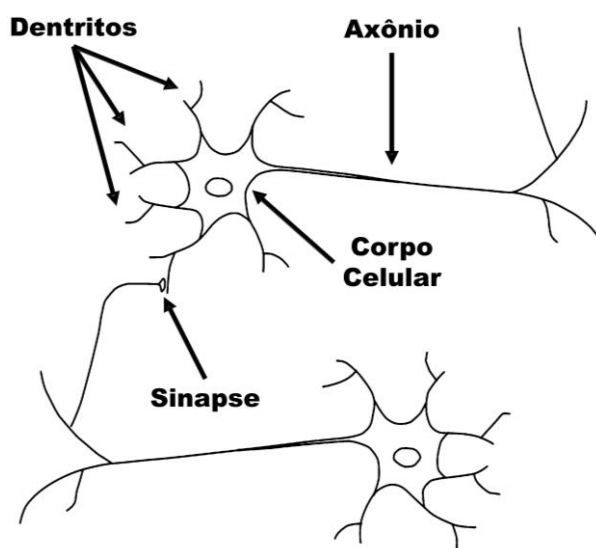


Figura 18 - Diagrama esquemático de dois neurônios biológicos.

Fonte: Adaptado de [32].

As redes neurais artificiais são compostas de elementos inspirados nos sistemas nervosos biológicos. Como na natureza, a função de rede é determinada em grande parte pelas

conexões entre os elementos [33]. É sabido que todas as funções neurais biológicas, incluindo a memória, são armazenadas nos neurônios e nas conexões entre eles. A aprendizagem é vista como o estabelecimento de novas conexões entre os neurônios ou a modificação das conexões existentes. Embora retenham apenas uma compreensão rudimentar das redes neurais biológicas, é possível construir um pequeno conjunto de neurônios artificiais simples e depois treiná-los para servir uma função útil, e isso é feito usando redes neurais artificiais, comumente chamadas de redes neurais, que foram motivadas pelo reconhecimento de que o cérebro humano computa de uma maneira totalmente diferente do computador digital convencional [29].

Em redes neurais, um grafo de fluxo de sinal é frequentemente utilizado para fornecer uma descrição completa do fluxo de sinal em uma rede. Um grafo de fluxo de sinal é uma rede de links direcionados que são interconectados em determinados pontos chamados nós, abstrações matemáticas simplificadas do funcionamento básico de neurônios [29]. A Figura 19 mostra a representação de um neurônio artificial sem polarização externa, rotulado como uma função ( $f$ ). O nó tem entrada correspondente aos dendritos de um neurônio e saída correspondente ao axônio de um neurônio [34]. A entrada escalar ( $E$ ) é transmitida através de uma conexão que multiplica sua força pelo peso escalar ( $P$ ), para formar o produto  $EP$ , novamente um escalar. Na Figura 19, a entrada ponderada  $EP$  é o único argumento da função de transferência  $f$ , que produz a saída escalar  $S$ , descrita pela Equação 5.

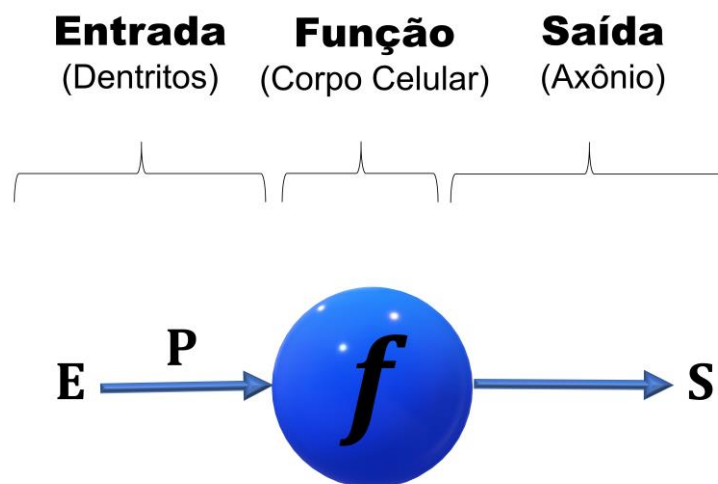


Figura 19 - Diagrama esquemático um neurônio artificial sem *bias*.

Fonte: Autoria Própria.

$$S = f(EP) \quad (5)$$

Outro método de expressão que também pode ser utilizado para representar uma rede é chamado de gráfico de arquitetura ilustrado na Figura 20, que mostra um vetor de entrada de um neurônio, também chamado de *perceptron*, possui um *bias* escalar ( $B$ ) que é adicionado ao produto  $E_x P_x$ , onde  $x = 1, 2, \dots, n$ . O *bias* é um parâmetro muito parecido com um peso, exceto que ele tem uma entrada constante de 1 e pode ser chamado de “vetor de polarização”, pois é um parâmetro ajustável do neurônio que impulsiona a polarização e que pode ser omitido, caso necessário [33]. Em outras palavras, especifica o nível de ativação inata de um nó antes que qualquer outra entrada seja recebida [34]. A função de transferência obtida ( $\Sigma$ ), é a soma da entrada ponderada  $E_x P_x$  e do *bias*  $B$ . Essa soma é o argumento da função de transferência  $f$ , que pega o argumento obtido no somatório e produz a saída  $S$ , descrita na Equação 6. Existem três tipos de função de transferência mais utilizadas: a Linear, a *Hard-Limit*, e a Sigmóide. A linear calcula a saída do neurônio aplicando uma relação linear. A saída *Hard-Limit* limita a saída do neurônio a 0, se o argumento de entrada for menor que 0; ou 1, se for maior ou igual a 0. A saída sigmoide recebe a entrada, que pode ter qualquer valor entre mais e menos infinito, e reduz a saída no intervalo de 0 a 1 [33].

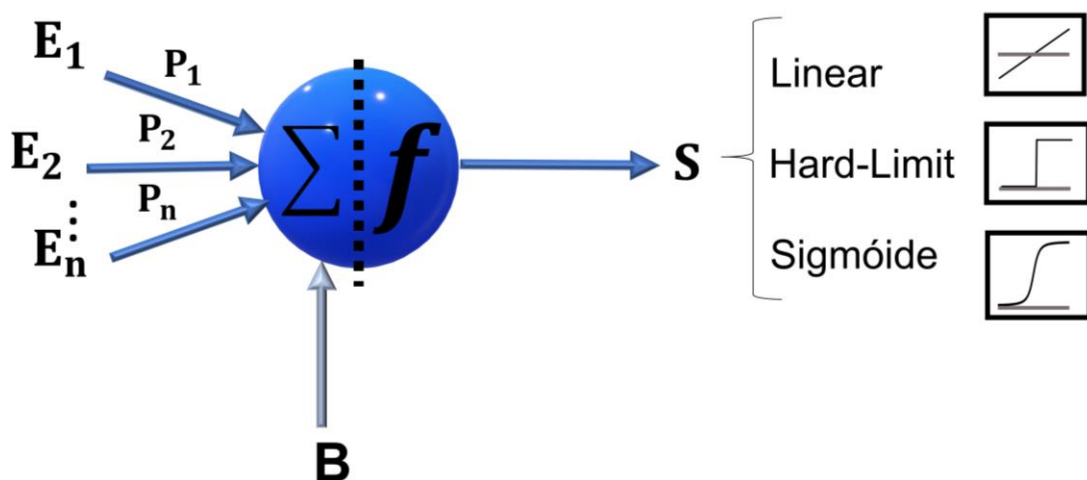


Figura 20 - Diagrama esquemático um neurônio artificial com *bias*.

Fonte: Autoria Própria.

$$S = f(E_x P_x + B) \quad (6)$$

Redes neurais artificiais não se aproximam da complexidade do cérebro. No entanto, existem duas semelhanças principais entre as redes neurais biológicas e as redes neurais artificiais. A primeira é que os blocos de construção de ambas as redes são dispositivos computacionais simples (embora os neurônios artificiais sejam muito mais simples que os

neurônios biológicos), altamente interconectados. A segunda é que as conexões entre os neurônios determinam a função da rede [29]. A ideia central das redes neurais é que tais parâmetros possam ser ajustados de modo que a rede exiba algum comportamento desejado. Assim, é possível treinar a rede para fazer um trabalho específico, ajustando os parâmetros de ponderação ou *bias*, ou talvez a própria rede ajuste esses parâmetros para alcançar algum objetivo desejado [33].

## 4.4 Arquiteturas de rede

Uma RNA pode ser caracterizada por um grupo de unidades de interação (nós, neurônios) com conexões ajustáveis (pesos) entre elas, onde dois ou mais neurônios podem ser combinados em uma ou mais camadas conectadas, em que os neurônios recebem um vetor de entrada e fornecem um vetor de saída, ou parte desses neurônios recebe um vetor de entrada, outra parte fornece o vetor de saída e os demais neurônios estão contidos em camadas ocultas, que são definidas como neurônios que não recebem entradas e que não produzem saídas. Dois tipos de arquitetura de rede serão descritos neste item, as de camada única e as de múltiplas camadas.

A definição de RNA de camada única é, de acordo com [34], “uma rede neural na qual os nós de entrada se conectam diretamente aos nós de saída por meio de uma única camada de pesos associativos.” e é limitada à classificação de padrões linearmente separáveis [29]. Uma RNA de camada única é caracterizada por um número  $n$  de elementos  $E$  no vetor de entrada e um número  $m$  de neurônios em sua camada única, com seus respectivos *bias*, representados por  $B$ , como pode ser visto na Figura 21. Nessa rede, cada elemento do vetor de entrada é conectado a todas as entradas de neurônios, através de uma matriz ponderada  $P$ , que produzem um vetor de  $m$  saídas representadas por  $S$ .

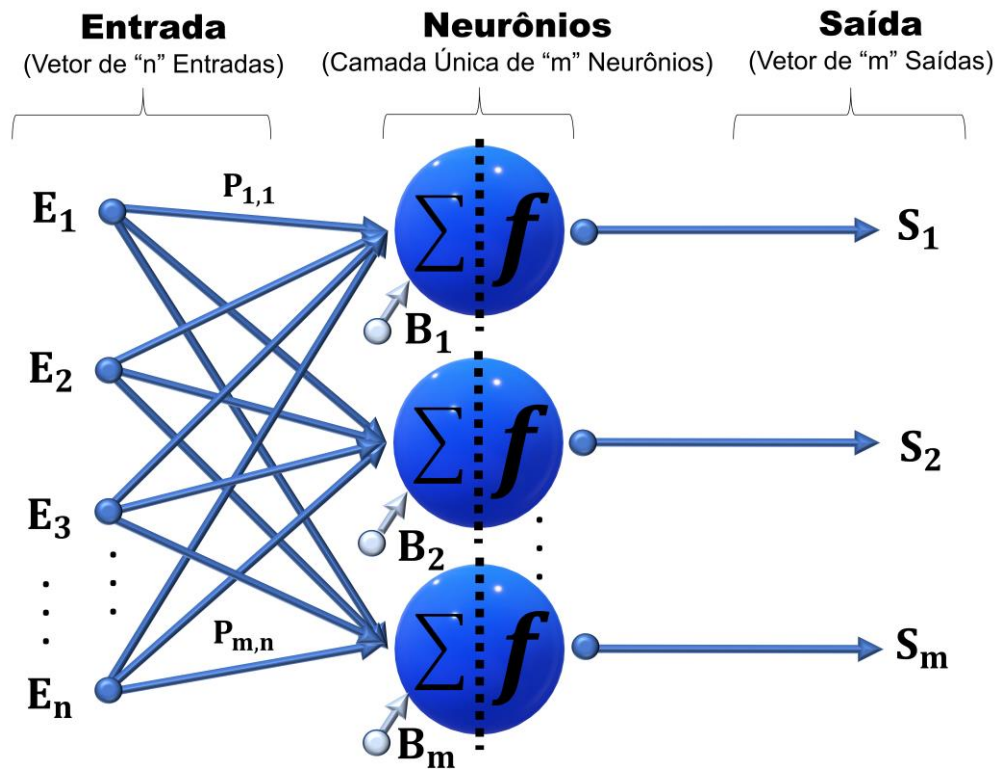


Figura 21 - RNA de camada única.

Fonte: Autoria Própria.

Uma RNA de múltiplas camadas é, de acordo com [35], “uma rede neural com pelo menos uma camada interna de nós entre as camadas do nó de entrada e saída.”, e é caracterizada por um alto grau de conectividade, onde as saídas de cada neurônio posicionado em uma camada oculta, são as entradas dos neurônios inseridos na camada seguinte. O gráfico arquitetural de uma RNA multicamadas com  $c$  camadas ocultas, compostas de  $m$  neurônios, uma matriz ponderada  $SP$  e um vetor de polarização  $B$  é mostrado na Figura 22, onde o vetor de entrada  $E$  contém  $n$  elementos e uma matriz ponderada  $P$ . Por fim, a última camada, a camada de saída  $c$  fornece um vetor  $S$ .

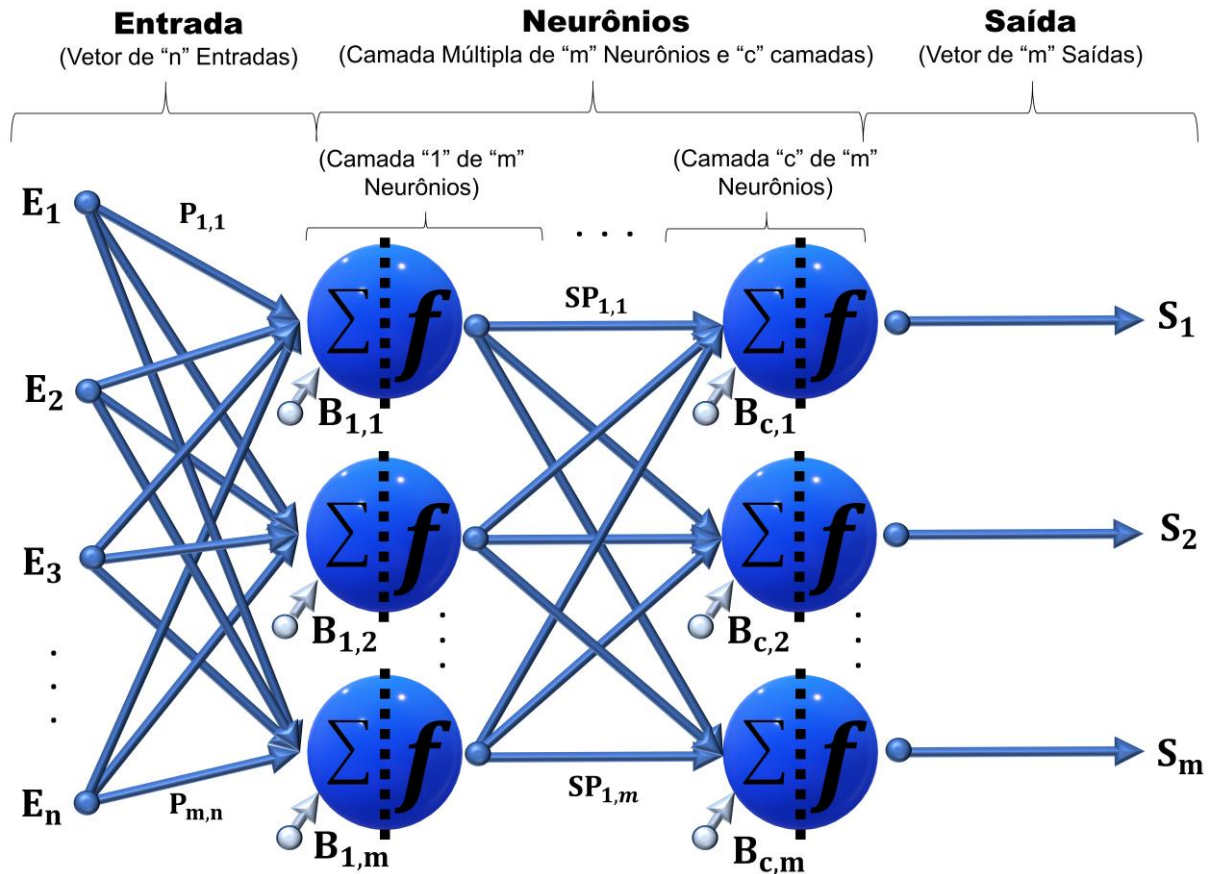


Figura 22 - RNA de múltiplas camadas.

Fonte: Autoria Própria.

Uma arquitetura de RNA de múltiplas camadas é comumente chamada de *feedforward* devido ao fato de o fluxo de informação seguir o mesmo sentido desde a entrada até a saída e são caracterizadas por possuírem uma ou mais camadas ocultas de neurônios de funções sigmóides. Múltiplas camadas de neurônios com funções de transferência não-linear permitem que a rede aprenda relacionamentos não-lineares e lineares entre vetores de entrada e saída. Esta rede pode ser usada como um aproximador de função geral, acercando qualquer função com um número finito de descontinuidades, arbitrariamente bem, dados neurônios suficientes na camada oculta [33].

As definições dos números de neurônios da camada oculta e de camadas ocultas da RNA podem impactar na aproximação da resposta gerada pela RNA de múltiplas camadas, e por consequência, no aprendizado, mas não existe uma regra para determinar o número de neurônios da camada oculta de uma RNA. Segundo [35], os valores ideais para esses parâmetros são geralmente diferentes para cada tarefa e, portanto, devem ser escolhidos e ajustados à mão

(por tentativa), porém, o número de neurônios contidos na camada oculta pode ser obtido através de um estudo de estabilidade do sistema de malha fechada e os limites de erro das RNA's. No presente trabalho, o número de neurônios da camada oculta, bem como o número de camadas ocultas, foi definido através de tentativas, e será detalhado no Capítulo 5.

## 4.5 Algoritmos de aprendizagem

Define-se um algoritmo de aprendizagem como um procedimento para modificar os pesos e os *bias* de uma rede e é aplicado para treinar a rede adaptando a resposta com base na experiência. O treinamento de uma rede neural é realizado para executar uma função específica, ajustando os valores das conexões, ou pesos, entre os elementos. Geralmente, as redes neurais são ajustadas ou treinadas, de modo que uma determinada entrada leva a uma saída desejada. A rede é ajustada, com base em uma comparação entre a saída e o destino, até que a saída da rede corresponda ao valor desejado [33]. As regras de aprendizado se dividem em três categorias: aprendizado supervisionado, aprendizado não supervisionado e aprendizado por reforço.

De acordo com [34], aprendizado supervisionado é o método preditivo em que um sistema externo monitora a resposta e gera uma medida de erro, que pode ser usada para orientar a aprendizagem. A regra é fornecida com um conjunto de exemplos do comportamento de rede adequado, provendo a entrada para a rede e a saída correta de destino correspondente. À medida que as entradas são aplicadas à rede, as saídas da rede são comparadas às metas. A regra de aprendizado é então usada para ajustar os pesos e *bias* da rede, a fim de mover as saídas da rede para mais perto dos alvos [33]. Portanto, no aprendizado supervisionado, exemplos de cada classe de interesse são apresentados e a tarefa é encontrar uma função de mapeamento de tal forma que quando novos exemplos de cada classe são observados, eles serão classificados corretamente, ou seja, atribuídos à classe apropriada. A medida de eficácia na classificação diz respeito aos pagamentos por classificações corretas e aos custos dos erros [29]. São exemplos de aprendizado supervisionado a retropropagação de erro e a regra de Widrow-Hoff, empregados em problemas de classificação e regressão, mostrados na Figura 23.

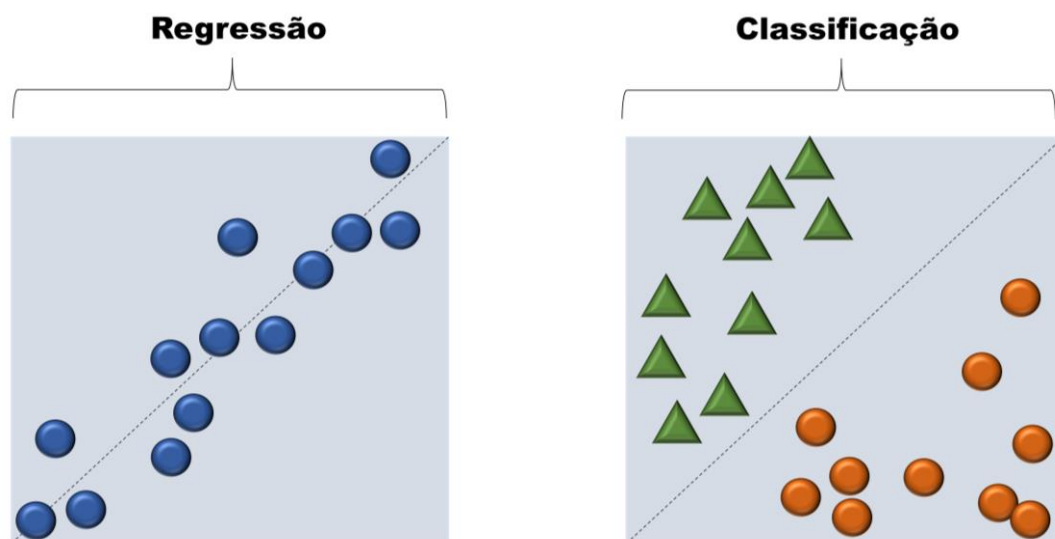


Figura 23 - Exemplos de problemas de regressão e classificação.

Fonte: Autoria Própria.

Aprendizagem não supervisionada é um método descritivo em que não há sistema externo para avaliar o desempenho; em vez disso, o sistema pode desenvolver sua própria estratégia para representar informações [34], onde os pesos e *bias* são modificados em resposta apenas às entradas de rede e não há saídas de destino disponíveis. A maioria desses algoritmos executa operações de agrupamento e redução de dimensionalidade, e categorizam os padrões de entrada em um número finito de classes [33]. Já o aprendizado por reforço é baseado na noção de que, se uma ação é seguida por um estado satisfatório, ou por uma melhoria no estado de coisas, então a tendência para produzir essa ação deve ser fortalecida, reforçada [35].

Os três tipos de aprendizagem estão inseridos dentro do contexto de Aprendizado de Máquina, que é a área das redes neurais em que estuda os métodos de aprendizagem. No entanto, os aprendizados, não supervisionado e por reforço, não serão abordados neste estudo. Em resumo, foram apresentados três tipos de técnicas de aprendizado que enriquecem as opções que um usuário pode fazer de acordo com a necessidade exigida por uma determinada aplicação. Dentre elas, o aprendizado supervisionado, que difere dos demais pois as entradas e saídas são conhecidas, possibilitando a previsão de saídas de futuras entradas. Porém, o esforço computacional necessário para encontrar a combinação correta de pesos cresce substancialmente, quanto maior a quantidade de parâmetros, maior é o esforço computacional. Por isso, o algoritmo empregado na fase de treinamento é essencial para a eficácia da rede

neural. Posteriormente, no item 4.6, uma abordagem conhecida como algoritmo de retropropagação de erros será apresentada.

## 4.6 Treinamento

RNA's de arquitetura *feedforward* e aprendizagem supervisionada empregam o algoritmo de nome retropropagação na fase de treinamento, em que aproximação de uma função é calculada, ajustando os pesos, minimizando o erro. As etapas de treinamento são descritas em [31] e podem ser resumidas como: o cálculo dos valores de saída da camada escondida, a partir do vetor de entrada; o cálculo das respostas dos elementos da camada de saída; o cálculo dos sinais de erro da camada de saída, utilizando o vetor de saída desejado; o cálculo dos sinais de erro da camada escondida; o acúmulo do gradiente; a atualização dos pesos; o cálculo da função objetivo; até que seja atingido o critério de convergência [36].

Considerando a Figura 24, onde o neurônio  $j$  é alimentado por um conjunto de sinais de função produzidos por uma camada de neurônios à sua esquerda. O campo local induzido  $v_j(k)$  produzido na entrada da função de ativação associada ao neurônio  $j$  é descrito na Equação 7.

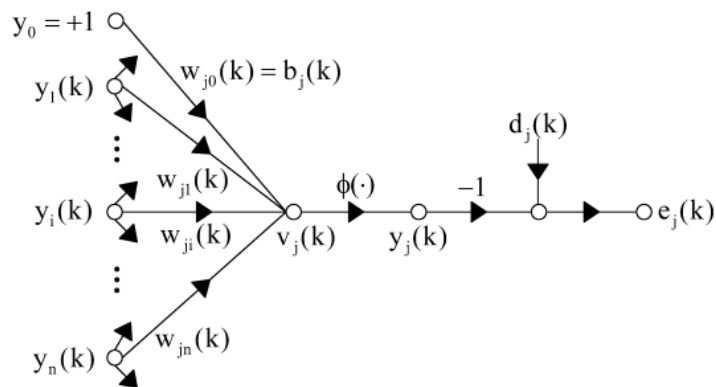


Figura 24 - Fluxo de sinais os ressaltando os detalhes do neurônio de saída  $j$ .

Fonte: [33].

$$v_j(k) = \sum_{i=0}^n w_{ji}(k) y_i(k) \quad (7)$$

Onde  $n$  é número total de entradas, com exceção dos *bias*, aplicados ao neurônio  $j$ . O peso sináptico  $w_{j0}$  relata a entrada fixa  $y_0 = +1$  igual ao *bias*  $b_j$  aplicado ao neurônio  $j$ .

O sinal  $y_j(k)$  aparece na saída do neurônio  $j$  na iteração  $k$ , que é descrito na Equação 8, onde a função  $\phi_j$  é denominada função de ativação do neurônio.

$$y_j(k) = \phi_j(v_j(k)) \quad (8)$$

O gradiente local  $\delta_j(k)$ , que aponta para as modificações necessárias nos pesos sinápticos, é definido pela Equação 9 para o neurônio de saída  $j$ , e é igual ao produto do sinal de erro ( $e_j(k)$ ) correspondente para o neurônio e a derivada da função de ativação associada  $\phi_j'(v_j(k))$ .

$$\delta_j(k) = e_j(k)\phi_j'(v_j(k)) \quad (9)$$

O algoritmo de retropropagação de erro aplica a correção  $\Delta w_{ji}(k)$  ao peso sináptico  $w_{ji}$ , tendo como base a direção oposta do gradiente local da superfície de erro relativo ao peso sináptico. Há dois casos a serem considerados para calculá-lo de acordo com a localização do neurônio  $j$ : o neurônio  $j$  em uma camada de saída e o neurônio  $j$  em uma camada oculta. Os cálculos para o neurônio  $j$  são detalhados em [31]. Na correção aplicada ao peso sináptico ligando o neurônio  $i$  ao neurônio  $j$  usa-se  $e_j(k)\phi_j'(v_j(k))$ , quando o neurônio  $j$  pertence a uma camada de saída e  $\phi_j'(v_j(k))\sum_j(\delta_j(k)w_{1j}(k))$ , quando o neurônio  $j$  pertence a uma camada oculta, como pode ser visto na Equação 10.

$$\Delta w_{ji}(k) = \begin{cases} e_j(k)\phi_j'(v_j(k)), & \text{neurônio } j \text{ em uma camada de saída} \\ \phi_j'(v_j(k))\sum_j(\delta_j(k)w_{1j}(k)), & \text{neurônio } j \text{ em uma camada oculta} \end{cases} \quad (10)$$

De acordo com a Equação 10, o fator chave envolvido no cálculo do ajuste dos pesos  $\Delta w_{ji}(k)$  é o sinal de erro  $e_j(k)$  na saída do neurônio  $j$ .

## 4.7 Aplicações

As RNA's podem ser aplicadas para diversos fins, a Figura 25 os ilustra e os classifica através dos três tipos de arquiteturas de rede apresentadas neste capítulo, os aprendizados: supervisionado, não supervisionado e por reforço. A principal característica de problemas de classificação é o estabelecimento de padrões. São exemplos de problemas de classificação: diagnósticos de doenças [37] e detecção de fraudes [38]. Já nos problemas de regressão deseja-

se prever o próximo valor de uma série temporal com base em uma visão geral e tem como exemplos problemas como a previsão do tempo [39] e a otimização de processos [40].



Figura 25 - O aprendizado de máquina e suas aplicações.

Fonte: Autoria Própria.

O aprendizado não supervisionado permite a solução de problemas de agrupamento e de redução de dimensionalidade. A principal característica do agrupamento é a segmentação de dados em um ou mais conjuntos e os principais exemplos são os marketings direcionados, exibidos em anúncios [41], e a segmentação de clientes [42]. A redução de dimensionalidade é o processo de reduzir o número de variáveis aleatórias sob consideração, obtendo um conjunto de variáveis principais. Auxilia em problemas relacionados a recursos de *Elicitation* [43], [44] (coleta de dados relacionados a inteligência humana) e visualização de *Big Data* [45] (conjuntos de dados extremamente grandes). O aprendizado por reforço tem como principal característica permitir o aprendizado por tentativa e erro usando o feedback de suas próprias ações e experiências, permite a solução de problemas como a aquisição de habilidade [46] e a decisão em tempo real [46]. Em resumo, a resolução dos problemas apresentados pode desempenhar uma importante função na sociedade humana nos campos da vida cotidiana, impulsionando produções e pesquisas científicas.

## 4.8 Conclusão

O presente capítulo descreveu a definição e os conceitos de RNA's onde foram abordadas as principais características das redes *feedforward* de aprendizado supervisionado assim como o algoritmo utilizado em seu treinamento, o retropropagação. Além disso, a história das RNA's, bem como suas principais aplicações foram discutidos. Através das informações presentes no texto é possível concluir que o modelo *feedforward* é o mais indicado para solucionar problemas que exigem a classificação de parâmetros devido a sua estrutura. O conteúdo do capítulo induz o leitor a refletir a respeito da ética e os riscos de desenvolver as inteligências computacional e artificial.

## 5. Metodologia

Para realizar as medições a fim de se obterem as características de funcionamento de lâmpadas LED com dispositivo de controle integrado disponíveis no mercado brasileiro foram selecionadas 18 lâmpadas. Estas amostras possuem dispositivos de controle de topologia *buck* com filtro, com dispositivo de controle de topologia *buck* sem filtro e com dispositivo de controle *flyback* com filtro. As lâmpadas foram submetidas a variações de tensão de até -20% da tensão nominal para avaliação de comportamento com tensão mínima e até +20% da tensão nominal para avaliação do comportamento com tensão máxima, totalizando 22 níveis de tensão. Nos ensaios foram realizadas medições de potência ativa nominal, fluxo luminoso, fator de potência, corrente harmônica, DHT, TCC, IRC e eficiência luminosa. Com isso, foi possível observar os efeitos da variação de tensão em lâmpadas LED de dispositivo de controle integrado, que utilizam ou não, o filtro e as diferenças de operação de dispositivos de controle de topologias *buck* e *flyback*. Em seguida, as medições foram alocadas em uma rede neural e os 3 tipos de tecnologias de lâmpadas foram classificadas.

### 5.1 Laboratório

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Luminotécnica da Universidade Federal Fluminense - LABLUX que, devido ao seu certificado de acreditação junto ao INMETRO, desde de 2005, realiza testes em lâmpadas a fim de comprovar índices de eficiência energética estabelecidos pelo regulamento de avaliação de conformidade de lâmpadas e que possui a capacidade para avaliar características específicas das novas tecnologias tais como o LED, além de pesquisas na área de luminotécnica, eficiência energética e qualidade de energia. Inaugurado em outubro de 2002, por meio de convênios entre a Eletrobrás e o Procel, o LABLUX possui equipamentos de última geração, possibilitando sua participação no PBE. Sua missão é realizar ensaios em produtos da área de iluminação, para certificação de eficiência energética.

### 5.2 Amostras ensaiadas

Foram selecionadas 18 lâmpadas com potências entre 8 e 16W, de tensão nominal bivolt (127V ou 220V), sendo 6 delas com dispositivo de controle de topologia *buck* com filtro, 6

delas com dispositivo de controle de topologia *buck* sem filtro e 6 delas com dispositivo de controle de topologia *flyback* com filtro como descritas na Tabela 2. A faixa de potência das amostras, assim como as topologias, foram determinadas a partir da disponibilidade de lâmpadas. Todas as amostras são do tipo bulbo E-27, como mostrado na Figura 26.

Tabela 2 - Descrição de amostras.

| <b>Número de Amostras</b> | <b>Potência</b> | <b>Topologia</b>          |
|---------------------------|-----------------|---------------------------|
| 1                         | 8W              | <i>Flyback</i> com filtro |
| 2                         | 8W              | <i>Flyback</i> com filtro |
| 3                         | 12W             | <i>Flyback</i> com filtro |
| 4                         | 12W             | <i>Flyback</i> com filtro |
| 5                         | 16W             | <i>Flyback</i> com filtro |
| 6                         | 16W             | <i>Flyback</i> com filtro |
| 7                         | 9W              | <i>Buck</i> com filtro    |
| 8                         | 9W              | <i>Buck</i> com filtro    |
| 9                         | 12W             | <i>Buck</i> com filtro    |
| 10                        | 12W             | <i>Buck</i> com filtro    |
| 11                        | 15W             | <i>Buck</i> com filtro    |
| 12                        | 15W             | <i>Buck</i> com filtro    |
| 13                        | 9W              | <i>Buck</i> sem filtro    |
| 14                        | 9W              | <i>Buck</i> sem filtro    |
| 15                        | 12W             | <i>Buck</i> sem filtro    |
| 16                        | 12W             | <i>Buck</i> sem filtro    |
| 17                        | 15W             | <i>Buck</i> sem filtro    |
| 18                        | 15W             | <i>Buck</i> sem filtro    |



Figura 26 - Lâmpada LED bulbo E-27

Fonte: [47].

Todas as amostras foram importadas da China pela mesma empresa importadora, porém, possuem fabricantes diferentes. A maioria dos datasheets dos conversores CC-CC estão em chinês e em muitos faltam informações relevantes como a existência de um dispositivo que está sendo utilizado ou como supressor de EMI na entrada, ou atuando na correção do fator de potência ou na proteção contra surtos. Por isso, na classificação das amostras, o termo referido como “filtro” retrata a existência de um tipo de filtragem ou proteção. A identificação das topologias de todas as amostras, realizada previamente através dos datasheets só foi possível devido ao fato do tipo da topologia estar em inglês nos datasheets, além da conferência dos circuitos disponíveis. Alguns dos datasheets de conversores de topologias *flyback* com filtro, *buck* com filtro e *buck* sem filtro são, respectivamente: SM7525, SM7352P e BP2833A.

### 5.3 Equipamentos utilizados

A alimentação das lâmpadas nos ensaios foi feita mediante uma fonte de alimentação de tensão ajustável CA da marca *Lisun Group*, apresentada na Figura 27. Os ensaios foram realizados na esfera integradora *Ulbricht* de diâmetro de 2 m instalada no LABLUX (Figura 28), onde foram medidas as características luminotécnicas das lâmpadas estudadas nesta pesquisa. A qualidade de energia dos ensaios é avaliada por um wattímetro *Yokogawa WT-210*, ilustrado na Figura 29. A análise de espectro foi realizada a partir do espectro-radiômetro *Haas-2000* (Figura 30) e visualizada mediante ao *software Everfine HaasSuite* versão 2.00.604 (Figura 31). Para a análise de harmônicos, o *software WTVIEWER* versão 8.13, ilustrado na Figura 32, foi utilizado.



Figura 27 – Fonte *Lisun Group*

Fonte: Autoria Própria



Figura 28 – Esfera integradora *Ulbricht*

Fonte: Autoria Própria



Figura 29 – Wattímetro *Yokogawa WT-210*

Fonte: Autoria Própria



Figura 30 – Espectroradiômetro *HAAS-200*

Fonte: Autoria Própria

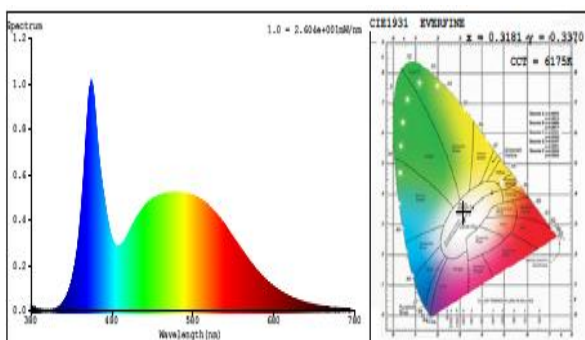


Figura 31 – Saída do software *Everfine HaasSuite*

Fonte: Autoria Própria

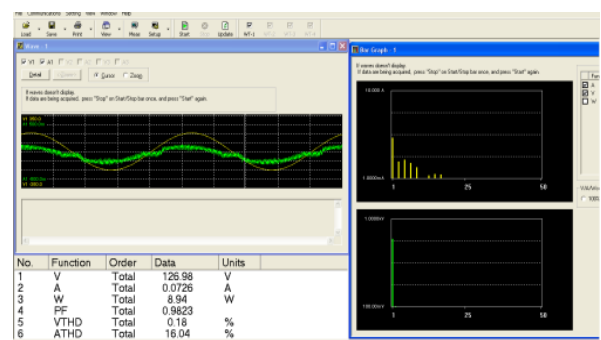


Figura 32 – Saída do software *WTVIEWER*

Fonte: Autoria Própria

## 5.4 Rotina de ensaio

Os níveis de tensão utilizados nos ensaios foram definidos a partir da tensão nominal das lâmpadas (127V e 220V) e a partir da extrapolação dos valores limites estabelecidos pela Portaria n.º 389 que define os limites de tensão seguros entre 92% e 106% da tensão nominal. Devido à dificuldade de ajuste do equipamento utilizado, os valores foram arredondados para 90% e 105%. Portanto, a partir da tensão nominal foram variados 5% a mais e a menos até atingirem +20% e -20% da tensão nominal. Devido a necessidade de realizar medições de parâmetros em diferentes comportamentos foram definidos os limites de +20% e -20%, pois durante os ensaios observou-se que os valores definidos seriam suficientes para que a análise fosse elaborada e que não haveria a necessidade de realizar testes com níveis de tensão diferentes.

As lâmpadas foram alimentadas inicialmente na tensão nominal durante 30 minutos até atingirem a estabilização, segundo as recomendações feitas na Portaria n.º 389. A Figura 33 mostra o esquema de disposição dos equipamentos contidos no LABLUX. Após a estabilização, as lâmpadas, uma por vez, foram posicionadas no interior da esfera integradora e, através do *software* *WTViewer* foram obtidos os dados das características elétricas das lâmpadas tais como potência, fator de potência, corrente, e distorção harmônica; já com o *software* *Everfine HaasSuite* foi possível visualizar o espectro luminoso obtendo o fluxo luminoso, temperatura de cor e índice de reprodução da cor, para cada variação de tensão. Finalmente, com os dados de fluxo luminoso e potência obtidas nas medições, foi determinada a eficácia luminosa como a razão entre estas duas variáveis.

As portarias, "Portaria" n.º. 118, em 6 de março de 2015 [48], a "Portaria" n.º. 389, em 25 de agosto de 2014 [49], e a "Portaria" n.º. 144, em 25 de agosto de 2014 [50], estabelecem requisitos que devem ser atendidos por lâmpadas LED e são discutidas no Anexo A.

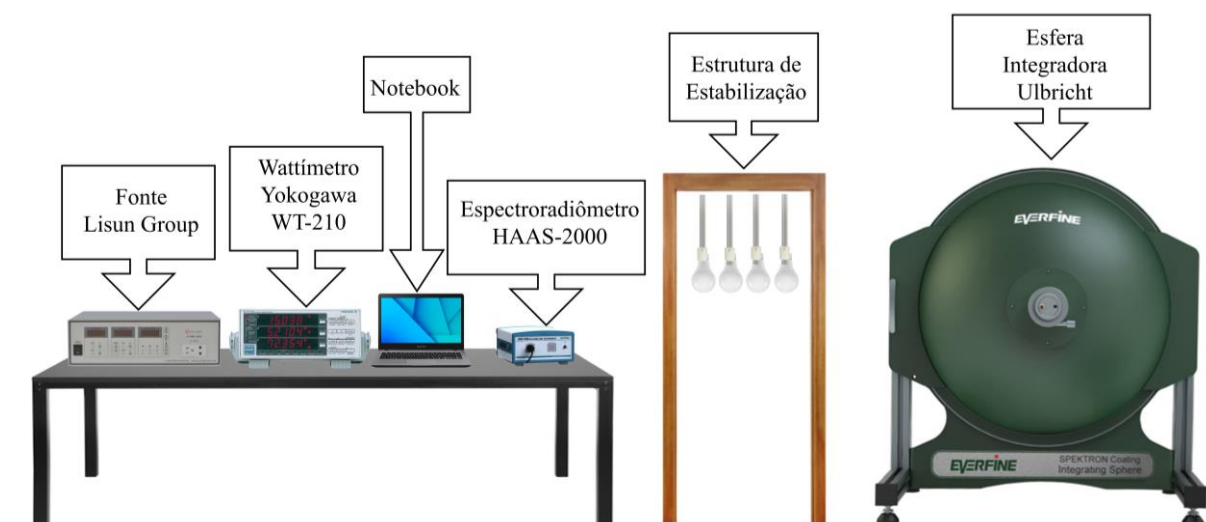


Figura 33 – Esquema de disposição de equipamentos em laboratório.

Fonte: Autoria Própria

## 5.5 Implementação da rede neural

O modelo de rede neural utilizado neste estudo é o *feedforward* de múltiplas camadas que é empregado na classificação de padrões. Sua estrutura é constituída por uma camada oculta de neurônios e uma camada de saída. A definição do número de camadas ocultas foi realizada através de tentativas, onde foi constatado que apenas uma camada oculta e uma camada de saída seriam suficientes para a classificação. Neste trabalho, foram utilizados neurônios de saídas sigmóides, assim como ilustra a Figura 34. Os dados de entrada passam pela rede, camada por camada, até chegarem à saída. O modelo usa o algoritmo de aprendizado supervisionado, portanto acontecem etapas de treinamento, validação e teste da rede. Na etapa de treinamento, os dados são apresentados à rede que é ajustada de acordo com seu erro. Durante a validação os dados são utilizados para medir a generalização da rede com o objetivo de interromper o treinamento quando a generalização converge. Os dados utilizados na etapa de testes não têm efeito sobre o treinamento, portanto fornecem uma medida independente do desempenho da rede durante e após o treinamento.

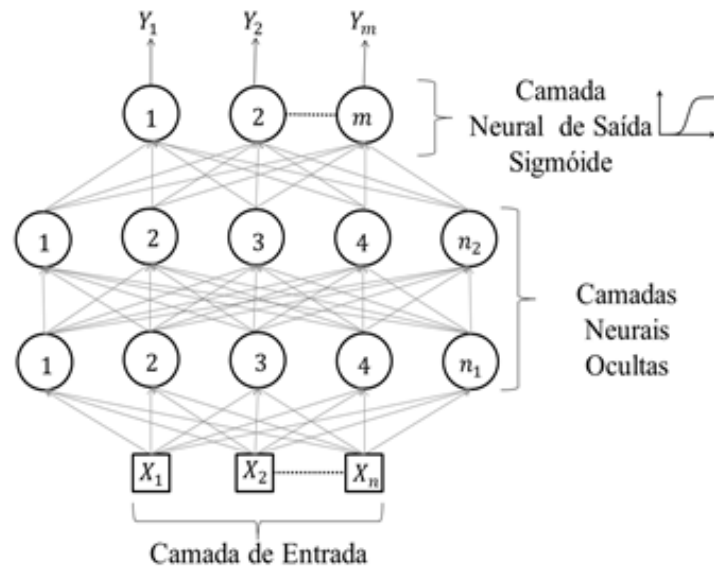


Figura 34 – Modelo de rede *feedforward* de camadas múltiplas.

Fonte: Autoria Própria

As 396 medições foram inseridas em um vetor de entrada, formando uma matriz 395x8, onde as linhas são referentes as medições realizadas em diferentes níveis de tensão e as colunas são referentes aos parâmetros medidos, como ilustra a Figura 35.

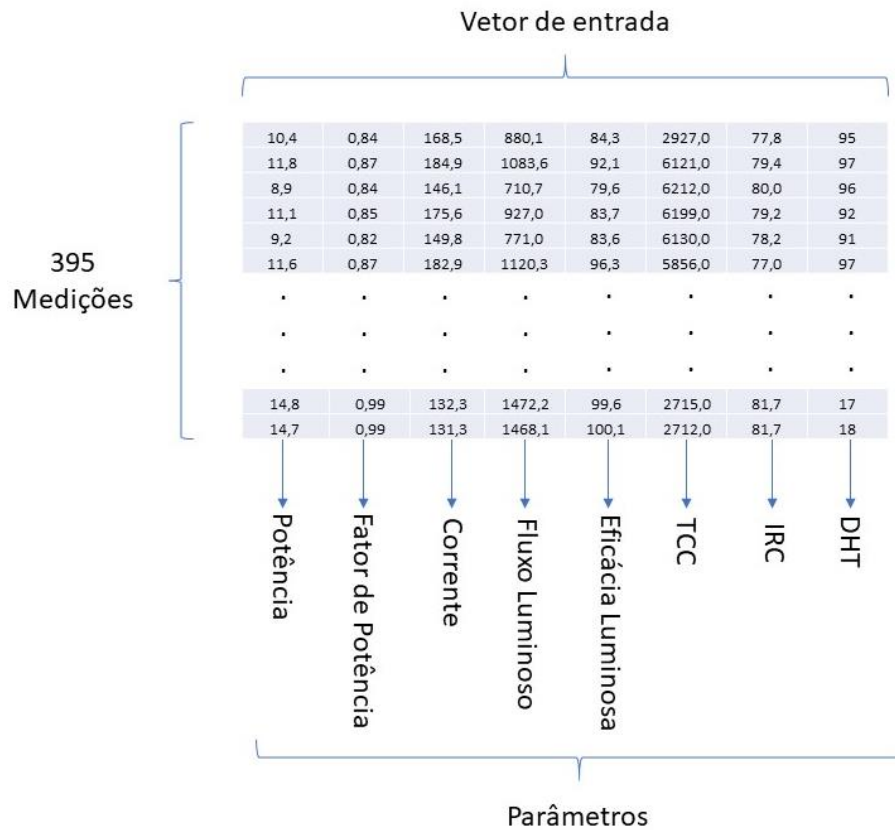


Figura 35 – Exemplo do vetor de entrada.

Fonte: Autoria Própria

Para obter as respostas desejadas, *flyback*, *buck* e *buck* sem filtro, foram determinados valores para identificar a topologia através de um número. Esses valores correspondentes foram inseridos em um vetor de saída, de forma que as lâmpadas de topologia *flyback* foram classificadas pelo valor “001”, as lâmpadas de topologia *buck* pelo valor “010” e as lâmpadas de topologia *buck* sem filtro pelo valor “100”. Sendo assim, o vetor de saída é uma matriz 395x3, como pode ser visto na Figura 36.

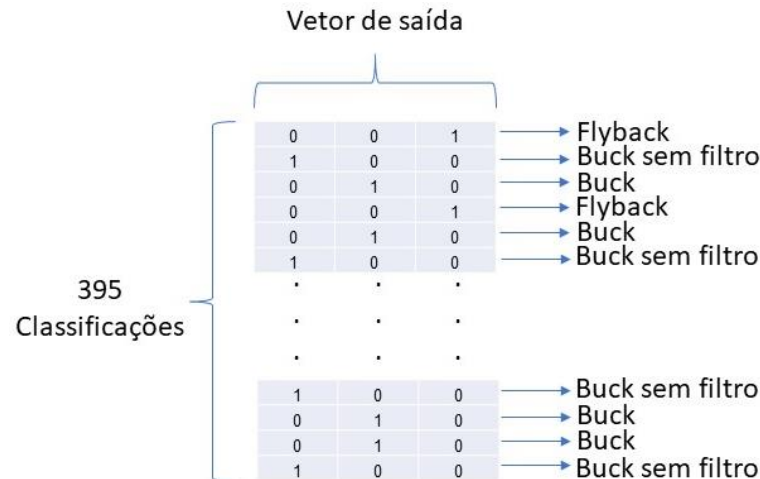


Figura 36 – Exemplo do vetor de saída.

Fonte: Autoria Própria

Através da *toolbox* NPRTOOL do MATLAB, que fornece o modelo *feedforward* de duas camadas com neurônios de saídas sigmóides, é possível selecionar dados, criar e treinar uma rede e avaliar seu desempenho utilizando matrizes cruzadas de entropia e confusão. Portanto, das 396 medições, foram definidos 70% das amostras para fins de treinamento, 15% para validar os resultados e 15% para testes. Tais percentuais são valores *default* da Toolbox do MATLAB e foram mantidos neste estudo, como mostra a Figura 37.

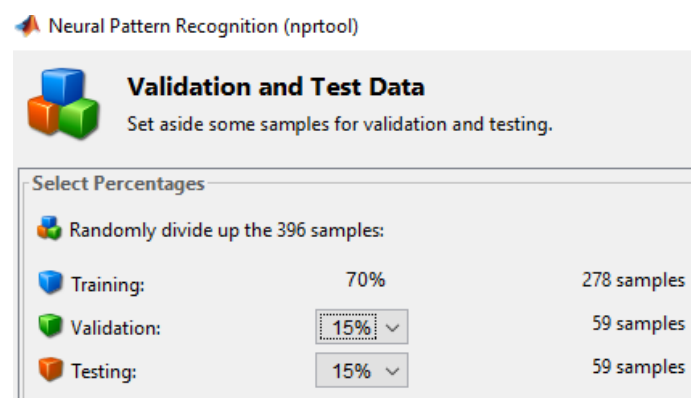


Figura 37 – Percentual de dados utilizados nas etapas de treinamento, validação e testes.

Fonte: Gerado através do software MATLAB

Além disso, foram definidos 3 neurônios para serem utilizados na camada oculta e 3 neurônios na camada de saída, como mostra a Figura 38, onde *Input* é um vetor de entrada com 8 parâmetros (potência, FP, corrente, fluxo luminoso, eficácia luminosa, TCC, IRC e DHT), *Hidden Layer* é a camada oculta com 3 neurônios, *Output Layer* é a camada de saída com 3

neurônios e *Output* é a classificação, que retorna os valores “001” para as lâmpadas de topologia *flyback*, “010” para as lâmpadas de topologia *buck* com filtro e “100” para as lâmpadas de topologia *buck* sem filtro.

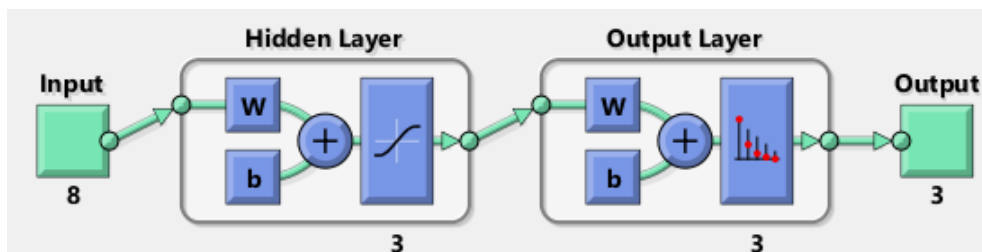


Figura 38 –Rede *feedforward* de duas camadas com neurônios de saídas sigmóides.

Fonte: Gerado através do software MATLAB

## 5.6 Conclusão

A metodologia do trabalho descreveu o ambiente de ensaio, as amostras ensaiadas, os equipamentos utilizados, a rotina de testes, e por fim, a implementação da rede neural. As informações contidas no presente capítulo fazem o uso das teorias relatadas nos capítulos anteriores (Fundamentação Teórica, Fontes Chaveadas e Redes Neurais) e são relevantes para o entendimento dos capítulos posteriores de Análise de Resultados e Conclusão.

## 6. Análise de Resultados

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados em laboratório, assim como a classificação da rede neural. Durante os testes, 396 medições foram realizadas em 18 lâmpadas e todas as amostras com filtro apresentaram valores de parâmetros dentro dos limites definidos pela Portaria nº 389 [49]. Já as lâmpadas sem filtro não atingiram o valor mínimo de IRC definido pelo RTQ nº 389 [49]. A classificação de topologias, a partir de parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia, obteve 99,5% de acerto. Os parâmetros que serviram como vetor de entrada da rede neural e que terão seus limites discutidos neste capítulo são: Potência Ativa Nominal, Fator de Potência (FP), Corrente Harmônica, Fluxo Luminoso, Eficácia Luminosa, Temperatura de Cor Correlata (TCC), Índice de Refração de Cores (IRC) e Distorção Harmônica Total (DHT).

### 6.1 Parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia

Os parâmetros medidos nas 18 lâmpadas estão dispostos nas Tabelas 3, 4 e 5 de forma simplificada, onde foram calculados como médias das lâmpadas da mesma potência para cada parâmetro. Comparando as Tabelas 3, 4 e 5, é possível notar, dentre as médias dos parâmetros das lâmpadas da mesma potência, que alguns desses parâmetros, como a média da Potência Medida, o FP, o Fluxo Luminoso e a Eficácia Luminosa, tem pouca variação. Por outro lado, a média dos parâmetros Corrente Harmônica, TCC, IRC e DHT, apresentaram variações significativas. A média da corrente harmônica, por exemplo, atingiu 51,77 mA nas lâmpadas de topologia *flyback* de 8W e 105,96 mA nas lâmpadas de topologia *buck* sem filtro de 9W, quase o dobro. A média dos parâmetros das seis amostras de lâmpadas de topologia *flyback* com filtro é apresentada na Tabela 3, na qual as amostras foram agrupadas de acordo com a mesma potência. A média dos parâmetros das seis amostras de lâmpadas de topologia *buck* com filtro é apresentada na Tabela 4. As seis amostras de lâmpadas de topologia *buck* sem filtro obtiveram dados alarmantes devido ao alto nível de DHT; a média desses dados é apresentada na Tabela 5.

Tabela 3 – Média de amostras de lâmpadas LED de topologia *flyback* com filtro.

|                                 |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Potência Nominal (W)</b>     | 16W     | 16W     | 12W     | 12W     | 8W      | 8W      |
| <b>Amostras</b>                 | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       |
| <b>Potência Medida (W)</b>      | 14,79   | 14,68   | 10,66   | 10,24   | 7,27    | 6,97    |
| <b>FP</b>                       | 0,94    | 0,94    | 0,90    | 0,89    | 0,88    | 0,88    |
| <b>Corrente Harmônica (mA)</b>  | 102,02  | 101,39  | 74,58   | 74,41   | 52,88   | 50,66   |
| <b>Fluxo Luminoso (lm)</b>      | 1480,83 | 1477,82 | 1013,93 | 997,57  | 611,66  | 599,47  |
| <b>Eficácia Luminosa (lm/W)</b> | 100,15  | 100,70  | 95,10   | 97,41   | 84,10   | 85,96   |
| <b>TCC (K)</b>                  | 2714,82 | 2711,45 | 2760,64 | 2758,18 | 2681,68 | 2680,23 |
| <b>IRC</b>                      | 81,68   | 81,76   | 81,80   | 81,89   | 81,75   | 81,80   |
| <b>DHT</b>                      | 18,41   | 18,61   | 22,38   | 22,24   | 17,32   | 17,36   |

Tabela 4 – Média de amostras de lâmpadas LED de topologia *buck* com filtro.

|                                 |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Potência Nominal (W)</b>     | 15W     | 15W     | 12W     | 12W     | 9W      | 9W      |
| <b>Amostras</b>                 | 7       | 8       | 9       | 10      | 11      | 12      |
| <b>Potência Medida (W)</b>      | 12,53   | 12,49   | 10,32   | 10,45   | 8,94    | 8,96    |
| <b>FP</b>                       | 0,93    | 0,92    | 0,90    | 0,90    | 0,92    | 0,92    |
| <b>Corrente Harmônica (mA)</b>  | 90,66   | 90,10   | 74,94   | 75,74   | 63,13   | 63,28   |
| <b>Fluxo Luminoso (lm)</b>      | 1240,09 | 1258,15 | 1065,36 | 1007,64 | 883,46  | 871,86  |
| <b>Eficácia Luminosa (lm/W)</b> | 99,03   | 100,79  | 103,27  | 96,44   | 98,82   | 97,35   |
| <b>TCC (K)</b>                  | 5970,52 | 6286,64 | 6240,59 | 6259,41 | 5910,18 | 6241,32 |
| <b>IRC</b>                      | 84,99   | 84,77   | 84,09   | 84,28   | 83,62   | 83,68   |
| <b>DHT</b>                      | 30,11   | 29,52   | 22,19   | 22,47   | 18,63   | 18,15   |

Tabela 5 – Média de amostras de lâmpadas LED de topologia *buck* sem filtro.

|                                 |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Potência Nominal (W)</b>     | 15W     | 15W     | 12W     | 12W     | 9W      | 9W      |
| <b>Amostras</b>                 | 13      | 14      | 15      | 16      | 17      | 18      |
| <b>Potência Medida (W)</b>      | 13,23   | 13,22   | 10,54   | 11,63   | 9,02    | 8,73    |
| <b>FP</b>                       | 0,92    | 0,92    | 0,92    | 0,92    | 0,92    | 0,92    |
| <b>Corrente Harmônica (mA)</b>  | 153,43  | 153,30  | 124,65  | 151,37  | 106,28  | 105,63  |
| <b>Fluxo Luminoso (lm)</b>      | 1174,59 | 1223,22 | 854,59  | 965,51  | 769,32  | 709,01  |
| <b>Eficácia Luminosa (lm/W)</b> | 88,81   | 92,57   | 81,08   | 83,03   | 85,34   | 81,25   |
| <b>TCC (K)</b>                  | 6158,91 | 5893,55 | 2927,64 | 6215,50 | 6127,77 | 6217,32 |
| <b>IRC</b>                      | 79,61   | 77,22   | 77,80   | 79,28   | 78,19   | 80,00   |
| <b>DHT</b>                      | 138,38  | 138,43  | 141,90  | 140,50  | 138,76  | 147,00  |

Os comportamentos das lâmpadas que utilizam filtro são semelhantes entre si, assim como o comportamento das lâmpadas sem filtro, mesmo em amostras de diferentes potências. Portanto, com o intuito de analisar o efeito da variação da magnitude de tensão nos parâmetros medidos, figuras que mostram apenas o comportamento das amostras de lâmpadas de 12W de topologias *flyback* com filtro, *buck* com filtro e *buck* sem filtro foram inseridas (39-46).

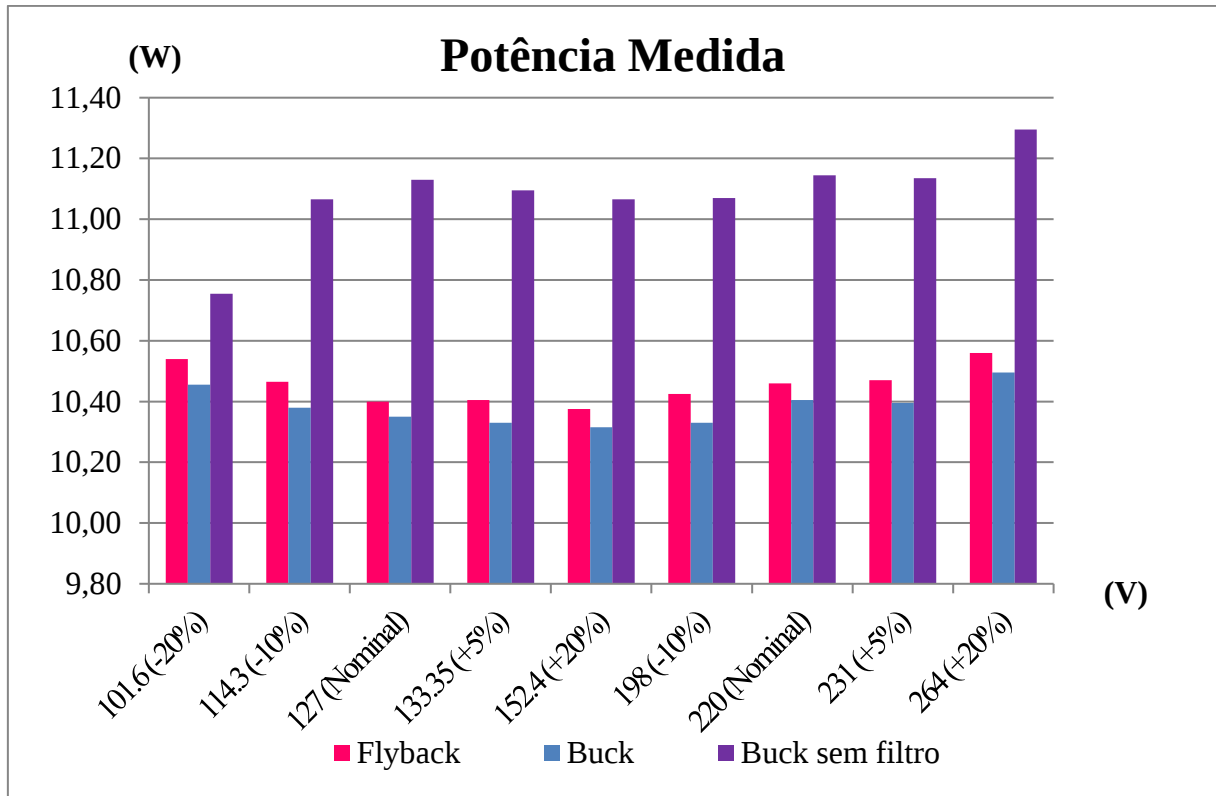


Figura 39 – Potência medida.

Analisando a Figura 39 é possível perceber que a potência medida é menor que a potência nominal das lâmpadas, e que no caso de lâmpadas com filtro, quanto mais a tensão se afasta dos valores nominais, a potência medida aumenta. Quando a lâmpada opera dentro dos valores de tensão nominal, a potência medida diminui, no entanto, a lâmpada sem filtro tem um comportamento diferente das amostras com filtro; a potência medida aumenta. A partir da análise de resultados do parâmetro potência medida é possível concluir que as lâmpadas com filtro são mais efetivas do que aquelas sem filtro. De acordo com a norma brasileira, a potência medida não deve exceder a potência nominal em 10%, e todas as amostras testadas neste trabalho estavam respeitando o limite, assim como as lâmpadas de 12W representadas nas figuras de índice 39 até 46.

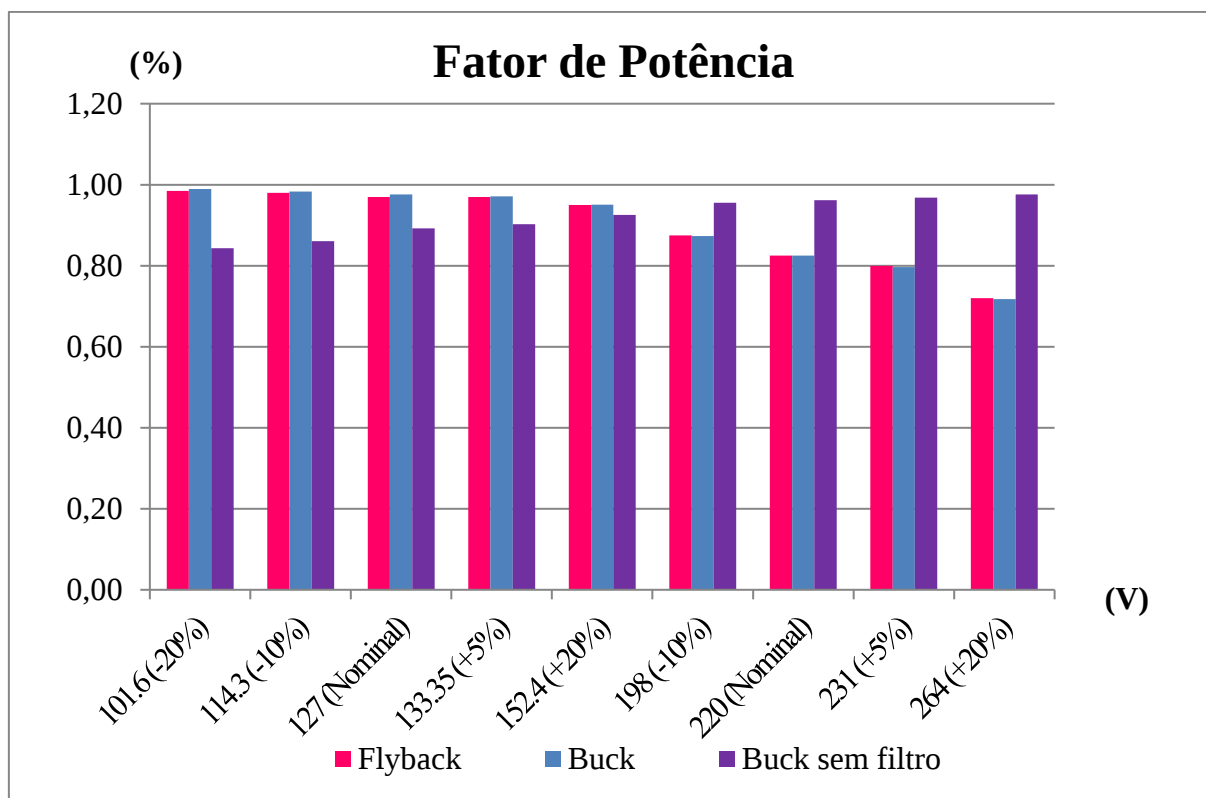


Figura 40 – Fator de potência.

De acordo com a Figura 40, o fator de potência das lâmpadas com filtro diminui com o aumento dos níveis de tensão e, nos níveis de tensão mais baixos, os melhores valores de FP são medidos. O comportamento do fator de potência das lâmpadas sem filtro se dá de acordo com o aumento nos níveis de tensão e os melhores valores de FP são medidos nos níveis mais altos de tensão. Considerando que o valor do FP indicado para lâmpadas com potência inferior a 25W, segundo o RTQ n°389 [49] é 0,7, é correto afirmar que as lâmpadas com filtro viriam a operar em níveis adequados de FP, quando submetidos a níveis de tensão adequados (-10% e +5% da nominal). Afirma-se que apenas as amostras de lâmpadas de 8W de topologia *flyback* com filtro atingiram valores de fator de potência abaixo do limite esperado de 0,6956 e 0,6943, quando submetidas a níveis de tensão 20% acima da nominal máxima 220V, 264V.

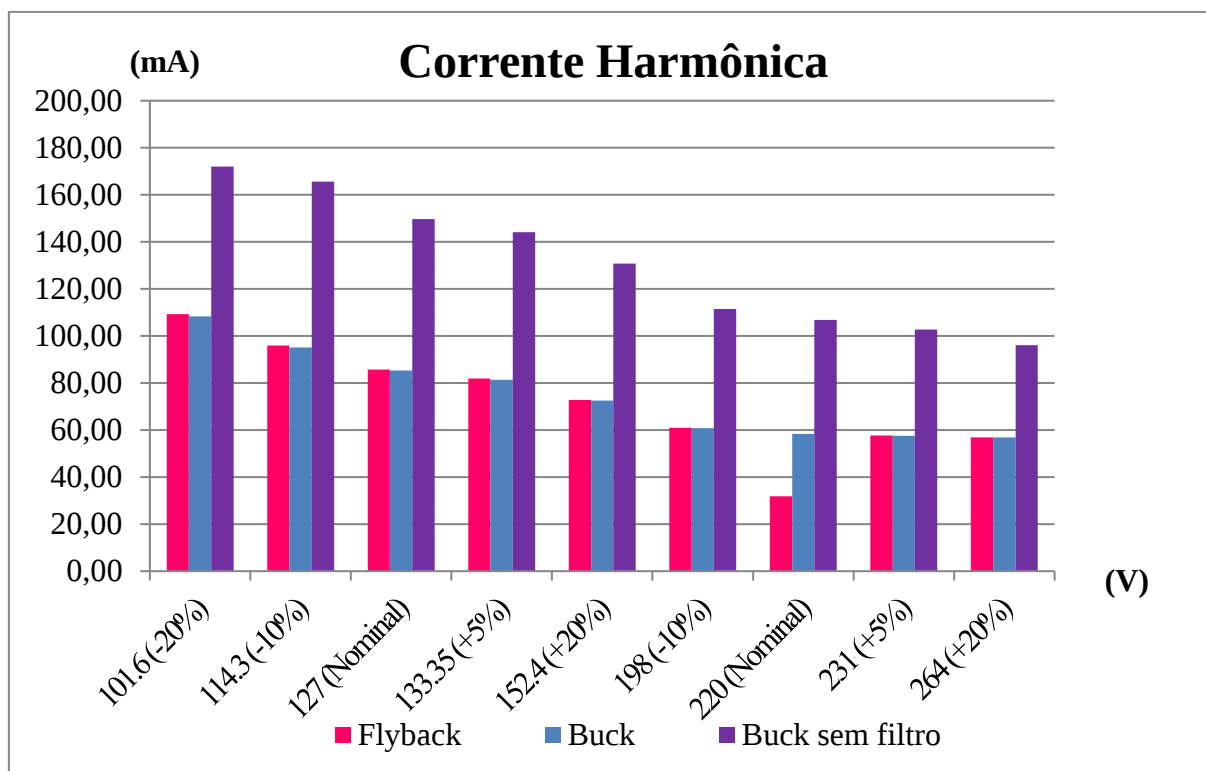


Figura 41 – Corrente harmônica.

O comportamento da corrente harmônica, mostrado na Figura 41, é semelhante tanto nas lâmpadas que possuem filtro quanto nas lâmpadas que não possuem filtro, ambas reduzem a corrente harmônica com o aumento da tensão. Além disso, as lâmpadas sem filtro têm corrente harmônica mais alta quando comparadas aos níveis de lâmpadas com filtro. Portanto, as lâmpadas com filtro tiveram um comportamento mais adequado do que as lâmpadas sem filtro lembrando que não há limite de corrente harmônica definida para lâmpadas LED com potência inferior a 25W no RTQ n°389 [49].

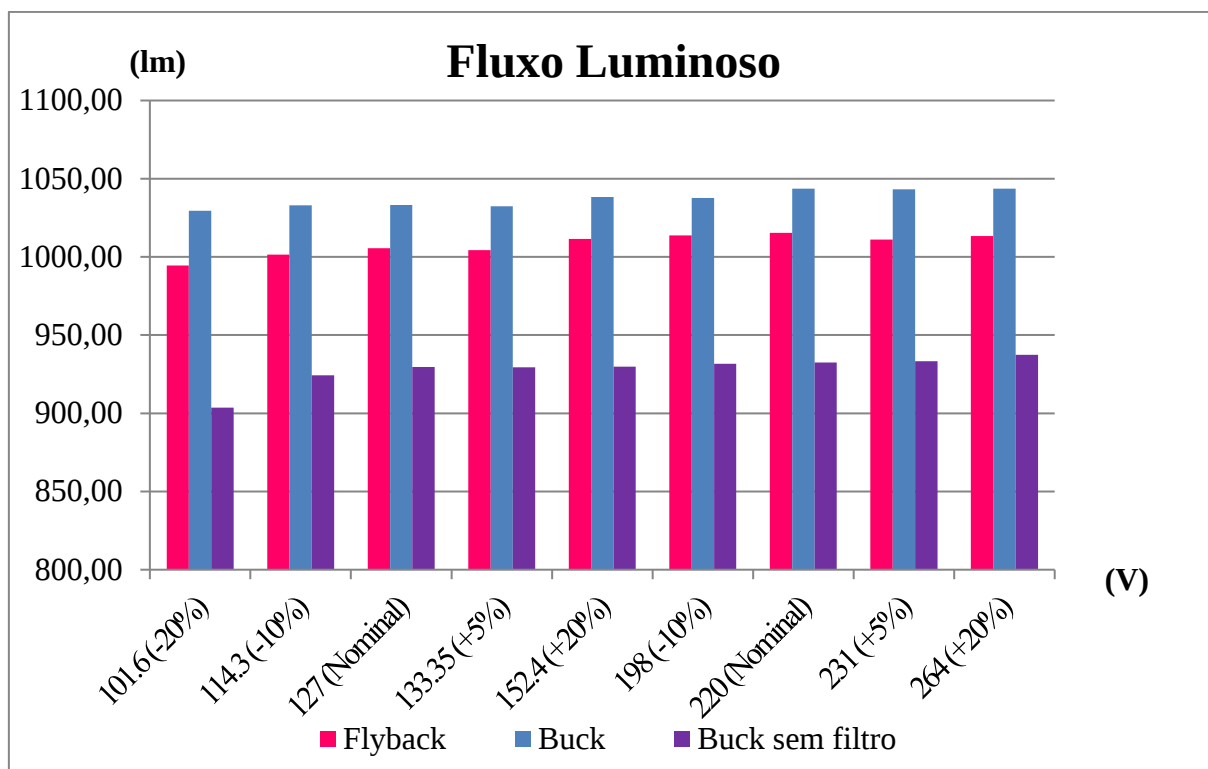


Figura 42 – Fluxo luminoso.

O fluxo luminoso, de acordo com a Figura 42, aumenta à medida que a magnitude de tensão é elevada. Também é possível concluir que as lâmpadas sem filtro têm um fluxo luminoso menor do que as lâmpadas com filtro, irradiando menos luz. Segundo o RTQ nº389 [49], o fluxo luminoso não possui limite definido para lâmpadas omnidirecionais de potência inferior a 20W.

Assim como no fluxo luminoso, a eficácia luminosa ilustrada na Figura 43 é menor nas lâmpadas sem filtro. O comportamento da eficácia luminosa das lâmpadas com filtro é similar, quanto maior a eficácia luminosa de uma lâmpada, menor o seu consumo de energia. Assim, as lâmpadas de topologia *buck* sem filtro consomem mais energia do que as de topologias *flyback* e *buck* com filtro. As lâmpadas de topologia *buck* com filtro tiveram os melhores resultados, consumindo menos energia, apresentando valores de eficácia luminosa de 103% e 104,1% entre os valores de tensão nominal (120V e 220V). Segundo a norma RTQ nº389 [49], as amostras de potência inferior a 15W, deveriam atingir uma eficácia luminosa superior a 55lm/W, enquanto as amostras de potência igual ou superior a 15W deveriam atingir uma eficácia luminosa superior a 60lm/W. Todas as amostras ensaiadas atenderam os limites, mesmo a níveis de tensão fora dos limites.

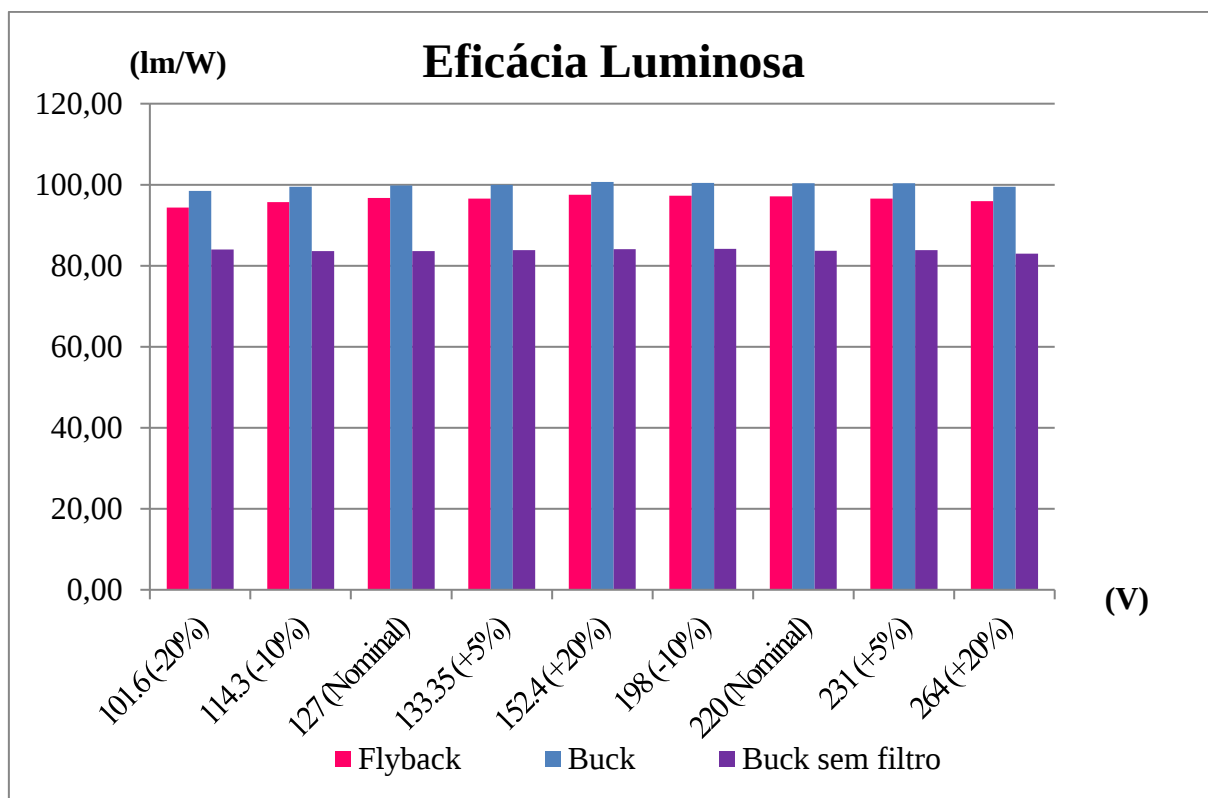


Figura 43 – Eficácia luminosa.

A temperatura de cor dos três tipos de lâmpadas é diferente. No entanto, o comportamento da temperatura de cor das lâmpadas de 12 W representadas na Figura 44 não apresenta grandes variações frente as alterações de magnitude de tensão. Portanto, considera-se que o comportamento da temperatura de cor das amostras de lâmpadas ensaiadas permanece constante de acordo com as variações de magnitude de tensão. De acordo com o RTQ n°389 [49], o valor do TCC obtido de uma lâmpada LED não pode exceder a tolerância da categoria indicada pelo fornecedor responsável. Os valores de TCC medidos correspondem ao indicado pelo fornecedor.

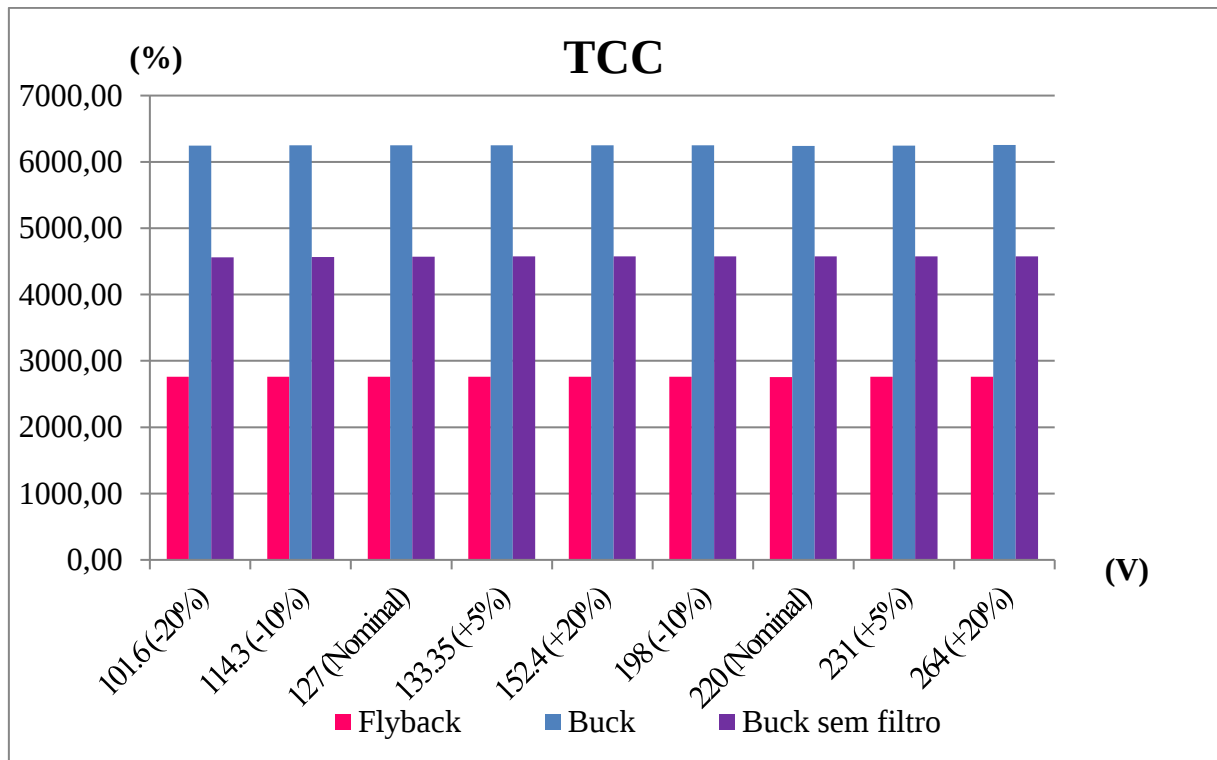


Figura 44 – Temperatura de cor correlata.

O Índice de Reprodução de Cor permaneceu constante com a variação de tensão, conforme a Figura 45, os 3 tipos de lâmpadas tiveram o mesmo comportamento. De acordo com o RTQ nº389 [49], o IRC deve ser maior ou igual a 80, portanto conclui-se que as amostras sem filtro não atingiram os níveis mínimos de IRC e que a variação da magnitude da tensão não influenciou o resultado.

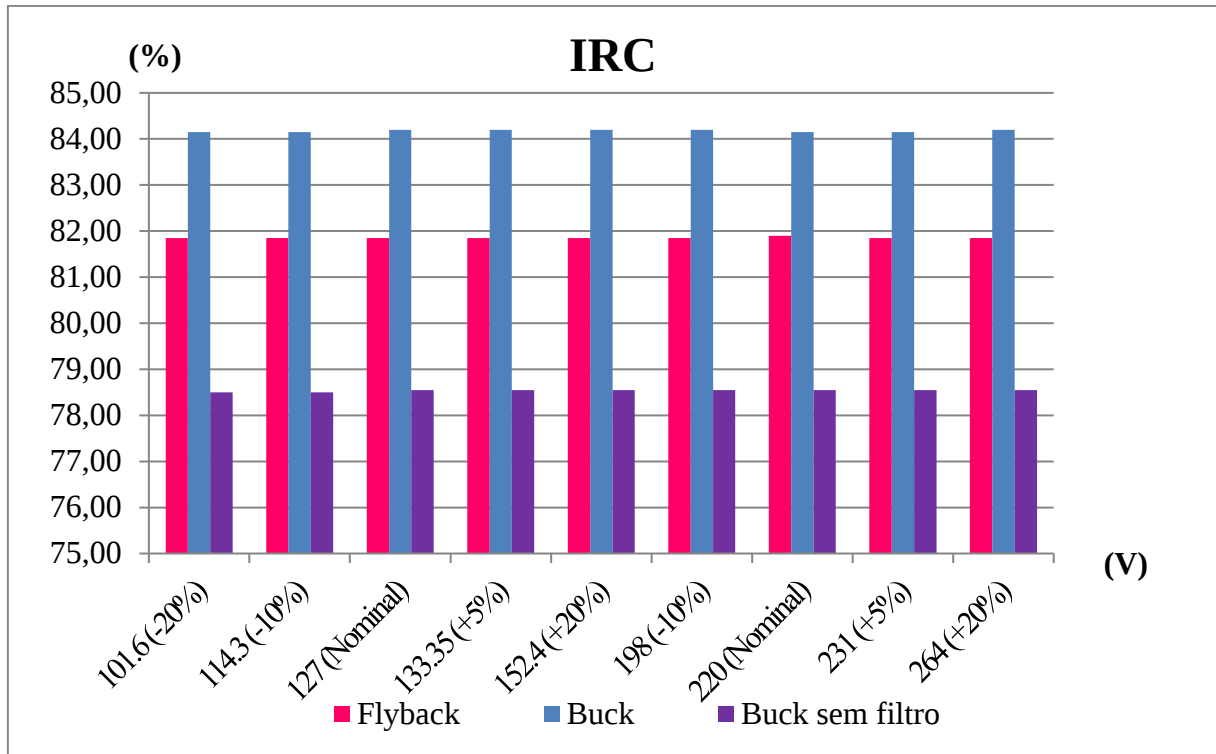


Figura 45 – Índice de reprodução de cor.

Além disso, cabe ressaltar que a Figura 45 corresponde a média de 2 lâmpadas de 12W das três topologias, sendo 2 lâmpadas de topologia *flyback* com filtro, 2 lâmpadas de topologia *buck* com filtro, e 2 lâmpadas de topologia *buck* sem filtro. As outras 4 amostras de lâmpadas sem filtro de potências 8W e 16W, que não são representadas nas figuras de 41 até 48, devido à similaridade comportamental, também não atingiram o valor mínimo estabelecido pela norma e que a variação da magnitude da tensão também não influenciou no resultado.

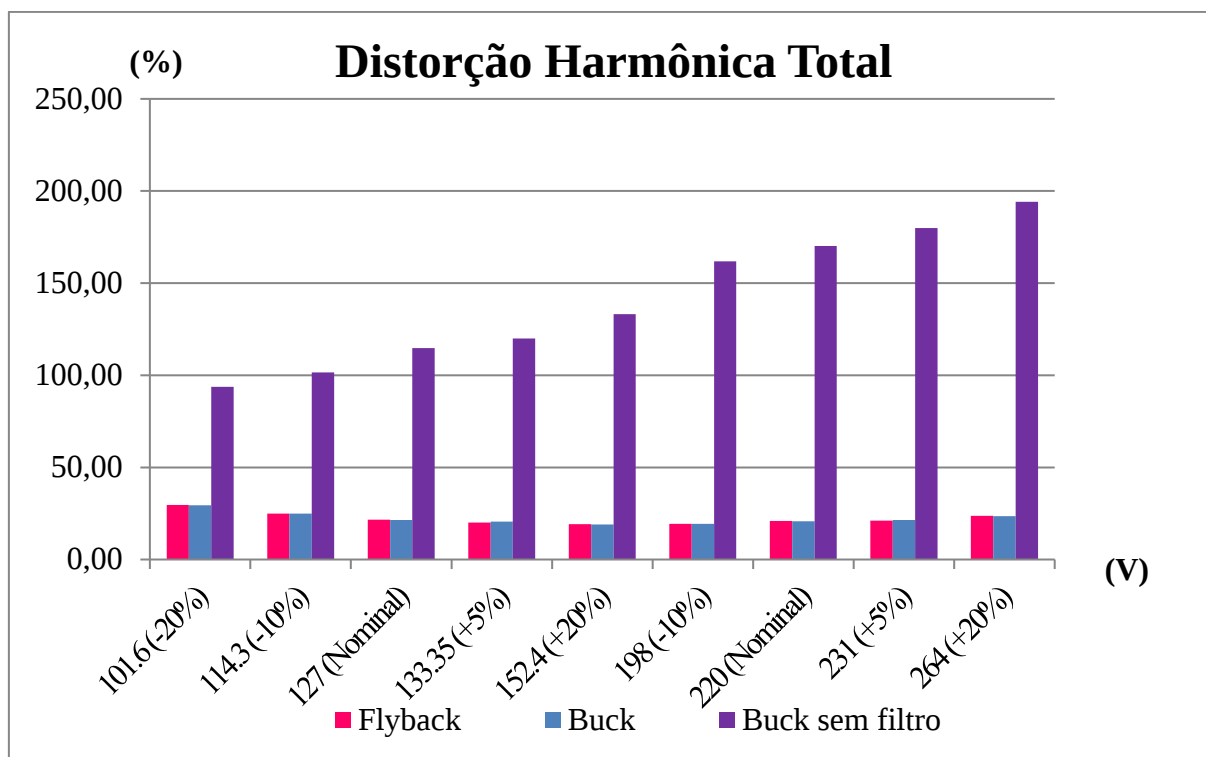


Figura 46 – Distorção Harmônica Total.

De acordo com a Figura 46, a DHT medido nas amostras de lâmpadas com filtro aumenta quando a magnitude da tensão excede o valor nominal máximo e nominal mínimo e reduz dentro da faixa de valores de tensão nominal. Por outro lado, os valores de DHT medidos nas amostras de lâmpadas sem filtro mostraram um comportamento crescente; quanto maior o nível de tensão, maior a DHT. Além disso, os níveis de DHT medidos nas amostras de lâmpadas de topologia *buck* sem filtro são até 14 vezes maiores do que os níveis de DHT medidos nas amostras de lâmpadas com filtro.

Lembrando que as 6 lâmpadas de 12 W cujos comportamentos são representados da Figura 39 até a Figura 46 são de mesmo modelo, mesma marca, possuem as mesmas especificações técnicas, exceto temperatura de cor e número de lote, mas possuem desempenhos diferentes devido a suas características construtivas. A informação sobre as características construtiva dos *drivers* não é divulgada pelos distribuidores e fabricantes na embalagem. Só é possível descobrir a diferença se o circuito do *driver* for analisado, como realizado neste trabalho. Portanto, pensando do ponto de vista do consumidor, o comprador é guiado pelas informações contidas na embalagem e pode estar consumindo um produto com um resultado inferior à sua expectativa.

As Figuras 47, 48 e 49 mostram as formas de onda de corrente de entrada para lâmpadas de topologia *flyback* com filtro, lâmpadas de topologia *buck* com filtro e lâmpadas de topologia *buck* sem filtro, respectivamente. Todas as lâmpadas da mesma topologia apresentaram formas de onda semelhantes, como um padrão. Dessa forma, apenas alguns espectros são apresentados neste texto. A forma de onda senoidal de cor azul representa a tensão e a forma de onda distorcida de cor rosa representa a corrente harmônica.

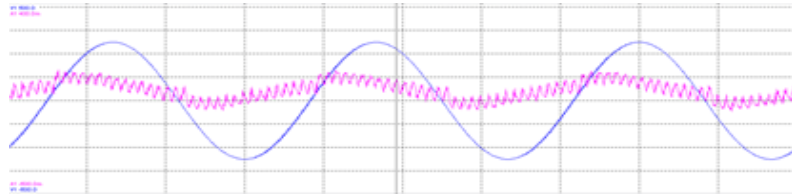


Figura 47 – Forma de onda de entrada de lâmpada de topologia *flyback*.

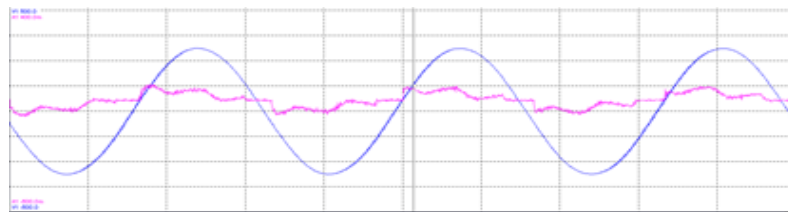


Figura 48 – Forma de onda de entrada de lâmpada de topologia *buck*.

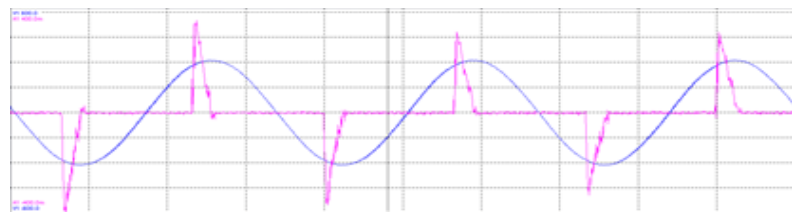


Figura 49 – Forma de onda de entrada de lâmpada de topologia *buck* sem filtro.

As Figuras 50 e 51 representam a distorção harmônica das lâmpadas, que obtiveram a porcentagem mais baixa (DHT = 14%) e a mais alta (DHT = 204%) da distorção harmônica total, respectivamente. Uma amostra de topologia *flyback* com filtro de 8W a -10% da tensão nominal 127V, 114,3V, atingiu 14% de DHT e uma amostra de lâmpada LED de topologia *buck* sem de filtro de 9W a + 20% da tensão nominal 220V, 264V, atingiu 204 % de DHT.

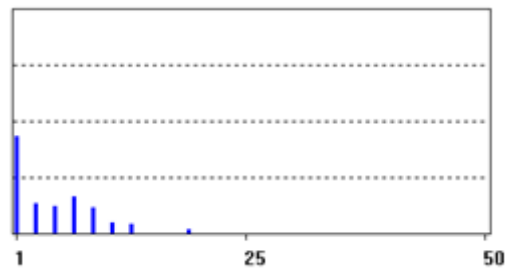


Figura 50 – DHT de lâmpada de topologia *flyback* (DHT = 14%).

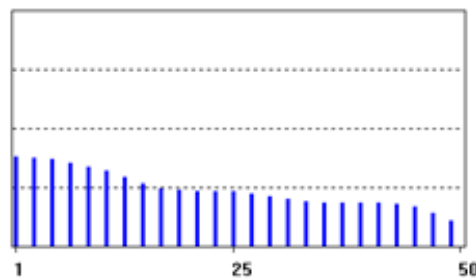


Figura 51 – DHT de lâmpada de topologia *buck* sem filtro (DHT = 204%).

A aplicação de filtros em lâmpadas LED se faz necessária para controlar a quantidade de DHT gerada imposta pela "Portaria" nº. 389 [49], que define a quantidade mínima de FP tolerado em 0,7%, no Item 6.4, a fim de atender aos critérios impostos pela certificação do produto. Antes da portaria era permitido a comercialização de lâmpadas de LED sem qualquer limite de parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia no mercado brasileiro pois não existia regulamentação.

## 6.2 Rede neural

Os resultados gerados pelo MATLAB caracterizaram uma boa classificação, atingindo um percentual de acerto de 99,5%. Os demais parâmetros estão apresentados em sequência. A Figura 52 mostra o melhor desempenho de validação onde os valores mais baixos, próximos de zero, são desejáveis. O valor obtido foi de 0,032574 na época 8. O termo época refere-se ao número de atualizações ocorridas nos pesos e *bias*.

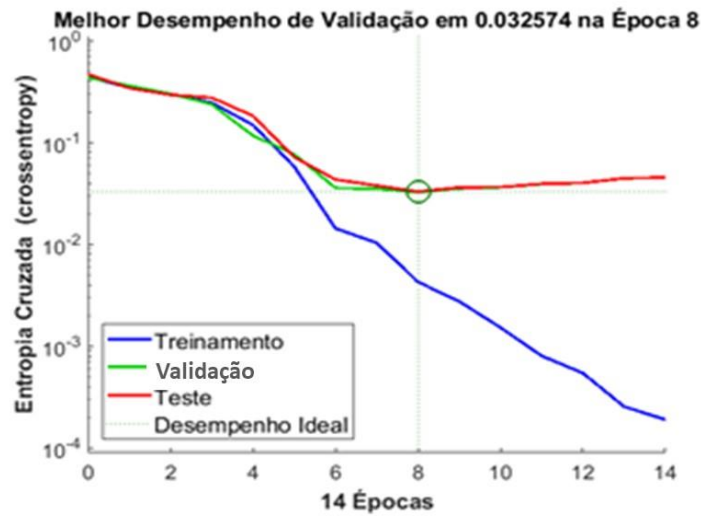


Figura 52 – Melhor desempenho da validação.

O estado de treinamento pode ser observado na Figura 53. Quanto mais próximo de zero for o valor do coeficiente do gradiente, melhor será o treinamento e o teste da rede. Além disso, é possível perceber que o valor do gradiente continua diminuindo com o aumento do número de épocas. O coeficiente de gradiente atingiu o valor de 0,00028558 na época 14.

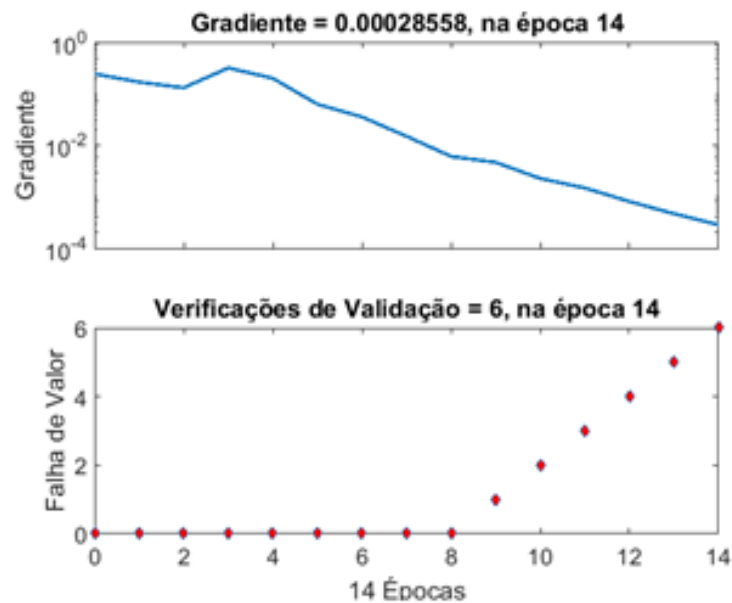


Figura 53 – Treinamento.

O histograma de erro está disposto na Figura 54 e mostra que os erros de ajuste de dados estão distribuídos dentro de um intervalo em torno de zero, que pode ser considerado um bom

resultado, tendo em vista que os valores atingidos ( $-0,04967$  e  $0,04968$ ) estão próximos ao intervalo desejado.

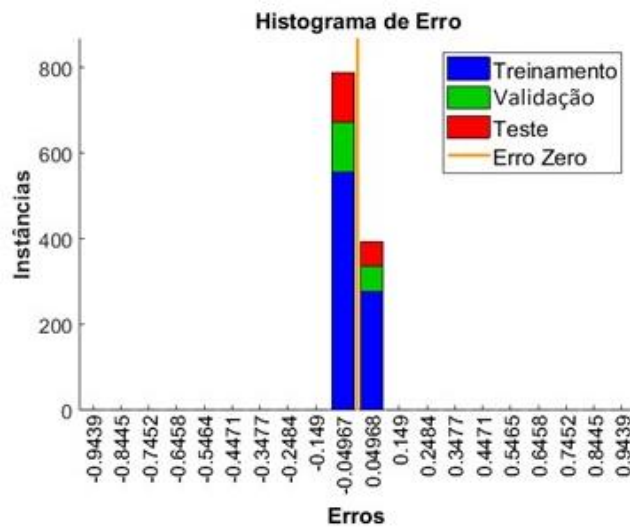


Figura 54 – Histograma do erro.

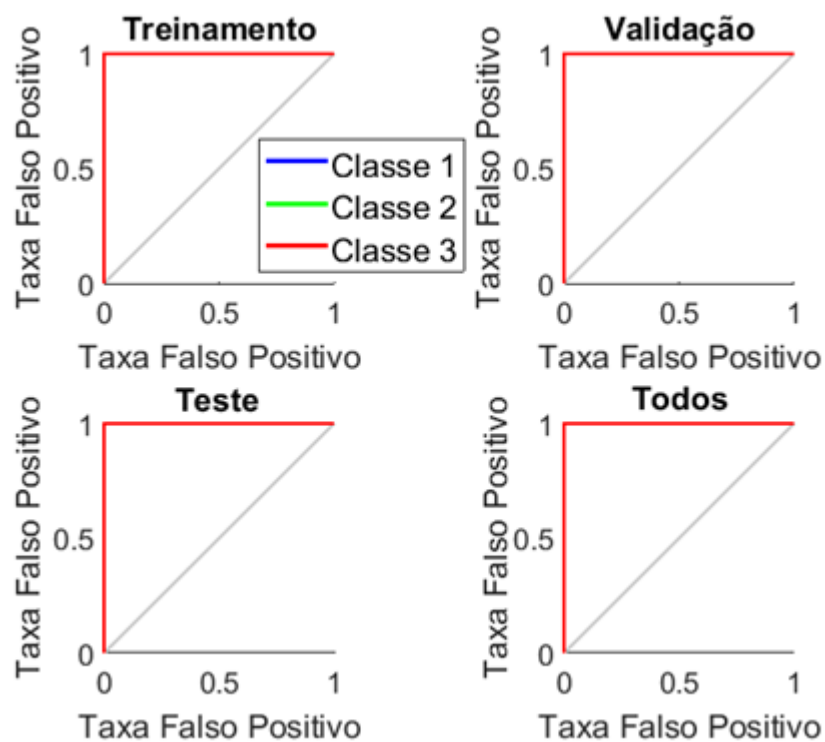


Figura 55 – Curvas características.

A Figura 55 apresenta a curva da característica de operação do receptor.

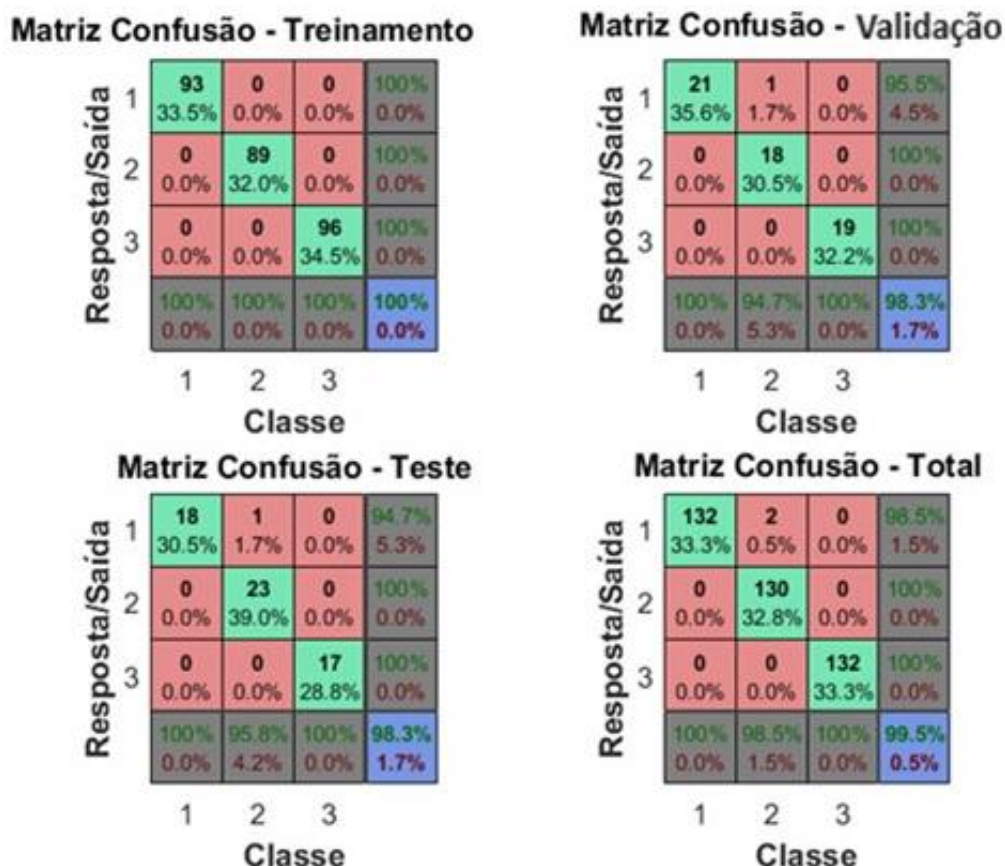


Figura 56 – Matrizes para treinamento.

A Figura 56 mostra as matrizes de confusão para treinamento, teste e validação, e os três tipos de dados combinados. As saídas da rede são os valores presentes nos quadrados verdes, os números de respostas incorretas são apresentados nos quadrados vermelhos e os quadrados azuis no canto inferior direito contém os valores de acerto, ilustrando as precisões gerais. Nas etapas de “Validação” e “Teste”, as porcentagens de erros e acertos são iguais, 98,3% de acerto e 1,7% de erro. No “Total” a porcentagem de acertos atingiu 99,5% e de erros 0,5%, atestando a efetividade do método empregado na classificação de topologias de lâmpadas LED.

## 6.3 Discussão dos Resultados

A aplicação de magnitudes de tensão fora dos limites de operação seguros definidos pelo RTQ fez com que as lâmpadas LED apresentassem comportamentos indesejáveis. Quando submetidas a tensões superiores a 220V, parte das amostras apresentaram altos níveis de DHT, até 204%, e baixo fator de potência, até 0,69. Com o aumento dos níveis de tensão as amostras

de lâmpadas de topologias *buck* e *flyback* com filtro mostraram redução de DHT e fator de potência. Já as lâmpadas de topologia *buck* sem filtro apresentaram um aumento nos mesmos parâmetros nas mesmas condições. Quando submetidas a níveis de tensões inferiores a 127V, as amostras de lâmpadas de topologias *buck* e *flyback* com filtro mostraram um aumento de DHT e fator de potência. Somente as lâmpadas de topologia *buck* sem filtro apresentaram uma redução da DHT e do fator de potência, quando comparados aos níveis de tensão nominal. A corrente harmônica apresentou níveis elevados quando submetidas a níveis de tensão mais baixos em todas as amostras. Na mesma condição, o comportamento do fluxo luminoso apresentou redução em todas as amostras. Os parâmetros IRC, eficácia luminosa e TCC permaneceram praticamente constantes frente a variação de magnitude de tensão.

De acordo com as determinações do INMETRO, Portaria nº 389 [49], as amostras de lâmpadas com filtro ensaiadas apresentaram comportamento aceitável entre os níveis de tensão nominal de 127V e 220V, tendo em vista que não é definido um valor máximo de DHT e corrente harmônica para lâmpadas de potência inferior ou igual a 25 W, apenas o valor mínimo de fator de potência de 0,7 no Item 6.4. O limite de fluxo luminoso também não é imposto para lâmpadas de potência inferior à 20W, de acordo com a Tabela 10 do Item 6.11. Os limites de potência medida (não deve exceder a potência nominal em 10%, definido no Item 6.3) e de eficácia luminosa ( $> 55 \text{ lm/W}$ ), disposto na Tabela 13 do Item 6.11 foram respeitados em todos os níveis de tensão aplicados. As amostras de lâmpadas sem filtro não atingiram as especificações determinadas pelo INMETRO entre os níveis de tensão nominal de 127V e 220V pois o limite mínimo de IRC é de 80, presente no Item 6.9.2, e as lâmpadas sem filtro atingiram valores próximos de 79. A partir das análises dos fatos apresentados, conclui-se que é de suma importância que tais limites sejam impostos pelo INMETRO com a finalidade de reduzir os níveis elevados de DHT e de corrente harmônica das lâmpadas sem filtro disponíveis no mercado brasileiro.

Através da análise dos resultados, é possível concluir que as lâmpadas LED de topologia *buck* com filtro apresentaram uma eficácia luminosa 14,27% maior, em comparação com o desempenho das lâmpadas LED de topologia *buck* sem filtro. Além disso, a média das lâmpadas de topologia *buck* sem filtro apresentaram níveis de distorção harmônica até seis vezes maiores que a média das lâmpadas de topologias *buck* com filtro, mostrando que a aplicação de filtros em circuitos eletrônicos reduz drasticamente a distorção harmônica injetada na rede e que em alguns casos melhora a qualidade do FP. Além disso, as lâmpadas de topologia *buck* sem filtro não alcançaram os níveis mínimos de IRC. O fracasso no quesito IRC se dá pelo fato de os

chips de LED utilizados possuem qualidade inferior aos demais, não estando relacionado com a baixa qualidade do driver ou com a variação da magnitude de tensão. Pensando no ponto de vista econômico do fabricante, a escolha de um driver sem filtro segue o mesmo critério da escolha dos *chips*, o preço baixo, influenciando negativamente a qualidade do produto. Portanto, as lâmpadas LED de topologia *buck* sem filtro apresentaram qualidade inferior às lâmpadas LED de topologia *buck* com filtro.

Através das Figuras 39-46, conclui-se que as lâmpadas LED de topologias *flyback* com filtro e *buck* com filtro apresentaram comportamentos similares. É possível perceber que variáveis como corrente harmônica e fator de potência apresentam comportamentos decrescentes. Parâmetros como potência e distorção harmônica decrescem até um limite e depois voltam a apresentar um comportamento crescente. Além disso, a partir da análise da média dos parâmetros obtidos, conclui-se que as amostras de lâmpadas de topologia *buck* com filtro obtiveram melhor desempenho quando comparado à topologia *flyback* com filtro, porém, ambas possuem valores medidos semelhantes entre si. Os comportamentos mais negativos das lâmpadas foram encontrados na topologia *buck* sem filtro que apresentou valores altos de DHT, corrente harmônica e não atingindo os níveis mínimos de IRC estabelecidos pelo Item 6.9.2 da Portaria nº389 [49], destoando das demais amostras, não atendendo as normas estabelecidas pelo RTQ nº 389 [49] que define os parâmetros admissíveis de qualidade para estes modelos de lâmpadas.

O modelo de rede *Feedforward* de duas camadas ocultas e saídas sigmóides se mostrou eficiente durante a classificação. O método utilizado foi útil na solução do problema proposto. O objetivo da aplicação do método é obter 3 tipos de agrupamentos: *flyback* com filtro, *buck* com filtro e *buck* sem filtro. As amostras de lâmpadas de topologia *buck* sem filtro apresentaram um comportamento que destoa das demais amostras de diferentes topologias. O trabalho mostrou que apesar de as lâmpadas com topologias *flyback* com filtro e *buck* com filtro terem apresentado comportamentos semelhantes, o método utilizado tornou possível a aplicação de uma rede neural para a classificação de topologias.

## 6.4 Conclusão

O presente capítulo apresentou a análise de resultados elaborada a partir dos ensaios efetuados, abordando os limites de parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia e a

qualidade da classificação da rede neural. Foram analisados os parâmetros: potência, fator de potência, corrente, fluxo luminoso, eficiência luminosa, temperatura de cor correlata, IRC e DHT. Além disso, foram apresentados os valores percentuais de acerto e erro, das etapas “validação”, teste e treinamento, que caracterizam a qualidade da classificação da rede neural. O capítulo 7, de título “Conclusões” irá abordar, de forma aprofundada, a conclusão do trabalho.

## 7. Conclusões

De acordo com a Figura 56, gerada pela *toolbox* NPRTOOL do MATLAB que indica o percentual de erro de 0,5% quando é avaliado o total de amostras, o resultado foi favorável, com um percentual de 99,5% de acerto na classificação. Os resultados positivos obtidos na classificação incitam a verificação da viabilidade de criação de uma ferramenta capaz de realizar diagnósticos de parâmetros de lâmpadas e de determinar os aspectos construtivos destas através de parâmetros de operação medidos, inspirando a realização de trabalhos futuros.

Lâmpadas LED de mesma potência e níveis de tensão estão sendo vendidas no mercado de iluminação e, devido ao seu aspecto construtivo, apresentam níveis de parâmetros de qualidade de energia muito diferentes. Este estudo leva o leitor a questionar se seria interessante inserir informações de parâmetros de qualidade de energia na embalagem. Pois apesar de os valores indesejados estarem dentro das normas estabelecidas pelo INMETRO, dependendo da finalidade, a qualidade do equipamento que está sendo instalado pode ser importante para o consumidor e influenciá-lo no momento da compra. Além disso a eficácia da fiscalização dos produtos disponíveis no mercado brasileiro é questionada, pois as lâmpadas de topologia *buck* sem filtro ensaiadas foram adquiridas do mercado brasileiro e são produtos certificados que não atingiram os níveis mínimos de IRC exigidos pelo INMETRO.

Os resultados obtidos através do presente trabalho contribuem para uma análise de desempenho de equipamentos de iluminação disponíveis no mercado brasileiro, apresentando uma abordagem sobre o comportamento de lâmpadas LED em condições diferentes da nominal. Em geral, os consumidores não têm informações sobre a tecnologia de construção de lâmpadas de LED e não sabem que uma aplicação massiva de dispositivos produz uma distorção maior no sistema de distribuição, o que pode causar problemas de qualidade de energia à rede elétrica. Este trabalho visa contribuir para a tecnologia de iluminação LED no que diz respeito aos aspectos de qualidade de energia e à adoção de referenciais normativos para aprovação de lâmpadas LED.

## 7.1 Trabalhos futuros

De acordo com o RAC nº. 144 [50], uma determinada quantidade de amostras de lâmpadas é submetida a testes para garantir que os equipamentos de iluminação de tecnologia LED disponíveis no mercado brasileiro atinjam os níveis mínimos de funcionamento estabelecidos pelo INMETRO. Após a aprovação do produto, a certificação é concedida para a empresa fabricante (ou distribuidora) passando a ter permissão para a comercialização do produto. A fiscalização dos produtos distribuídos pelo mercado brasileiro pode ser realizada de forma a coletar amostras em pontos de venda e as ensaiar em laboratório certificando se os limites dos parâmetros de operação da lâmpada estão dentro do que é estabelecido pelo INMETRO. Porém, amostras ensaiadas neste estudo são certificadas pelo INMETRO e foram adquiridas do mercado brasileiro de produtos de iluminação de tecnologia LED. Como foi mostrado no capítulo 6, as amostras de topologia *buck* sem filtro não atendem as determinações do INMETRO, incitando a busca por uma solução viável, econômica e de fácil aplicação. O presente estudo instiga a realização de 5 trabalhos futuros: o desenvolvimento de uma ferramenta de baixo custo, a otimização de *drivers* de lâmpadas LED, a avaliação do impacto de lâmpadas LED na rede, a revisão de Portarias nº 389 [49] e nº 144 [50] e a análise de características de partida de lâmpadas LED.

### 7.1.1 Ferramenta de baixo custo

Um dos trabalhos futuros é o desenvolvimento de uma ferramenta de baixo custo para a identificação automática de tecnologia empregada em *drivers* de lâmpadas LED e de parâmetros de qualidade de energia. O protótipo seria composto de dispositivos eletrônicos capazes de realizar a medição de parâmetros de qualidade de energia como tensão, potência, corrente harmônica, DHT e FP. O código de IA desenvolvido neste estudo poderia ser aplicado ao protótipo permitindo a classificação da topologia utilizada no *driver* da lâmpada LED, detectando informações como a utilização (ou não) de filtro e parâmetros de qualidade de energia. O protótipo viria a contribuir com a qualidade dos produtos de iluminação de tecnologia LED disponíveis no mercado brasileiro com a verificação de parâmetros de qualidade de energia identificando a condição de conformidade do produto. A ferramenta garantiria a integridade do produto e a redução de custos pois, desta forma, não existe a necessidade de danificar lâmpada para ter acesso ao *driver* e não seria necessário submeter o

produto, já certificado, à ensaios em laboratório para a medição de parâmetros de qualidade de energia, permitindo a análise do produto no próprio ponto de venda, contribuindo com a redução do número de lâmpadas LED com o selo de certificação sendo comercializados mesmo estando fora dos padrões determinados pelo INMETRO.

### 7.1.2 Otimização de *drivers* de lâmpadas LED

Outro trabalho que poderia dar seguimento a ferramenta de baixo custo é o estudo da otimização de lâmpadas LED, consistindo na elaboração de ensaios em lâmpadas LED de diferentes potências com a finalidade de adquirir dados de parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia para a captação de características de operação de diferentes lâmpadas LED, determinando a tecnologia mais eficaz e quais melhorias poderiam ser implementadas ao *driver* para a otimização do comportamento de lâmpadas LED.

### 7.1.3 Avaliação do impacto de lâmpadas LED na rede

Os altos níveis de THD e de corrente harmônica medidos no presente estudo instigam a realização de ensaios para a definição do impacto das lâmpadas LED em redes, onde seria necessário avaliar a compatibilidade eletromagnética através de ensaios. As amostras utilizadas seriam as mesmas ensaiadas no presente estudo e os ensaios seriam realizados no LABLUX, que possui uma sala blindada para a realização de testes de EMC e é equipado com equipamentos necessários para realizar ensaios com atenuação de interferências externas. O estudo serviria de base para que outros procedimentos de certificação sejam elaborados e implementados.

### 7.1.4 Revisão das portarias nº 389 e nº 144

O estudo realizado neste trabalho levantou uma questão importante, em que é possível perceber a necessidade de incluir valores mínimos de THD, corrente harmônica e fluxo luminoso para lâmpadas LED de potências inferiores a 25W. As lâmpadas na faixa de potência inferior a 25W são largamente empregadas no uso residencial e facilmente encontradas no mercado brasileiro, portanto, outra sugestão de trabalho a ser concretizado é a elaboração de

uma nova proposta de normatização de lâmpadas LED, realizando uma revisão das portarias RTQ nº 389 [49] e RAC nº. 144 [50], incluindo valores limitadores de THD, corrente harmônica e de fluxo luminoso para lâmpadas LED de potência inferior a 25 W, contribuindo para a elaboração de referenciais normativos para aprovação de lâmpadas LED.

### 7.1.5 Análise de características de partida de lâmpadas LED

Outro estudo que daria seguimento ao presente trabalho é a análise de características de partida de lâmpadas LED de diferentes tecnologias a fim de determinar as diferenças de comportamento e seus impactos na rede. No presente estudo, as lâmpadas foram ensaiadas de acordo com o estabelecido pelo INMETRO através do RTQ nº 389 [49] e do RAC nº. 144 [50], permanecendo energizadas por trinta minutos antes que as medições fossem realizadas para atingirem a estabilização de parâmetros. Portanto, os comportamentos de partida das lâmpadas LED bem como os impactos dos comportamentos não foram analisados. O estudo contribuirá para os avanços da tecnologia de iluminação LED.

## Referências Bibliográficas

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Atlas de Energia Elétrica do Brasil Eficiência energética”. [Online]. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par1\\_cap2.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap2.pdf). [Acesso em: 02-fev-2018].
- [2] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “Consumo anual de energia elétrica por classe (nacional) – 1995-2018”, *Empresa de Pesquisa Energética*, 2018. [Online]. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Consumonacionaldeenergiaelétricaporclasse-1995-2009.aspx>. [Acesso em: 03-fev-2018].
- [3] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “Nota Técnica DEA 13/15.”, *Demanda de Energia 2050*, 2016. [Online]. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-202/DEA 13-15 Demanda de Energia 2050.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-202/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf). [Acesso em: 02-fev-2018].
- [4] International Energy Agency, “Energy Efficiency 2017”, 2017. [Online]. Disponível em: <https://goo.gl/2c8v4E>. [Acesso em: 23-mar-2018].
- [5] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “Eficiência Energética e Geração Distribuída”, *Plano Decenal de Expansão de Energia 2026*, 2016. [Online]. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/topico-75/Cap9\\_Texto.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/topico-75/Cap9_Texto.pdf). [Acesso em: 20-abr-2018].
- [6] INMETRO, “Lâmpada LED”. [Online]. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/cartilhas/lampada-led/lampadaled.pdf>. [Acesso em: 23-mar-2018].
- [7] R. Petry, “Setor de lâmpadas é tomado por importações”. [Online]. Disponível em: <https://www.dci.com.br/impresso/setor-de-lampadas-e-tomado-por-importac-es-1.601897>. [Acesso em: 17-jul-2018].
- [8] U. Environment, “Accelerating the Global Adoption of ENERGY-EFFICIENT LIGHTING UN Environment-Global Environment Facility | United for Efficiency (U4E)”, 2017. [Online]. Disponível em: [http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/20406/Energy\\_efficient\\_lighting.pdf?isAllowed=y&sequence=1](http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/20406/Energy_efficient_lighting.pdf?isAllowed=y&sequence=1). [Acesso em: 14-abr-2018].
- [9] Portal Brasil, “Lâmpadas incandescentes saem do mercado a partir de julho”. [Online].

- Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/noticias/infraestrutura/2016/06/lampadas-incandescentes-saem-do-mercado-a-partir-de-julho>. [Acesso em: 02-fev-2018].
- [10] BLACK+DECKER, “Vantagens LED”. [Online]. Disponível em: <http://bdiluminacao.com.br/led/>. [Acesso em: 10-jan-2019].
- [11] led-professional, “The World leading High Accuracy Array Spectroradiometer - HAAS-2000/3000”. [Online]. Disponível em: <https://www.led-professional.com/products/led-production-test-equipment/the-world-leading-high-accuracy-array-spectroradiometer-haas-2000-3000>. [Acesso em: 14-maio-2018].
- [12] IEEE Std 100-2000, *The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms, Seventh Edition*. 2000, p. 1–1362.
- [13] Á. Borbély, Á. Sámson, e J. Schanda, “The concept of correlated colour temperature revisited”, *Color Res. Appl.*, vol. 26, nº 6, p. 450–457, 2001.
- [14] EMPALUX, “Informações Luminotécnicas”. [Online]. Disponível em: <http://www.empalux.com.br/?a1=l>. [Acesso em: 28-abr-2018].
- [15] Y. Wang *et al.*, “Conducted-emission modeling for a switched-mode power supply (SMPS)”, in *2015 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility and Signal Integrity, EMCSI 2015*, 2015, p. 314–319.
- [16] Z. Sha, X. Wang, Y. Wang, e H. Ma, *Optimal Design of Switching Power Supply*, 1º ed. John Wiley & Sons Singapore Pte, 2015.
- [17] B. Keogh e I. Cohen, “Flyback transformer design considerations for efficiency and EMI”, in *Power Supply Design Seminar*, 2016.
- [18] M. Brown, *Power Supply Cookbook*, 2º ed. Newnes, 2001.
- [19] V. Vlatković, D. Borojević, e F. C. Lee, “Input filter design for power factor correction circuits”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 11, nº 1, p. 199–205, 1996.
- [20] K. Billings e T. Morey, *Switchmode Power Supply Handbook*, 3º ed. McGraw-Hill Education, 2011.
- [21] R. Erickson, M. Madigan, e S. Singer, “Design of a simple high-power-factor rectifier based on the flyback converter”, in *Fifth Annual Proceedings on Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1990, p. 792–801.
- [22] P. Meng, X. Wu, J. Yang, H. Chen, e Z. Qian, “Analysis and design considerations for EMI and losses of RCD snubber in flyback converter”, in *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2010, p. 642–647.
- [23] L. Li, L. Wang, C. Lv, e C. Sun, “A simulation of conducted EMI in flyback converters”, in *2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference -*

- ECCE Asia, IPERC 2012*, 2012, vol. 3, p. 1794–1798.
- [24] IEC, “IEC 61000-3-2:2014”, 2014. [Online]. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/publication/4149>. [Acesso em: 28-maio-2018].
  - [25] P. Zumel, O. García, J. A. Oliver, e J. A. Cobos, “Differential-mode EMI reduction in a multiphase DCM flyback converter”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, nº 8, p. 2013–2020, 2009.
  - [26] R. E. Bellman, *An Introduction to Artificial Intelligence: Can Computers Think?* Thomson Course Technology, 1978.
  - [27] K. T. Igulu, Z. P. Piah, e P. O. Asagba, “An Investigation into the Conceptual Controversies between Artificial Intelligence and Computational Intelligence”, *African J. Comput. ICT*, vol. 8, nº 2, p. 115–120, 2015.
  - [28] IEEE, “What is CI”. [Online]. Disponível em: <https://cis.ieee.org/about/what-is-ci>. [Acesso em: 28-ago-2018].
  - [29] J. M. Keller, D. Liu, e D. B. Fogel, *Fundamentals of Computational Intelligence: Neural Networks, Fuzzy Systems, and Evolutionary Computation*. John Wiley & Sons, 2016.
  - [30] F. Rosenblatt, “The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain”, *Psychol. Rev.*, vol. 65, nº 6, p. 1–23, 1958.
  - [31] D. Anderson e G. McNeil, “Artificial neural networks technology”, 1992.
  - [32] M. T. Hagan, H. B. Demuth, M. H. Beale, e O. de Jesus, *Neural Network Design*. PWS Publishing Company, 1996.
  - [33] H. Demuth e M. Beale, “Neural Network Toolbox User’s Guide”, 2000.
  - [34] M. A. Gluck e C. E. Myers, *Gateway to memory: An introduction to neural network modeling of the hippocampus and learning*, vol. 45. MIT Press, 2001.
  - [35] J. Sarangapani, *Neural Network Control of Nonlinear Discrete-Time Systems*. Rolla, Missouri: CRC Press, 2006.
  - [36] I. A. de Q. Neto, “Aplicação do Método de Região de Confiança ao algoritmo Backpropagation”, 1995. .
  - [37] S. Ramaswamy *et al.*, “Multiclass cancer diagnosis using tumor gene expression signatures”, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 98, nº 26, p. 15149–15154, 2001.
  - [38] M. Taniguchi, M. Haft, J. Hollmkn, e V. Tresp, “Fraud Detection in Communication Networks Using Neural and Probabilistic Methods”, in *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP '98*, 1998, p. 1241–1244.
  - [39] C. J. Devi, B. S. P. Reddy, K. V. Kumar, B. M. Reddy, e N. R. Nayak, “ANN Approach

- for Weather Prediction using Back Propagation”, *Int. J. Eng. Trends Technol.*, vol. 3, nº 1, p. 19–23, 2012.
- [40] R. Battiti e F. Masulli, “BFGS Optimization for Faster and Automated Supervised Learning”, in *International Neural Network Conference*, 2013, p. 757–760.
- [41] V. Venugopal e W. Baets, “Neural Networks and Statistical Techniques in Marketing Research”, *Mark. Intell. Plan.*, vol. 12, nº 7, p. 30–38, 2002.
- [42] I. B. Sánchez, I. D. Espinós, L. M. Sarrión, A. Q. López, e I. N. Burgos, “Clients segmentation according to their domestic energy consumption by the use of self-organizing maps”, in *2009 6th International Conference on the European Energy Market, EEM 2009*, 2009, p. 1–6.
- [43] K. Probst, L. Levin, E. Peterson, A. Lavie, e J. G. Carbonell, “MT for Minority Languages Using Elicitation-Based Learning of Syntactic Transfer Rules”, *Mach. Transl.*, vol. 17, nº 4, p. 225–270, 2002.
- [44] Z. Zhang, F. Weninger, M. Wöllmer, e B. Schuller, “Unsupervised learning in cross-corpus acoustic emotion recognition”, in *2011 IEEE Workshop on Automatic Speech Recognition and Understanding, ASRU 2011, Proceedings*, 2011, p. 523–528.
- [45] Y. Lv, Y. Duan, W. Kang, Z. Li, e F. Wang, “Traffic Flow Prediction With Big Data”, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, nº 2, p. 865–873, 2015.
- [46] V. Gullapalli, J. A. Franklin, e H. Benbrahim, “Acquiring Robot Skills via Reinforcement Learning”, *IEEE Control Syst.*, vol. 14, nº 1, p. 13–24, 1994.
- [47] “Induspar”. [Online]. Disponível em: <https://www.induspar.com/lampadas/bulbo/lampadas-led-bulbo>. [Acesso em: 29-set-2018].
- [48] INMETRO, “Requisitos Gerais de Certificação de Produtos - Portaria nº 118, de 06 de março de 2015”, 2015. [Online]. Disponível em: [www.INMETRO.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002226.pdf](http://www.INMETRO.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002226.pdf). [Acesso em: 23-mar-2018].
- [49] INMETRO, “Regulamento Técnico da Qualidade para Lâmpadas Led com Dispositivo de Controle Integrado à Base - Portaria n.º 389, de 25 de agosto de 2014.”, 2014. [Online]. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002154.pdf>. [Acesso em: 23-mar-2018].
- [50] INMETRO, “Requisitos de Avaliação da Conformidade para Lâmpadas Led com Dispositivo Integrado à Base - Portaria nº 144, de 13 de março de 2015”, 2015. [Online].

- Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002235.pdf>. [Acesso em: 23-mar-2018].
- [51] INMETRO, “O INMETRO e a RBMLQ-I versão 2008”. [Online]. Disponível em: [http://www.inmetro.gov.br/portallrbmlq/Documentos\\_Disponiveis/O\\_INMETRO\\_e\\_a\\_RBMLQ-I\\_versão2008.doc](http://www.inmetro.gov.br/portallrbmlq/Documentos_Disponiveis/O_INMETRO_e_a_RBMLQ-I_versão2008.doc). [Acesso em: 23-mar-2018].
- [52] INMETRO, “O que é o Inmetro”. [Online]. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/INMETRO/oque.asp>. [Acesso em: 23-mar-2018].
- [53] ABNT, “Missão, Visão e Valores”. [Online]. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/abnt/missao-visao-e-valores>. [Acesso em: 28-mar-2018].
- [54] ABNT, “Definição”. [Online]. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/normalizacao/o-que-e/o-que-e>. [Acesso em: 28-mar-2018].

## Anexo A – SINMETRO, CONMETRO e INMETRO

Com a finalidade de formular e executar a política nacional de metrologia, normalização e qualidade industrial e certificação de qualidade de produtos e serviços, a Lei nº 5.966 instituiu o SINMETRO. Integram o SINMETRO todas as entidades que possuam no seu escopo de atuação atividades de metrologia, normalização técnica e avaliação de conformidade, ancoradas nas diretrizes e políticas emanadas do CONMETRO, definido na Lei como órgão normativo do Sistema, e nos processos e procedimentos estabelecidos pelo INMETRO, autarquia vinculada ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, que é o órgão executivo central do Sistema e Secretaria Executiva do CONMETRO, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), entre outras [51]. A Figura 57 mostra a organização das entidades, onde SBN é o Sistema Brasileiro de Normalização e CBN é o Comitê Brasileiro de Normalização.

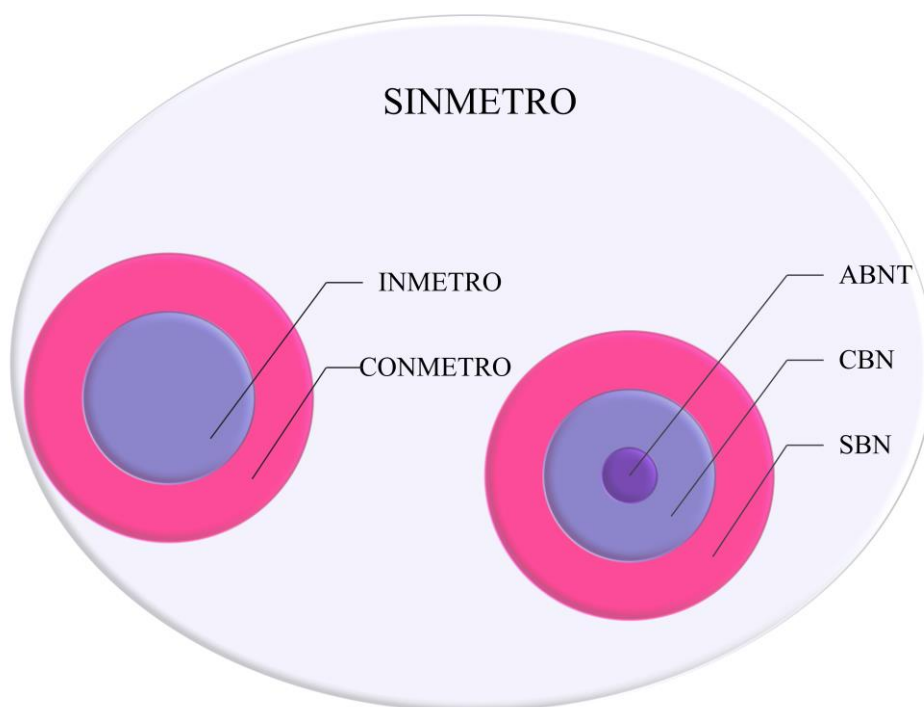


Figura 57 - Organograma parcial do SINMETRO.

Fonte: Autoria Própria.

O INMETRO é um órgão que tem por objetivo fortalecer as empresas nacionais, aumentando sua produtividade por meio da adoção de mecanismos destinados à melhoria da qualidade de produtos e serviços. Sua missão é prover confiança à sociedade brasileira nas medições e nos produtos, por meio da metrologia e da avaliação da conformidade, promovendo a harmonização das relações de consumo, a inovação e a competitividade do País. Dentre as competências e atribuições do INMETRO, destacam-se: elaborar e expedir regulamentos técnicos; manter e conservar os padrões das unidades de medida; executar, coordenar e supervisionar as atividades de Metrologia Legal em todo o território nacional [52].

A ABNT é um órgão privado, mantido com recursos da contribuição dos seus associados e do Governo Federal, que cria e atualiza as normas técnicas que asseguram as características desejáveis de produtos, serviços, sistemas e tecnologias. Sua missão é prover a sociedade brasileira de conhecimento sistematizado, por meio de documentos normativos, que permita a produção, a comercialização e o uso de bens e serviços de forma competitiva e sustentável nos mercados interno e externo, contribuindo para o desenvolvimento científico e tecnológico, proteção do meio ambiente e defesa do consumidor [53]. Dentre as competências e atribuições da ABNT, a elaboração de normas e a representação do Brasil nos foros internacionais e regionais de normalização se destacam.

As definições de normas técnicas e de regulamentos técnicos por vezes se confundem. Normas Técnicas, designadas Normas Brasileiras (NBR), cuja aplicação não se configura como uma obrigação, são documentos estabelecidos por consenso e aprovados por um organismo reconhecido, que fornece regras, diretrizes ou características mínimas para atividades ou para seus resultados, visando à obtenção de um grau ótimo de ordenação em um dado contexto [54] e são elaboradas pela ABNT. Regulamento Técnico, por vezes designado Portaria e elaborado pelo INMETRO, é o ato normativo de caráter compulsório, contendo prescrições legislativas, regulatórias ou administrativas, e que estatui características técnicas para um produto ou serviço, emanado de autoridade estatal com competência específica para editá-lo, respeitadas as normas aprovadas pelo CONMETRO, cuja observância é obrigatória. Juntos, fornecem a base para a melhoria da qualidade de processos e produtos e facilitam o comércio. Devido a não obrigatoriedade de cumprimento das normas ABNT, neste estudo serão contempladas apenas as normas técnicas estabelecidas pelo INMETRO.

O INMETRO, percebendo o volume de lâmpadas LED sem qualidade inserido no mercado Brasileiro e a ausência de regulamentos técnicos para tais produtos, verificou a

necessidade da criação de normas e padrões a serem seguidos pelas empresas importadoras e fabricantes de lâmpadas LED e da determinação de datas compulsórias e requisitos de fabricação, importação e comercialização de lâmpadas LED de até 60W, com o intuito de fornecer produtos de qualidade, seguros e eficazes aos consumidores criando portarias, baseando-se em normas e legislações nacionais e internacionais, que definem limites de características de operação do produto, proporcionando ao consumidor uma compra consciente, através da disponibilização de informações técnicas do produto que está sendo adquirido.

## A.1 Portarias: definições e requisitos

A norma intitulada "Requisitos Gerais de Certificação de Produto" pela "Portaria" nº. 118, em 6 de março de 2015 [48] estabeleceu os requisitos gerais para a certificação do produto, comuns a todos os programas de avaliação de conformidade que utilizam o mecanismo de certificação de produtos. A norma intitulada "Regulamento Técnico de Qualidade" pela Portaria nº. 389, em 25 de agosto de 2014 [49] estabeleceu os requisitos que devem ser atendidos por lâmpadas LED, de até 60W, sobre eficiência energética e segurança. A norma intitulada "Requisito de Avaliação de Conformidade" pela "Portaria" nº. 144, em 25 de agosto de 2014 [50] estabeleceu os critérios para o programa de avaliação da conformidade de lâmpadas LED, de até 60W, através da certificação, com foco no desempenho, segurança elétrica e compatibilidade eletromagnética, mostrado pela Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) e pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE).

A Portaria nº. 389 [49] define o Regulamento Técnico de Qualidade (RTQ) para Lâmpadas LED com Dispositivo de Controle Integrado à base ou corpo constituindo uma peça única e não destacável e destinadas à operação na CA de 60 Hz, para tensões nominais de 127 V e/ou 220 V, faixas de tensão que as cobrem, em corrente contínua, com proteção contra sobretensão, tensão de alimentação até 250 V, destinadas a uso doméstico e similar, com potência nominal até 60 W. De acordo com a portaria, a lâmpada LED com dispositivo de controle embutido pode ser dividida em quatro partes: a primeira, responsável pela transformação de energia elétrica em luz, é composta de um ou mais LEDs, a segunda é composta de lentes ou difusores, a terceira parte é o dispositivo de controle, composto de circuitos eletrônicos responsáveis pelo fornecimento adequado de tensão e controle da corrente

elétrica que flui no LED e a última parte consiste em uma ou duas bases responsáveis pelo contato entre a lâmpada e o circuito de fornecimento de eletricidade.

O RTQ também define que a tensão de teste das lâmpadas LED com dispositivo de controle embutido deve ter a tensão nominal informada. No caso de uma faixa de tensão que cubra as duas voltagens oficiais brasileiras, 127 V e 220 V, as medições devem ser feitas em ambos. Além disso, estabelece que as lâmpadas LED com dispositivo de controle integrado devem operar em tensões entre 92% e 106% da tensão de alimentação nominal. O tempo necessário para a estabilização de uma lâmpada LED deve ser de no máximo 2 horas. A estabilização é alcançada quando a variação de pelo menos três medições sucessivas de emissão de luz e potência elétrica em um intervalo de 15 minutos é menor que 0,5%. A medição das grandezas fotométricas, tais como o fluxo luminoso, o IRC e o ângulo de um feixe luminoso, das lâmpadas sob ensaio devem ser realizadas através de uma esfera integradora ou um goniofotômetro.

A energia consumida pela lâmpada LED não deve exceder a potência nominal declarada de mais de 10%. Para lâmpadas LED com potência nominal declarada de 5 W a 25 W, o Fator de Potência (FP) deve ser maior ou igual a 0,70 e os limites de corrente harmônica não são definidos. A TCC de uma lâmpada LED é calculada a partir de medições de distribuição espectral ou coordenadas de cromaticidade sem sazonalidade, de acordo com a norma IES LM-79-08. Os valores de TCC obtidos são classificados em categorias, conforme mostrado na Tabela 6, de acordo com ANSI C78.377. O valor de TCC obtido de uma lâmpada LED não pode exceder a tolerância da categoria indicada pelo fornecedor responsável. O fluxo luminoso inicial medido de uma lâmpada LED não pode ser inferior a 90 % do fluxo luminoso nominal declarado e deve manter o valor declarado pelo fabricante por pelo menos 70% de seu tempo de vida útil e o valor mínimo de fluxo luminoso não é definido para lâmpadas omnidirecionais de potência inferior a 20 W. A eficácia luminosa inicial medida deve atingir o valor mínimo de 55lm/W para lâmpadas de potência inferior a 15W e um valor mínimo de 60lm/W para lâmpadas de potência igual ou superior a 15 W.

Tabela 6 – Classificação de TCC em categorias.

| <b>TCC Nominal (K)</b> | <b>TCC Tolerância (K)</b> |
|------------------------|---------------------------|
| 2 700                  | 2 725 ± 145               |
| 3 000                  | 3 045 ± 175               |
| 3 500                  | 3 465 ± 245               |
| 4 000                  | 3 985 ± 275               |
| 4 500                  | 4 503 ± 243               |
| 5 000                  | 5 029 ± 283               |

A Portaria nº. 144 [50] define os Requisitos de Avaliação da Conformidade (RAC) para lâmpadas LED com dispositivo integrado à base, através da certificação, com foco no desempenho, segurança elétrica e compatibilidade eletromagnética, evidenciados por meio da ENCE, tipo de Selo de Identificação da Conformidade que apresenta aos consumidores informações técnicas e de eficiência energética do objeto, atendendo aos requisitos do RTQ para o objeto e ao PBE. Estes requisitos se aplicam às lâmpadas LED com dispositivo integrado à base ou corpo constituindo uma peça única, não destacável, sendo destinadas para operação em rede de distribuição de corrente alternada de 60 Hz, para tensões nominais de 127 V e/ou 220 V, ou em corrente contínua em qualquer faixa de tensão.

O RAC define as informações que devem ser fornecidas nos informativos técnicos, como código do produto, a potência nominal (W), fluxo luminoso (lm), temperatura de cor correlata (K), fator de potência, tensão de operação (V), índice de reprodução de cores, fotos externas e internas do objeto (corpo, LED e o dispositivo de controle), bem como da embalagem, já com o protótipo da ENCE prevista, relatório do ensaio IES LM80 dos LED utilizados nas lâmpadas, especificação do capacitor eletrolítico utilizado, *DataSheet/part number* de todos os componentes eletrônicos da lâmpada LED e Curva de “*Life time*” por temperatura dos capacitores eletrolíticos, se aplicável. O RAC também disponibiliza os modelos de selo de identificação da conformidade, planilha de especificações técnicas, lista os tipos de ensaio a serem realizados, número de amostras a serem disponibilizadas pelo fabricante, a quantidade de amostras necessária para cada tipo de ensaio, critérios para a manutenção do fluxo luminoso.

A Tabela 7 mostra os limites de parâmetros luminotécnicos e de qualidade de energia estabelecidos pelas portarias RTQ e RAC, que se aplicam as amostras de lâmpadas utilizadas neste trabalho, de potência inferior a 20 W.

Tabela 7 – Limites de parâmetros estabelecidos pelas portarias RTQ e RAC.

|                                      |                                                                              |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Potência Medida (W)</b>           | Não deve exceder a potência nominal em 10%                                   |
| <b>FP</b>                            | $\geq 0,7$                                                                   |
| <b>Corrente Harmônica (mA)</b>       | Sem limite definido para lâmpadas de potência inferior a 25W                 |
| <b>Fluxo Luminoso (lm)</b>           | Sem limite definido para lâmpadas omnidirecionais de potência inferior a 20W |
| <b>Eficácia Luminosa (EL) (lm/W)</b> | Se $P < 15W$ , $EL > 55lm/W$<br>Se $P \geq 15W$ , $EL > 60lm/W$              |
| <b>IRC (K)</b>                       | $> 80$                                                                       |
| <b>DHT</b>                           | Sem limite definido para lâmpadas de potência inferior a 25W                 |