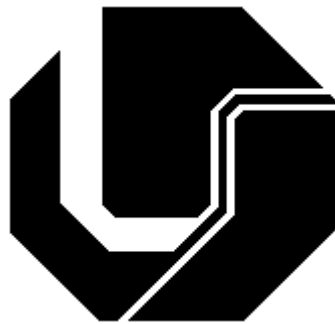


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**NOVA TOPOLOGIA DE REATOR ELETRÔNICO  
UTILIZADO PARA ACIONAR UMA OU MAIS LÂMPADAS  
HPS COM FORMA DE ONDA DE TENSÃO SINTETIZADA.**

**Diógenes Simão Rodovalho**

**Janeiro de 2009**

**Diógenes Simão Rodvalho**



**NOVA TOPOLOGIA DE REATOR ELETRÔNICO UTILIZADO PARA  
ACIONAR UMA OU MAIS LÂMPADAS HPS COM FORMA DE ONDA DE  
TENSÃO SINTETIZADA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação  
em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de  
Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do  
título de mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Eletrônica de Potência.

Orientador: Professor Dr. João Batista Vieira Junior.

Uberlândia

2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

R695n Rodovalho, Diógenes Simão, 1981-

*Nova topologia de reator eletrônico utilizado para acionar uma ou mais lâmpadas HPS com forma de onda de tensão sintetizada / Diógenes Simão Rodovalho. - 2009.*

85 f. : il.

Orientador: João Batista Vieira Junior.

*Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.*

Inclui bibliografia.

1. Eletrônica de potência - Teses. I. Vieira Júnior, João Batista. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.391

---

À minha esposa, que sempre esteve ao meu lado.  
À meu pais, que tanto me incentivaram neste trabalho.  
A meus amigos.  
À Mariana por me alegrar todos os dias.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que de qualquer forma contribuíram para o desenvolvimento e conclusão desse projeto.

Agradeço aos professores que fazem parte do grupo de Eletrônica de Potência: Prof. Ernane Antônio Alves Coelho, Prof. Luiz Carlos de Freitas, Prof. Luiz Carlos Gomes de Freitas, Prof. Valdeir José Farias, Prof. Aniel Silva de Moraes. Pela ajuda e suporte com relação a questões técnicas relativas a este projeto, em especial ao Prof. João Batista Vieira Jr pela enorme dedicação que tem para com os alunos do grupo de Eletrônica de Potência e ao Prof. Fábio Vincezi Romualdo da Silva pelo incentivo e ajudas no desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais professores

Aos colegas do grupo de Eletrônica de Potência, pelo companheirismo incentivo nos momentos difíceis e pela ajuda nos momentos de dúvidas, em especial a Jonas Reginaldo de Britto, Fernando Nunes Marques, Filipe de Nassau e Braga, Emmanuel Cordeiro Dias, Henrique José Avelar.

A Universidade Federal de Uberlândia que foi minha segunda casa durante oito anos e a Capes pela bolsa que recebi durante o mestrado.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma nova topologia de reator eletrônico utilizado no acionamento de uma ou mais lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão, ideal para luminárias com uma ou mais lâmpadas, geralmente, utilizadas em iluminação pública e privada. Neste trabalho, as lâmpadas HID (High Intensity Discharge) são alimentadas com formas de onda de tensão sintetizadas com frequência da fundamental inferior a 1 kHz de modo a evitar a ressonância acústica e ao mesmo tempo proporcionar reduzida variação do fluxo luminoso. Foram apresentados estudos sobre a lâmpada *HPS*, tendo como ênfase a ressonância acústica, além dos reatores eletrônicos, operando em altas e em baixas frequências, e a classificação dos reatores.

Um estudo sobre injeção de forma de onda sintetizada contendo a terceira harmônica, e os resultados obtidos com o reator proposto.

**PALAVRAS-CHAVES:** Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão, Reatores Eletrônicos, Ressonância Acústica.

## **ABSTRACT**

The objective of this work is to present a new electronic ballast topology used to supply one or more high pressure sodium lamps. It is ideal for poles luminaries with one or more HPS lamps used in private and public lighting. The proposed ballast supplies the lamps using synthesized waveform with fundamental frequency below 1 kHz in order to avoid acoustic resonance and minimize luminous flux oscillation. Studies on HPS lamps have been done, emphasizing the acoustic resonance problem, in addition to the electronic ballast, operating in high and low frequencies, and classification of reactors.

A study on injection of synthesized waveform with the third harmonic, and the results obtained with the proposed electronic ballast are also presented.

**KEYWORDS:** High Pressure Sodium Lamps, Electronics Ballast, Acoustic Resonance.

## SUMÁRIO

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| CAPÍTULO 1 ESTUDO SOBRE A LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO DE ALTA PRESSÃO - HPS. .... | 19 |
| 1.1 - Introdução.....                                                           | 19 |
| 1.2 - Estrutura e princípio de funcionamento .....                              | 20 |
| 1.3 - Características ópticas .....                                             | 22 |
| 1.3.1 - Conceitos de grandezas ópticas.....                                     | 22 |
| 1.3.2 - Características da lâmpada de vapor de sódio de alta pressão.....       | 24 |
| 1.4 - Características elétricas .....                                           | 27 |
| 1.4.1 - Limites de Operação.....                                                | 28 |
| 1.5 - Acionamento da lâmpada HPS .....                                          | 30 |
| 1.5.1 - Ignição da lampada HPS.....                                             | 31 |
| 1.5.2 - Estabilização do arco.....                                              | 35 |
| 1.6 - Ressonância acústica .....                                                | 35 |
| 1.7 - Conclusão .....                                                           | 40 |
| CAPÍTULO 2 INJEÇÃO DE FORMA DE ONDAS SINTETIZADAS .....                         | 42 |
| 2.1 - Introdução.....                                                           | 42 |
| 2.2 - Injeção de forma de onda sintetizadas em lâmpadas HPS .....               | 42 |
| 2.2.1 - Injeção de harmônicas via Filtros LC.....                               | 43 |
| 2.2.2 - Injeção de Harmônicas via PWM .....                                     | 44 |
| 2.3 - Novo reator eletrônico proposto para acionamento de lâmpadas HPS.....     | 46 |
| 2.3.1 - Estratégia de controle .....                                            | 47 |
| 2.3.2 - Princípios Fundamentais de Operação do REator Proposto .....            | 50 |
| 2.4 - Geração do sinal de referência.....                                       | 53 |
| 2.5 - Circuito Lâmpada e Ignitor .....                                          | 53 |
| 2.5.1 - Equações principais do projeto .....                                    | 55 |
| 2.6 - Conclusão .....                                                           | 58 |
| CAPÍTULO 3 EXEMPLO DE PROJETO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....                  | 60 |
| 3.1 - Introdução.....                                                           | 60 |

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 3.2 - Exemplo de projeto .....                               | 60 |
| 3.2.1 - Cálculo do reator eletrônico.....                    | 60 |
| 3.2.2 - Cálculo dos Componentes do Circuito de Ignição.....  | 61 |
| 3.3 - Simulação do Reator Eletrônico e Circuito Ignitor..... | 63 |
| 3.4 - Resultados experimentais .....                         | 66 |
| 3.4.1 - Resultados das lâmpadas <i>HPS</i> .....             | 69 |
| 3.5 - Conclusão .....                                        | 75 |
| CAPÍTULO 4 Conclusão Geral E proposta de continuidade.....   | 76 |
| 4.1 - Conclusão Geral.....                                   | 76 |
| 4.2 - Proposta de continuidade.....                          | 76 |
| Referências bibliográficas .....                             | 78 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1: Partes que compõem a lâmpada de vapor de sódio 150 W [3].....                                                      | 20 |
| Figura 1.2: Espectro eletromagnético e espectro visível.....                                                                   | 22 |
| Figura 1.3: Sensibilidade do olho humano em relação às cores e à luminosidade [2] .....                                        | 23 |
| Figura 1.4: Espectros de lâmpadas de vapor de sódio para pressões 15kPa (superior) e 65kPa (inferior).....                     | 25 |
| Figura 1.5: Comparação da eficiência energética de vários tipos de lâmpadas. ....                                              | 26 |
| Figura 1.6: Curva característica da lâmpada[4].....                                                                            | 27 |
| Figura 1.7: Diagrama quadrilátero de uma lâmpada <i>HPS</i> -400W[4,6].....                                                    | 29 |
| Figura 1.8: Curva característica tensão-corrente da lâmpada <i>HPS</i> [4] .....                                               | 31 |
| Figura 1.9: Curva característica da tensão aplicada a lâmpada em função do tempo[4] .....                                      | 32 |
| Figura 1.10: Curva de tensão de partida em função da temperatura na lâmpada <i>HPS</i> [4].....                                | 34 |
| Figura 1.11: Modo de controle necessário a partir da partida da lâmpada fria[10]. ....                                         | 34 |
| Figura 1.12: Fotografia do arco de uma lâmpada <i>HPS</i> , (a)- com ressonância acústica e (b) sem ressonância acústica. .... | 36 |
| Figura 1.13: Faixas de ocorrência da ressonância acústica em uma lâmpada <i>MV</i> -70W <i>PHILIPS</i> [86]. ....              | 37 |
| Figura 1.14: Faixas de ocorrência da ressonância acústica em lâmpadas <i>HPS</i> da <i>PHILIPS</i> <sup>®</sup> [4, 6]. ....   | 38 |
| Figura 1.15: Fotografias do arco na lâmpada para diferentes frequências.....                                                   | 39 |
| Figura 2.1: Diagrama do circuito utilizado pela técnica proposta por [14, 20].....                                             | 43 |
| Figura 2.2: Comandos para o inversor com a técnica de injeção de harmônicas e as formas de tensão [6, 14, 20, 57, 60, 61]..... | 44 |
| Figura 2.3: Diagrama do circuito que utiliza a técnica de injeção de harmônicas apresenta em [6, 57, 60, 61].....              | 45 |
| Figura 2.4: Forma de onda de referência para o <i>PWM</i> [6, 57, 60, 61].....                                                 | 45 |
| Figura 2.5: Reator Eletrônico Proposto para o acionamento de uma ou mais lâmpadas <i>HPS</i> [59, 59, 62].....                 | 46 |
| Figura 2.6- Diagrama de blocos da estratégia de controle [58].....                                                             | 48 |
| Figura 2.7: Seguidor de tensão (buffer) [76]. ....                                                                             | 48 |

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.8: Seguidor de tensão com saída push pull a transistor.....                                                            | 49 |
| Figura 2.9: Amplificador não inversor [76] .....                                                                                | 50 |
| Figura 2.10- Reator proposto com circuito de controle [76]......                                                                | 50 |
| Figura 2.11: (a) Tensão cresce no capacitor $C_P$ e (b) Tensão decresce no capacitor $C_P$ [76]. .                              | 51 |
| Figura 2.12: Relação entre as tensões nos capacitores e as fontes de alimentação [76]. .....                                    | 52 |
| Figura 2.13: (a) $S_1$ estiver conduzindo; (b) $S_2$ estiver conduzindo [76]......                                              | 53 |
| Figura 2.14: Ligação de lâmpadas e ignitores no reator proposto.[58,59,62] .....                                                | 54 |
| Figura 2.15: Formas de onda de tensão do ignitor aplicado em uma lâmpada HPS de 150W da PHILIPS® [58]. .....                    | 55 |
| Figura 2.16: Formas de Onda do Circuito de Ignição: (a)-Circuito; (b)- Formas de onda. ....                                     | 57 |
| Tabela 3-1: Especificação do Projeto.....                                                                                       | 60 |
| Figura 3.1- Circuito para simulação do ignitor.....                                                                             | 64 |
| Figura 3.2- Pulsos gerados pelo ignitor e tensão e corrente no capacitor C1.....                                                | 64 |
| Figura 3.3- Circuito do reator eletrônico simulado.....                                                                         | 65 |
| Figura 3.4- Tensão , corrente e potência na lâmpada. ....                                                                       | 65 |
| Figura 3.5- Espectro da tensão e corrente na resistência equivalente da lampada. ....                                           | 66 |
| Tabela 3-2: Valor dos Componentes Utilizados no Protótipo [76]. ....                                                            | 66 |
| Figura 3.1 – CH-A Sinal de referência, CH-B, sinal amplificado na lâmpada, sinal inferior..                                     | 67 |
| Figura 3.2- Espectro harmônico do sinal de referência. ....                                                                     | 68 |
| Figura 3.3: THD do sinal de referência amplificado ( $V_{CO}$ ) para diferentes condições de carga [58] .....                   | 68 |
| Figura 3.4: Curva do rendimento em função da potência de saída.....                                                             | 68 |
| Figura 3.5: Curva do ganho em dB em função da frequência. ....                                                                  | 69 |
| Figura 3.6: Formas de onda de tensão (100 V/div) e forma de onda de corrente (2 A/div) na lâmpada HPS de 100W da PHILIPS®. .... | 70 |
| Figura 3.7: Formas de onda de tensão (100 V/div) e forma de onda de corrente (2 A/div) na lâmpada HPS de 150W da PHILIPS® ..... | 70 |
| Figura 3.8: Formas de onda de tensão (100 V/div) e forma de onda de corrente (2 A/div) na lâmpada HPS de 250W da PHILIPS® ..... | 70 |
| Figura 3.9: Formas de onda de tensão (100 V/div) e forma de onda de corrente (2 A/div) na lâmpada HPS de 400W da OSRAM® . ....  | 71 |

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.10 : Canal A-Vermelho- Tensão sobre a lâmpada 100W, Canal B-Azul-Corrente na lâmpada 100W, PHILIPS®. ....      | 71 |
| Figura 3.11 : Canal A-Vermelho- Tensão sobre a lâmpada 100W, Canal B-Azul-Corrente na lâmpada 100W, PHILIPS®. ....      | 72 |
| Figura 3.12 Canal 1-Amarelo - Tensão sobre a lâmpada 250W, Canal 2-Azul-Corrente na lâmpada 250W, PHILIPS®. ....        | 72 |
| Figura 3.13: Canal 1- Amarelo – Tensão sobre a lâmpada de 400W, Canal 2 – Azul – Corrente na lampada 400W, OSRAM®. .... | 72 |
| Figura 3.14: Tensão e corrente na chave S1 e corrente no diodo D4. ....                                                 | 73 |
| Figura 3.15: Tensão gate-emissor da chave S2 e corrente na lampada de 100W OSRAM® ...                                   | 73 |
| Figura 3.16: Tensão gate-emissor da chave S2 e corrente na lampada de 100WOSRAM® ....                                   | 73 |
| Figura 3.17: Fotos do tubo de descarga da lampadas de 100W(a), 150W(b) e 250W(c). ....                                  | 74 |
| Figura 3.18: Fotografia do conversor funcionando com duas lâmpadas HPS de 100W e 150W<br>.....                          | 74 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3-1: Especificação do Projeto.....                            | 60 |
| Tabela 3-2: Valor dos Componentes Utilizados no Protótipo [76]. .... | 66 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

|                 |                                                                   |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------|
| $\infty$        | Infinito                                                          |
| $\mu\text{C}$   | Microcontrolador                                                  |
| A               | Ampere                                                            |
| AD              | Analógico                                                         |
| Amp. Op.        | Amplificador Operacional                                          |
| BIBRED          | Integrated with Buck Rectifier / Energy Storage / DC-DC Converter |
| CA              | Corrente Alternada                                                |
| CC              | Corrente Contínua                                                 |
| cd              | Candela                                                           |
| $\text{cd/m}^2$ | Candela/metro quadrado                                            |
| CFP             | Correção do Fator de Potência                                     |
| $C_p$           | Capacitor Paralelo                                                |
| CPU             | Unidade Central de Processamento                                  |
| $C_s$           | Capacitor Série                                                   |
| DA              | Conversor Digital-Analógico                                       |
| dB              | Decibel                                                           |
| EMI             | Interferência Eletromagnética                                     |
| F               | Faraday                                                           |
| GE              | General Electric                                                  |
| GW              | Giga Watts                                                        |
| H               | Henry                                                             |
| HID             | High Intensity Discharge                                          |
| HPM             | High Pressure Mercury                                             |
| HPS             | High Pressure Sodium                                              |
| Hz              | Hertz                                                             |
| IEC             | <i>International Electrotechnical Commission</i>                  |
| IRC             | Índice de Reprodução de cores                                     |
| K               | Kelvin                                                            |
| kHz             | Kilo Hertz                                                        |

|            |                                   |
|------------|-----------------------------------|
| kPa        | Kilo Pascal                       |
| kWh/ano    | Kilo Wattas hora/ano              |
| $L$        | Indutor                           |
| lm         | Lumens                            |
| lm/W       | Lumens/Watt                       |
| lx         | Lux                               |
| MTBF       | Mean Time Between Fail            |
| NBR        | Normas Brasileiras                |
| nm         | Nano metros                       |
| °C         | Graus Celsius                     |
| Pa         | Pascal                            |
| $Q$        | Fator de qualidade                |
| RA         | Ressonância acústica              |
| RFI        | Interferencia de Radio-Freqüência |
| $THD$      | Taxa de distorção harmonica       |
| V          | Volts                             |
| ZCS        | Zero Current Switting             |
| ZVS        | Zero Voltage Switting             |
| $\omega_0$ | Freqüência de ressonância         |

## INTRODUÇÃO GERAL

A história da iluminação moderna teve início em meados do século XIX, quando, em 1879, Thomas Edison criou a primeira lâmpada incandescente do mundo.

As lâmpadas de vapor de sódio fazem parte do grupo de lâmpadas de descarga. Neste tipo de lâmpada a luz é produzida através da descarga de um gás dentro do tubo. A primeira lâmpada de descarga foi produzida em 1931 e foi uma lâmpada de vapor de mercúrio.

As lâmpadas de vapor de sódio de baixa pressão foram desenvolvidas no início dos anos 30 do século XX. Pelo fato do sódio ser um material altamente corrosivo, as lâmpadas de vapor de sódio de baixa pressão necessitavam de um vidro especial e de temperaturas muito estáveis para poderem operar. Pesquisas indicaram que aumentando a pressão do sódio, poderia-se melhorar a cor “pobre” da lâmpada, mas nenhum material prático, que resistisse à corrosão do sódio nas pressões elevadas, era encontrado. Uma série de pesquisas levou à descoberta do óxido de alumínio sintetizado para a confecção do tubo de descarga. Porém, ainda havia o problema de que poucos materiais conseguiriam lacrar o tubo e, aqueles que o fizessem, ainda teriam que suportar as altas temperaturas e pressão de operação da lâmpada. O nióbio foi escolhido como o material para lacrar o tubo de descarga, produzido num invólucro que se expandisse na mesma proporção que o óxido de alumínio. Entretanto o nióbio era um elemento exótico e novos meios de trabalhá-lo tiveram que ser desenvolvidos [2].

Finalmente, em 1962, a primeira lâmpada de vapor de sódio de alta pressão foi desenvolvida, mas ela só começou a ser comercializada em 1965. Estas lâmpadas foram desenvolvidas para serem mais eficientes e algumas podem transformar até 50% da potência elétrica que lhes é fornecida, em luz visível. Sua cor branco-dourada é mais “quente” e agradável além de ser a cor em que o olho humano tem melhor acuidade visual.

Principalmente devido a sua eficiência, as lâmpadas de vapor de sódio estão sendo cada vez mais utilizadas na iluminação pública já que trazem economia de energia elétrica quando substituem as lâmpadas existentes por lâmpadas de alta pressão de sódio.

A iluminação pública no Brasil corresponde aproximadamente 7% da demanda nacional e a 3,3% do consumo total de energia elétrica do país. Isto equivale a uma demanda de 2,3 GW e a um consumo de 10,2 bilhões de kWh/ano segundo dados apresentados pela Eletrobrás em [1].

No Brasil, são comumente empregadas, na iluminação pública, lâmpadas de vapor de mercúrio (HPM) que, embora tenham uma elevada vida útil, não possuem uma eficácia luminosa satisfatória para a aplicação quando comparadas às lâmpadas HPS existentes.

Esta é uma das razões pela qual, em junho de 2000, o Governo Federal Brasileiro lançou o programa nacional de iluminação pública eficiente (RELUZ), que em 2002, foi prorrogado até 2010. O programa pretende abranger até 96% do potencial de conservação de energia da rede nacional de iluminação pública, atualmente composta de 13 milhões de pontos de iluminação, sendo que, 7,5 milhões de pontos, podem ganhar mais eficiência [1].

O programa RELUZ prevê, principalmente, a substituição das lâmpadas de vapor de mercúrio por lâmpadas HPS. É dentro deste contexto que o projeto e desenvolvimento de sistemas mais eficientes, confiáveis, de baixo custo e que atendam os requisitos de operação das lâmpadas HPS vem ao encontro das necessidades do sistema de iluminação como um todo.

As lâmpadas HPS são geralmente alimentadas por reatores eletromagnéticos. Porém, estes apresentam algumas características indesejáveis, tais como: baixa eficiência, cintilamento, ruído audível e diminuição da vida útil da lâmpada [22]. Para resolver tais problemas, têm-se desenvolvido pesquisas na área de reatores eletrônicos para alimentação de lâmpadas de descarga em alta pressão.

A utilização de reatores eletrônicos para alimentação de lâmpadas de descarga em baixa pressão, tais como as fluorescentes, é uma tecnologia já bem conhecida. Porém, o desenvolvimento de reatores eletrônicos para alimentação de lâmpadas de descarga em alta pressão, como por exemplo, as lâmpadas HPS, ainda encontram vários obstáculos, sendo o principal deles a ocorrência do fenômeno da ressonância acústica, o qual impossibilita a operação das lâmpadas de descarga em alta pressão por reatores eletrônicos convencionalmente empregados para alimentação de lâmpadas fluorescentes. O fenômeno da ressonância acústica é descrito em detalhes no capítulo 1.

No capítulo 2, é apresentada a técnica utilizada para o acionamento da lâmpada HPS com forma de ondas sintetizadas. Para impedir a ocorrência do fenômeno da ressonância acústica.

Dentro deste contexto, no capítulo 3, propõe-se um reator eletrônico, através da utilização de um amplificador classe D proposto por [76] em sua tese de doutorado, utilizando para alimentar uma ou mais lâmpadas HPS. Para utilização em luminárias que contenham mais de uma lâmpada por poste, no sistema de iluminação pública, de forma confiável, sem que ocorra o fenômeno da ressonância acústica.

No capítulo 4, são apresentados os exemplos de projeto do reator utilizado nesta dissertação de mestrado assim como os resultados obtidos na alimentação das lâmpadas HPS.

Portanto o desenvolvimento de um reator eletrônico para acionar uma ou mais lâmpadas de alta pressão de sódio é demonstrado neste trabalho.

## **CAPÍTULO 1**

### **ESTUDO SOBRE A LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO DE ALTA PRESSÃO - HPS.**

#### **1.1 - INTRODUÇÃO**

A lâmpada de vapor de sódio de alta pressão emite uma luz branca dourada e possui uma alta eficiência, porém com um baixo índice de reprodução de cor. Sua vida útil varia, em função da potência, de 16.000 a 24.000 horas, o que a torna bastante adequada, principalmente, para iluminação pública e externa.

É especialmente adequada para iluminação de locais onde a reprodução de cor não é um fator importante como monumentos históricos, túneis, aeroportos, fachadas, estacionamentos, viadutos, auto-estradas e etc.

Como sua cor tende muito para o amarelo, costuma deixar a vegetação e o mar com uma cor muito distorcida, produzindo uma sensação de calor e de relativo desconforto. Porém, nessa mesma, o olho humano tem melhor acuidade visual, o que favorece a segurança. Ainda do ponto de vista social a lâmpada de sódio emite menos radiação ultravioleta que a de mercúrio diminuindo a atração de insetos.

A utilização das lâmpadas de vapor de sódio na iluminação pública pode agregar as seguintes vantagens:

- Mais economia de energia elétrica;
- Mais economia na manutenção;
- Mais segurança nas ruas;
- Menos acidentes de trânsito;
- Menos depredações dos bens públicos e privados;
- Embelezamento da paisagem noturna da cidade aumentando o apelo turístico.

Na iluminação industrial as lâmpadas de vapor de sódio tem tido grande sucesso na conservação e redução de custos com energia elétrica, pelos seguintes motivos:

- O investimento feito na troca ou instalação é amortizado em pouco tempo pela economia de energia;

- Reduzem o consumo de energia elétrica;
- Aumentam o volume de luz;
- Produzem menos fadiga, aumentando a produtividade;
- Reduzem acidentes de trabalho;
- Permitem ampliar a produção com novos equipamentos sem aumentar a conta de energia.

Como desvantagens desta lâmpada pode-se citar o fato de que para o seu funcionamento, além do reator, faz-se necessária a utilização de outro equipamento auxiliar, o ignitor. Porém, o rápido retorno do investimento na aquisição destes equipamentos têm tornado este tipo de lâmpada cada vez mais popular, seja na iluminação pública ou na industrial [2].

## 1.2 - ESTRUTURA E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A lâmpada de vapor de sódio de alta pressão tem sua luz produzida através de uma descarga elétrica no vapor de sódio. O campo elétrico existente entre os eletrodos fornece energia aos elétrons que excitam os átomos de sódio os quais emitem predominantemente a luz amarela e algumas outras cores características do sódio.

As partes principais de uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão são apresentadas na Fig.1.1.

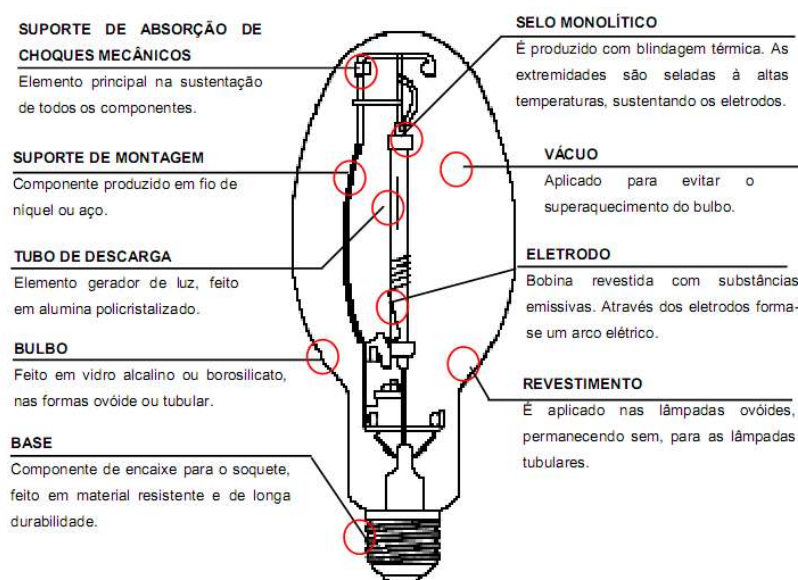


Figura 1.1: Partes que compõem a lâmpada de vapor de sódio 150 W [3].

As lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão possuem um tubo de descarga interior de óxido de alumínio sintetizado que é resistente ao ataque químico do vapor de sódio em altas temperaturas e tem um alto ponto de fusão. O tubo de descarga é preenchido com um amálgama de sódio mercúrio que é parcialmente vaporizando quando a lâmpada atinge a temperatura de operação e com xenônio à baixa pressão que é utilizado como gás de ignição e para limitar a condução do calor do arco de descarga da parede do bulbo [4].

O invólucro externo de vidro duto (boro-silicato) a vácuo serve para prevenir ataques químicos das partes metálicas do tubo de descarga. Ele também ajuda a manter a temperatura do tubo de descarga isolando o metal dos efeitos da temperatura ambiente [4].

A maioria das lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão podem operar em qualquer posição. A posição de operação não tem efeito significativo na luminosidade [24, 25].

As lâmpadas de vapor de sódio não possuem eletrodo de partida e necessitam de tensões elevadas de até 5000 V para partir. Por isso necessitam de um ignitor que gera esses pulsos de alta tensão e alta frequência. Os fios de conexão do ignitor à lâmpada devem ter comprimento máximo de 3 metros para que não ocorra uma atenuação excessiva do pulso de ignição, implicando no não acendimento da lâmpada [2].

Algumas lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão especiais usam uma mistura específica de gás de partida (uma combinação de argônio e neônio que requer uma tensão de partida mais baixa que qualquer gás sozinho) e um auxiliar de partida dentro do bulbo externo. Estas lâmpadas podem partir e operar em muitos reatores para lâmpadas de mercúrio utilizando menos energia e produzindo mais luz [5].

Também existem lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão com dois tubos de descarga idênticos contidos dentro do tubo externo. Os tubos de descarga são conectados em paralelo dentro da lâmpada, mas só um dos tubos tem partida com o pulso ignitor. A vantagem desta estrutura é que em caso de falta de energia momentânea a lâmpada reacende imediatamente quando a energia é restabelecida e em cerca de 1 minuto retorna a plena luminosidade [2].

## 1.3 - CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS

### 1.3.1 - CONCEITOS DE GRANDEZAS ÓPTICAS

Uma fonte de radiação emite ondas eletromagnéticas que possuem diferentes comprimentos, e o olho humano é sensível a somente alguns deles. Luz é, portanto, a radiação eletromagnética capaz de produzir uma sensação visual. A radiação visível que conseguimos perceber corresponde a uma estreita faixa de espectro eletromagnético compreendida entre comprimentos de onda de 380nm a 780nm. Para cada “cor” do espectro, está associado um comprimento de onda conforme está apresentado na Figura 1.2 [2].

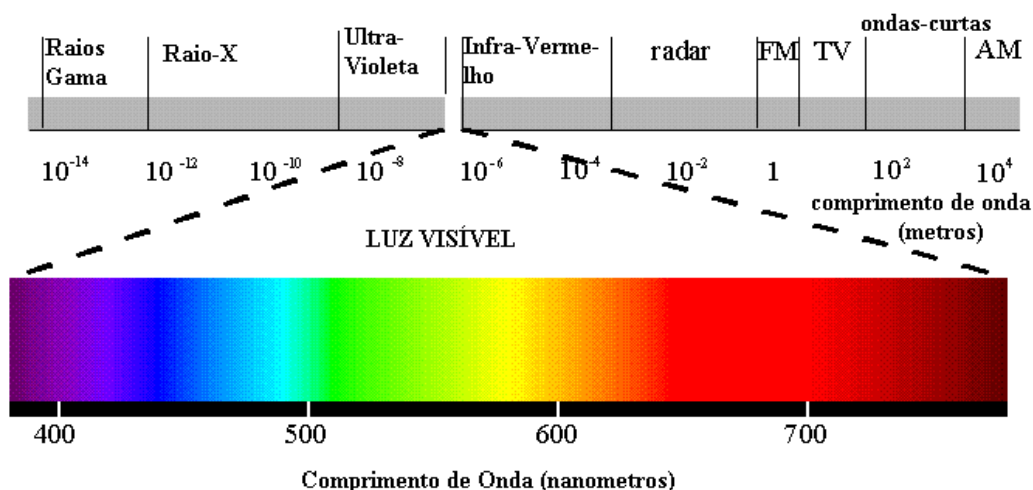


Figura 1.2: Espectro eletromagnético e espectro visível.

A radiação mais eficaz ao impressionar a retina do olho humano corresponde a uma cor verde-amarelada, com comprimento de onda 555nm conforme está ilustrado na Figura 1.3, que apresenta as curvas de sensibilidade espectral do olho em função do comprimento de onda. Para comprimentos de onda maiores ou menores a sensibilidade da vista vai decrescendo até desaparecer no violeta e no vermelho escuro.

A sensibilidade visual para a luz varia não só de acordo com o comprimento de onda da radiação, mas também com a luminosidade. Isto ocorre porque a retina do olho humano está provida de duas espécies de células sensíveis à luz: bastonetes e cones. Os bastonetes

permitem a visão para intensidades luminosas muito pequenas (visão noturna ou escotópica), porem recebem apenas impressão de luminosidade e nenhuma impressão cromática por isso os objetos coloridos aparecem sem cor no escuro. Os bastonetes contêm uma substância sensível à luz que se decompõe pela ação da luz, mas se regenera no escuro, o rodopsina, ou, como é mais comumente chamada: ‘púrpura ocular’ ou ‘púrpura visível’ [2].

Os cones permitem a impressão colorida em claridades média e grande (visão diurna ou fotópica). Seu limite sensível é aproximadamente 1000 vezes mais alto que os dos bastonetes. Com os cones o olho humano pode ver em cores [2].

A curva de sensibilidade do olho humano, demonstra que radiações de menor comprimento de onda (violeta e azul) geram maior intensidade de sensação luminosa quando há pouca luz, enquanto as radiações de maior comprimento de onda (laranja e vermelho) se comportam ao contrário. Este deslocamento da sensibilidade do olho com a intensidade da iluminação é chamado Efeito Purkinje [2].

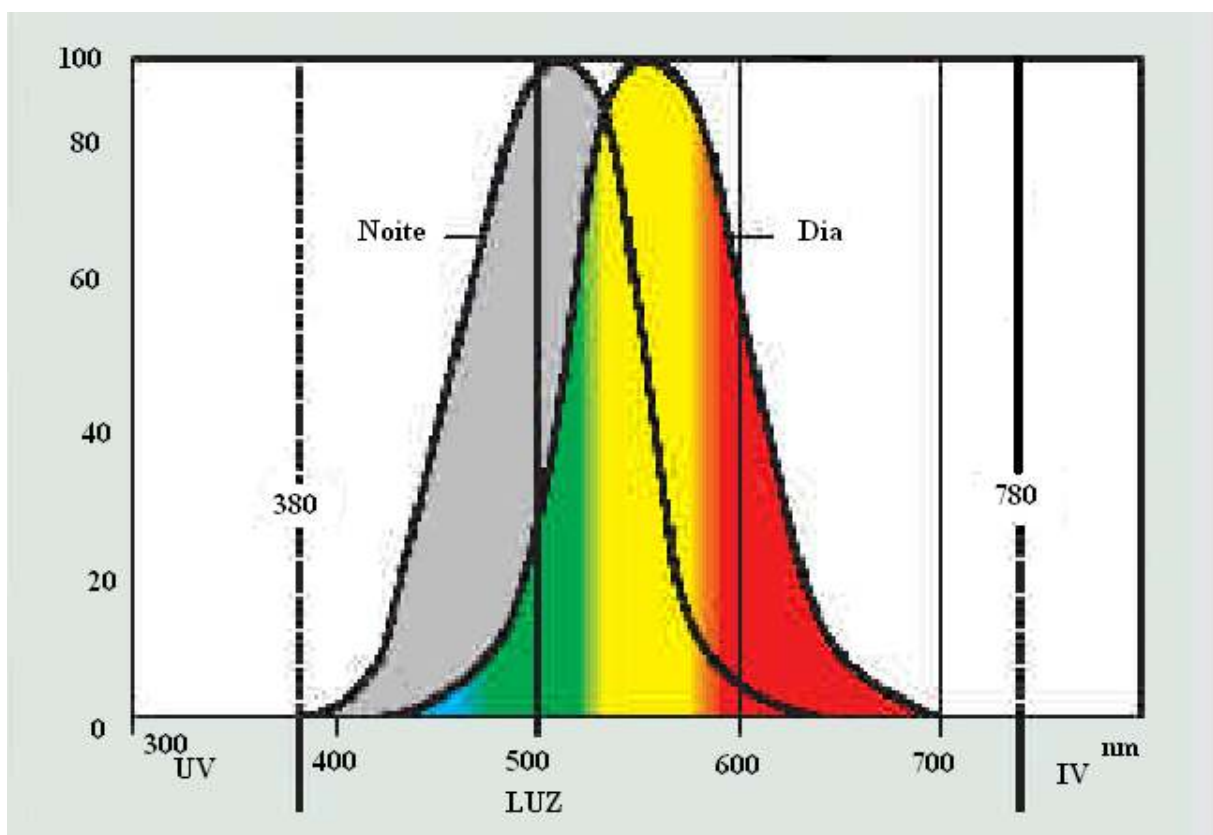


Figura 1.3: Sensibilidade do olho humano em relação às cores e à luminosidade [2]

A seguir serão definidos alguns conceitos de luminotécnica que possuem grande relevância na compreensão das características óptica da lâmpada [2].

**Fluxo luminoso:** É a grandeza característica de um fluxo energético, expressando sua aptidão de reproduzir uma sensação luminosa. Basicamente, o fluxo luminoso expressa, em lúmens (lm), a quantidade de luz emitida pela lâmpada [2].

**Intensidade luminosa:** É o fluxo luminoso irradiado na direção de determinado ponto. É expressa em candela (cd) [2].

**Eficiência energética ou Rendimento luminoso:** É a relação entre o fluxo luminoso total emitido pela fonte e a potência por ela absorvida. Sua unidade é lúmen/watt (lm/W) [2].

**Iluminância:** Indica o fluxo luminoso de uma fonte de luz que incide sobre uma superfície situada a uma certa distância desta fonte. É expressa em lux (lx) [2].

**Luminância:** É a intensidade luminosa que emana de uma superfície, pela sua superfície aparente. Na prática é a sensação de claridade transmitida aos olhos. É medida em candelas por metro quadrado (cd/m<sup>2</sup>) [2].

**Temperatura de cor:** Esta temperatura não se refere ao calor físico da lâmpada, e sim ao tom de cor que ela dá ao ambiente. É medida em Kelvin (K) e quanto maior for o número, mais fria é a cor da lâmpada [2].

**Índice de reprodução de cores (IRC):** A reprodução de cores de uma lâmpada é medida por uma escala chamada IRC (Índice de Reprodução de Cores). Quanto mais próximo este índice for ao IRC 100 (dado à luz solar), mais fielmente a lâmpada reproduz as cores [2].

A capacidade das lâmpadas reproduzirem bem as cores (IRC) independe de sua temperatura de cor (K). Existem tipos de lâmpadas com três temperaturas de cor diferentes e o mesmo IRC.

### 1.3.2 - CARACTERÍSTICAS DA LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO DE ALTA PRESSÃO

As lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão radiam energia sobre uma grande parte do espectro visível. Há um contraste para as lâmpadas de sódio de baixa pressão que radiam principalmente nas chamadas linhas D do sódio que possuem comprimento de onda de aproximadamente 589nm. A Figura 1.4 apresenta dois espectros de lâmpadas de vapor de sódio para diferentes níveis de pressão do gás. As lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão

comuns com pressão do sódio na faixa de 5 a 10kPa exibem tipicamente temperaturas de cor de 1900 a 2200 K e tem um IRC de 22. Em pressões mais altas do sódio, acima de aproximadamente 27kPa, a radiação do sódio das linhas D é absorvida pelo próprio gás e é radiada como um espectro contínuo em ambos os lados da linha D [2].

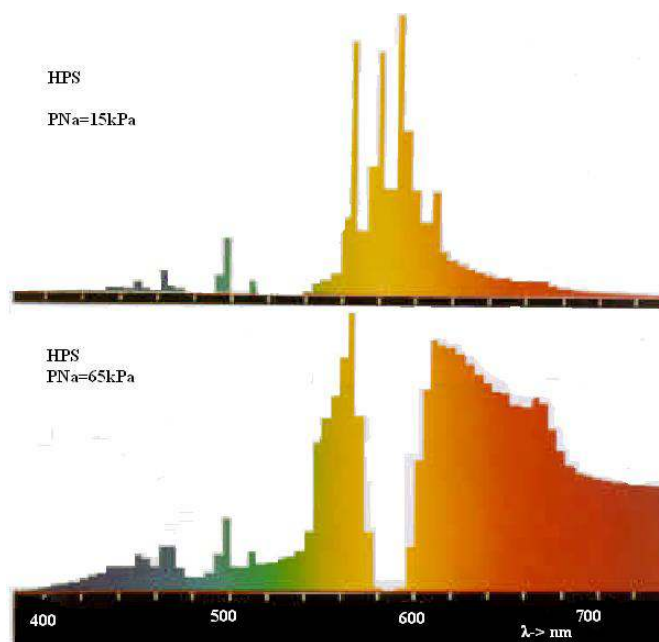


Figura 1.4: Espectros de lâmpadas de vapor de sódio para pressões 15kPa (superior) e 65kPa (inferior).

Aumentando a pressão do sódio aumenta-se o IRC para um mínimo de 65 com temperaturas de cor correlacionadas mais altas; entretanto vida e eficácia são reduzidas. Lâmpadas brancas de vapor de sódio de alta pressão foram desenvolvidas com temperaturas de cor correspondentes de 2700 a 2800 K e um IRC entre 70 e 80. Aumentando-se a frequência de operação pode-se fornecer luz branca a reduzida pressão de sódio. Lâmpadas de sódio de alta pressão tem eficácia de 80 a 150 lm/W, dependendo da potência da lâmpada e das propriedades de reprodução de cores desejadas [2].

A Figura 1.5 apresenta uma comparação da eficiência energética entre vários tipos de lâmpadas. Através desta comparação pode-se comprovar o alto rendimento da lâmpada de vapor de sódio.

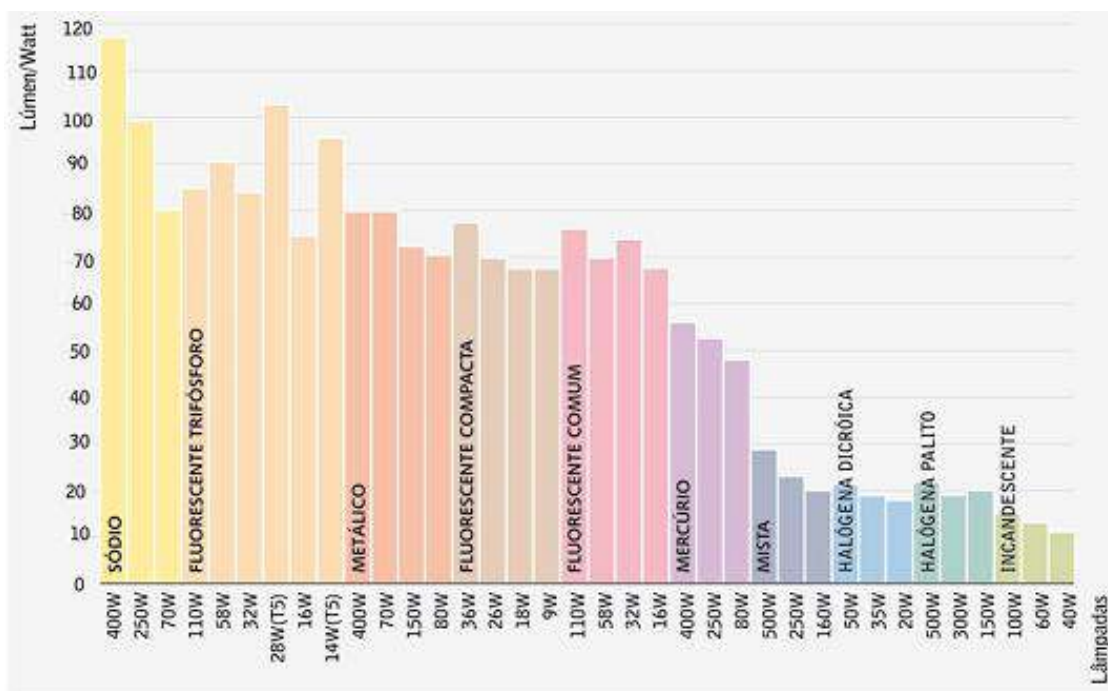


Figura 1.5: Comparação da eficiência energética de vários tipos de lâmpadas.

### 1.3.2.1 - CURVAS CARACTERÍSTICAS DA LAMPADA HPS

Uma das funções principais do reator é assegurar que, mesmo havendo flutuações na tensão da rede, a potência fornecida à lâmpada seja constante. O modo como a potência da lâmpada varia em função da tensão para um determinado circuito elétrico, é mostrado pela curva do reator na Figura 1.6.

A influência da tensão da lâmpada sobre a potência pode ser ilustrada através das curvas da lâmpada da Figura 1.6. Note que o ponto operacional da lâmpada *HPS* é determinado pelo ponto de interseção do reator e da lâmpada.

Nesta Figura 1.6 são apresentadas as retas que descrevem a característica potência-tensão de uma lâmpada *HPS* e a curva característica de um reator. As linhas pontilhadas indicam as curvas características da lâmpada sendo deslocada ao longo de sua vida útil.

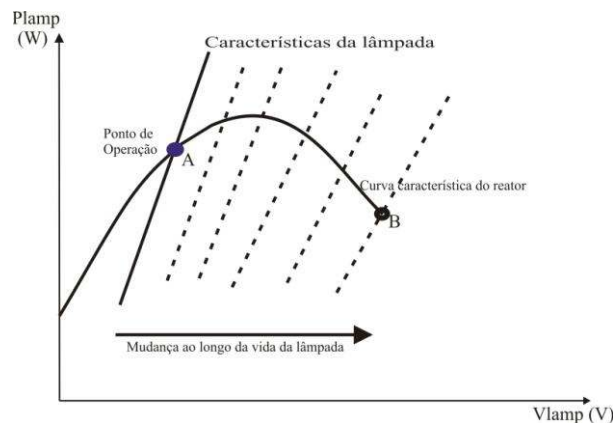


Figura 1.6: Curva característica da lâmpada[4]

As curvas da lâmpada para um determinado reator podem ser medidas variando-se a tensão de alimentação vem como sua potência. A curva da lâmpada mostra que a tensão aplicada se torna mais alta para lâmpadas mais velhas, como pode se verificar na Figura 1.6 [4].

#### 1.4 - CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

Como já foi descrito anteriormente a lâmpada de vapor de sódio de alta pressão necessita de um pulso de alta tensão e alta frequência para que ocorra a ignição. Depois da ignição a lâmpada só atinge sua luminosidade máxima em aproximadamente 10 minutos, tempo durante o qual as cores se alteram.

A lâmpada de vapor de sódio de alta pressão possui eletrodos similares aos das lâmpadas de mercúrio. Este fato combinado ao menor diâmetro do tubo de descarga dá a estas lâmpadas uma excelente manutenção da luminosidade. A vida útil de uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão é limitada por um lento aumento na tensão de operação. Este aumento é causado principalmente pelo enegrecimento das extremidades do tubo de descarga causado por material remanescente dos eletrodos. As extremidades enegrecidas absorvem radiação que esquenta ainda mais o tubo de descarga vaporizando amálgama de sódio adicional. Isto aumenta a pressão no tubo de descarga e conseqüentemente a tensão.

A temperatura ambiente afeta a tensão de partida em todas as lâmpadas de alta pressão. Elas não são consideradas adequadas para operar em temperaturas inferiores a 0° se uma proteção especial. Já as temperaturas excessivas podem causar falhas ou desempenhos

insatisfatórios da lâmpada. A concentração excessiva de calor no tubo de descarga pode afetar suas cores bem como características elétricas e diminuir a vida útil da lâmpada.

Um aspecto importante referente às lâmpadas de descarga de alta pressão diz respeito ao *flicker* que depende do tipo da lâmpada e do reator. Recomenda-se um índice de *flicker* menor ou igual a 0.1 para reduzir o efeito estroboscópico. Para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão operando em 60Hz este índice é, por vezes, maior que o tolerado fazendo-se necessário o uso de reatores eletrônicos operando em alta frequência, praticamente elimina o problema.

Outro problema é o fenômeno da ressonância acústica onde será apresentado mais adiante neste capítulo.

#### **1.4.1 - LIMITES DE OPERAÇÃO**

Diferentemente das lâmpadas de mercúrio onde a tensão se mantém praticamente constante diante de mudanças na potência, nas lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão a tensão varia com a potência da lâmpada. Por isso foram impostas certas limitações para assegurar que as lâmpadas operem dentro das especificações. Os limites de operação da lâmpada podem ser especificados de acordo com um diagrama do quadrilátero [2].

##### **1.4.1.1 - DIAGRAMA QUADRILÁTERO**

O reator e os fabricantes de lâmpada impõem certas limitações nos seus produtos para assegurar que eles operem dentro das especificações. Os limites operacionais da lâmpada podem ser especificados convenientemente por meio de um quadrilátero ou diagrama trapezoidal mostrados na Figura 1.7[4].

Os limites, superior e inferior, de potência da lâmpada são determinados pela norma *IEC*. Dentro desses limites se assegura um fluxo luminoso aceitável e com tempo de aquecimento satisfatório. Os limites laterais são determinados pela curva característica da lâmpada. O ponto de funcionamento do reator deve estar dentro desse quadrilátero.

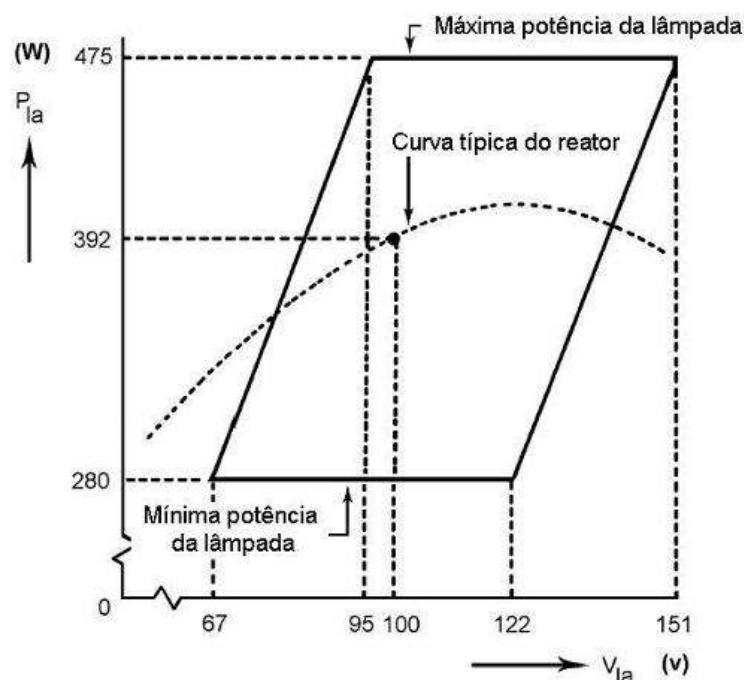


Figura 1.7: Diagrama quadrilátero de uma lâmpada HPS-400W[4,6]

Nos reatores deverão ser consideradas as flutuações na tensão de alimentação para que a linha do reator não ultrapasse os limites, inferior e superior, do diagrama quadrilátero [4].

O diagrama do quadrilátero demonstra a região onde a lâmpada opera em condições nominais de tensão e corrente, garantidas pelo reator. No entanto, ao longo da vida útil da lâmpada, a impedância equivalente da lâmpada varia, aumentando a tensão final sobre a lâmpada. A norma NBR IEC 662:1997 ajuda a definir a área de tolerância em torno do ponto de operação e a intersecção entre as características da lâmpada e do reator [10].

Por causa do excesso de amalgama presente na lâmpada HPS, as mudanças na temperatura do amalgama ou a mudança pressão do sódio e do mercúrio.

A tensão de operação da lâmpada está intimamente ligada à temperatura do amálgama. Com o passar do tempo, o material dos eletrodos gradualmente se vaporiza e se deposita nos terminais do tubo de descarga, na forma de um filme escuro. Tal filme absorve o calor da descarga provocando um acréscimo na temperatura. Além disso, a alta reatividade do sódio aquecido faz com que o mesmo se combine com outros ingredientes do tubo de descarga, tornando o amálgama mais rico em mercúrio, elevando a tensão do arco [3].

Tais mudanças podem ser causadas por [4]:

- Uma remoção total de sódio durante a vida da lâmpada (que é a razão para o excesso de amalgama em lâmpadas *HPS*); a amalgama fica mais rica em mercúrio e produz uma pressão de mercúrio mais alta e uma pressão de sódio mais baixa à mesma temperatura da amálgama;
- Uma mudança na temperatura da mancha mais fria durante a vida da lâmpada que podem ser provocados por vários fatores:
  - i. Escurecimento do tubo de descarga;
  - ii. Mudança no fluxo de potência pelo eletrodo.

Também, a tensão da lâmpada inicial mostra um amento devido:

- Às tolerâncias de fabricação da lâmpada de descarga;
- Às tolerâncias de fabricação do reator;
- À influência da luminária no qual a lâmpada é operada;
- À influência nas flutuações de tensão de alimentação.

### **1.5 - ACIONAMENTO DA LÂMPADA HPS**

Nesta seção será apresentada a principal característica comum a todas as lâmpadas de descarga, incluindo a lâmpada HPS, que necessitam da ignição e estabilização do arco.

A ignição da lâmpada envolve a conversão do gás de um estado não-condutivo a um estado condutivo, com a formação de um arco luminoso dentro do tubo de descarga. O primeiro estágio da ignição é o mais importante e a ionização do gás. Este estado só pode ser alcançado se o circuito eletrônico fornecer uma tensão com amplitude e tempo suficiente para provocar a ionização do gás, gerando o arco elétrico entre os dois eletrodos [4].

Após a ignição da lâmpada é necessário um controle da corrente da lâmpada para que ela não atinja valores muito altos, isto envolve a estabilização do arco. Por causa da característica de tensão-corrente negativa no arco de descarga, de outra forma a corrente aumentaria indefinidamente e destruiria o tubo de descarga. Portanto a lâmpada de operar com dispositivo limitador da corrente de partida, que pode ser um reator passivo ou um reator eletrônico entre a lâmpada e a fonte de energia [4].

### 1.5.1 - IGNIÇÃO DA LÂMPADA HPS

O processo de ignição é apresentado na Figura 1.8, que descreve a característica tensão-corrente da lâmpada HPS. O fenômeno do arco pode ser simplificado por uma descarga entre placas planas paralelas [4].

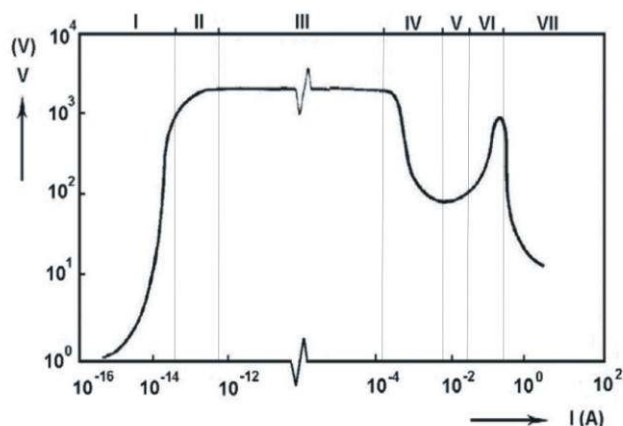


Figura 1.8: Curva característica tensão-corrente da lâmpada HPS[4]

Uma corrente muito pequena flui através do *gap* quando uma baixa tensão é aplicada. Para aumentar o valor médio da corrente, deve-se elevar a tensão, caracterizando assim a região (I), conhecida como região de Geiger. Observamos que há uma elevação da tensão aplicada para valores próximos a 1,3kV. Na região (II) denominada de região Townsend, a corrente ainda é muito pequena, mas o seu valor aumenta fortemente para um pequeno aumento de tensão. O ponto de ruptura da corrente, onde a descarga se torna auto-sustentada, ocorre na região (III). A tensão diminui ligeiramente, após isso, a corrente é aumentada e atinge-se o ponto onde ocorre a tensão de ruptura. Na região de descarga de brilho subnominal (IV), ocorre uma diminuição significativa de tensão. Na região (V) a tensão é quase constante. Entretanto com o aumento da corrente, o brilho normal se desenvolve fazendo com que a tensão aumente mais uma vez, caracterizando a região (VI). E finalmente na região (VII) tem-se a descarga do arco propriamente dito [4].

Resumindo, o processo de ignição passa através de sucessivos estágios, os mais importantes são: corrente de ruptura; conduzir a auto-sustentação da descarga; tensão de

ruptura; formação da descarga de luz e transição do arco de luminosidade; manutenção da descarga do gás.

O processo de ruptura é estudado aplicando-se uma alimentação à lâmpada *HPS* desligada com uma tensão constante cuja amplitude pode ser escolhida. O fenômeno de ruptura é observado quando ocorre uma variação súbita de tensão [4].

Para se obter as medidas da tensão de ruptura, as lâmpadas *HPS* devem ser operadas, primeiro pelo menos durante dez minutos com uma corrente estabilizada, seguindo por um período desligado de mesma duração. Um período preliminar de aquecimento e resfriamento inadequado influenciará nos resultados das medidas [4].

Para tempos pequenos, a tensão de ruptura fica muito maior por causa da alta pressão do vapor de mercúrio e sódio presentes na *HPS* [4, 5].

Um mínimo na tensão de ruptura é encontrado para um tempo de resfriamento entre um e dois minutos. Este mínimo pode ser explicado pela possível presença de uma mistura de xenônio e sódio na lâmpada depois de tal período para resfriamento. Para períodos maiores que aproximadamente cinco minutos, a tensão de ruptura é principalmente determinada pela presença do gás de ignição, xenônio. Essas características podem ser observadas na Figura 1.9 [4].

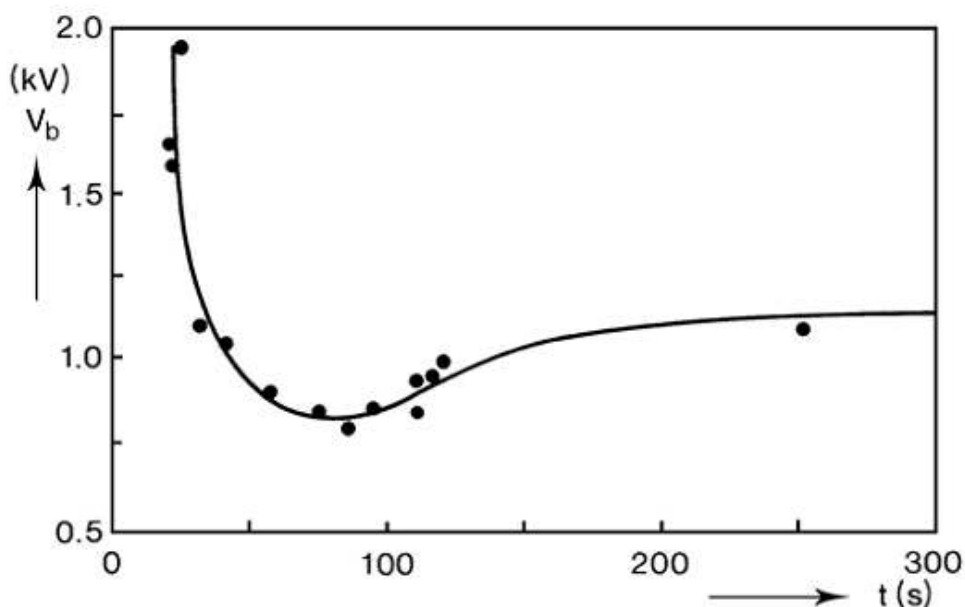


Figura 1.9: Curva característica da tensão aplicada a lâmpada em função do tempo[4]

Para amplitudes da tensão maior que o mínimo requerido para ruptura, o tempo para ruptura dependerá em grande parte da sobre tensão (diferença entre a tensão aplicada e o mínimo requerido para ruptura) [4].

A largura do pulso de ignição aplicado à lâmpada também influencia no tempo de ignição. Estes pulsos de ignição têm que satisfazer certas exigências mínimas com relação à amplitude, a largura e o tempo de subida do pulso [11].

Outra característica é que quanto maior for a tensão de alimentação, menor será o tempo de ignição. A pressão de xenônio também tem uma influência no tempo de ignição da lâmpada, que pode ser explicada pelo fato de que para uma descarga de brilho, a densidade de corrente aumenta com o quadrado da pressão a uma queda constante no cátodo [4].

Muitas lâmpadas *HPS* que empregam xenônio, como um gás de ignição, são operadas junto com um dispositivo de ignição que, em combinação com o reator indutivo ou um transformador de pulso, produz a tensão necessária para a ignição na forma de pulsos sobrepostos na tensão de alimentação [4].

A temperatura e a pressão do gás no interior do tubo de descarga definem a tensão de ignição necessária para início de uma descarga. Se o arco por algum motivo for extinto, após a lâmpada estar em equilíbrio, para um reacendimento imediato seria necessário uma tensão muito elevada, já que nem a pressão, nem a temperatura retornariam as condições iniciais imediatamente. A lâmpada deve esfriar para um novo acendimento, este tempo é conhecido por tempo de resfriamento e pode levar normalmente alguns minutos. A impossibilidade de re-ignição imediata a quente é considerado um inconveniente das lâmpadas de descarga a alta pressão. O que pode ser solucionado utilizando uma lâmpada com dois tubos de descarga, o que faz com que apenas um tubo funcione por vez. Mesmo sofrendo a extinção do arco, o reator é capaz de partir o tubo de descarga desligado, o que faz com que o tempo de re-ignição fique quase inexistente, porque em um minuto a lâmpada estará em regime permanente como na lâmpada Ceramalux® RetroLux HPS da PHILIPS®.

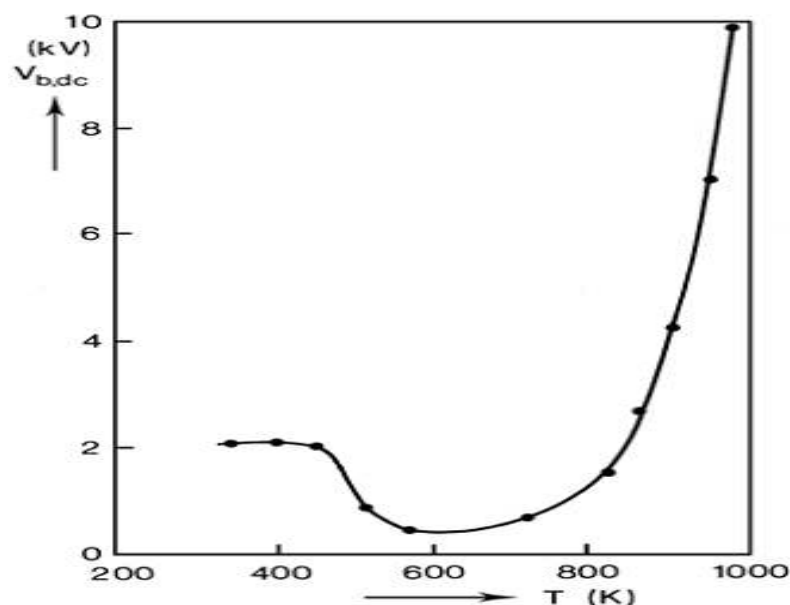


Figura 1.10: Curva de tensão de partida em função da temperatura na lâmpada HPS [4]

Na Figura 1.10 é mostrada a tensão contínua de ruptura para uma lâmpada HPS de 70W em função da temperatura do tubo de descarga. Observa-se que para uma temperatura de cerca de 1273°C (1000° K) é necessário um pulso de ignição com amplitude acima de 10kV.

A partida da lâmpada de Alta pressão de sódio tem algumas características importantes que está demonstrada na figura 1.11.

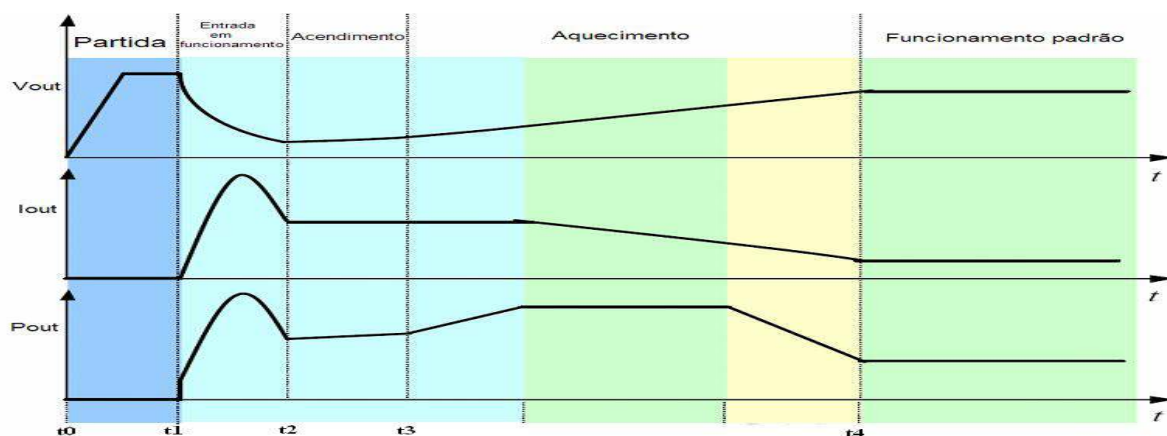


Figura 1.11: Modo de controle necessário a partir da partida da lâmpada fria[10].

A figura demonstra que logo após o pulso de tensão para a lâmpada entrar em funcionamento, a tensão sobre a lâmpada tem uma queda em relação a tensão nominal da lâmpada, após o aquecimento da lâmpada a tensão atinge o regime permanente. Enquanto a corrente da

lâmpada pode chegar a valores de até 200% da corrente nominal da lâmpada após a partida, logo após o processo de aquecimento a corrente entra em regime permanente.

### **1.5.2 - ESTABILIZAÇÃO DO ARCO**

A função mais importante do reator eletrônico é controlar a corrente de alimentação na lâmpada. Os reatores são como uma interface entre a lâmpada de descarga e a rede elétrica e têm que satisfazer tanto as exigências da lâmpada de descarga quanto da rede elétrica.

Com respeito à lâmpada de descarga, o reator tem que assegurar [5]:

- Que durante sua vida útil, a potência na lâmpada seja mantida constante no valor nominal apesar das flutuações na tensão de alimentação;
- A reignição;
- As condições para ignição e transição do brilho-arco existam.

Com respeito à rede elétrica, o reator tem que assegurar:

- Que a distorção na corrente da rede seja mantida dentro dos limites especificados pelas normas;
- Que no caso de fontes trifásicas, a corrente de terceiro harmônico no neutro seja eliminada;
- Que a corrente da rede esteja, sempre que possível, em fase com a tensão;
- Que a interferência de radio frequência, causada, por exemplo, durante a ignição e a reignição da lâmpada, seja suprimida adequadamente;
- Que o reator não perturbe sinais de controle remoto;
- Que os níveis de eficiência elétrica e luminosa sejam satisfatórios.

O reator eletrônico tem que ser capaz de satisfazer as características de funcionamento da lâmpada e respeitar as normas de equipamentos eletrônicos ligado a rede elétrica.

### **1.6 - RESSONÂNCIA ACÚSTICA**

A Ressonância Acústica (RA) que ocorre nas lâmpadas de alta intensidade de descarga (HID) se caracteriza por flutuações de pressão do gás no interior do tubo de descarga, quando elas são alimentadas por fontes de potência de altas frequências (entre poucos kHz a centenas de kHz) [4]. Quando a frequência da flutuação de pressão está próxima da frequência natural

de oscilação do tubo (determinada pela sua forma, temperatura interna e tipo de gás contido), ondas de pressão permanentes se estabelecem no tubo, produzindo a ressonância acústica [8]. Essas ondas de pressão causam a vibração do arco, bem como a sua deformação que, de forma prática, se traduz nos seguintes efeitos [16]:

- Movimento e flutuação da luz, também conhecido por flicker, observando principalmente a luz que é utilizada para projeções e focalizações;
- Extinção do arco, devido ao seu alongamento, o que torna a tensão da fonte insuficiente para mantê-lo;
- Quebra do tubo de descarga, o que pode ocorrer quando o caminho do arco se desloca em direção às paredes do tubo provocando sobre-aquecimento (somente para lâmpadas de vapor de sódio);
- Variação da temperatura e do índice de reprodução de cor da luz.



(a)



(b)

Figura 1.12: Fotografia do arco de uma lâmpada HPS, (a)- com ressonância acústica e (b) sem ressonância acústica.

A figura 1.12 mostra duas fotografias do arco voltaico em uma lâmpada *HID* acionada por reator eletrônico em alta frequência: (a) apresentando o fenômeno da ressonância acústica e (b) operando em condições normais [6].

Em cada tipo de lâmpada HID, a ressonância acústica ocorre em faixas de frequência diferentes, ocorrendo intervalos livres de ressonância. Os fatores que influenciam este espectro de frequência são [4]:

- Dimensões e geometria do tubo de descarga e do eletrodo;
- Condições termodinâmicas do gás (temperatura, pressão e densidade);
- Composição do gás.

A figura 1.13 mostra a distribuição das frequências em que ocorre o fenômeno da ressonância acústica para lâmpadas de vapor metálico de 70W PHILIPS[86]. As Figuras 1.14(a) e 1.14(b) apresentam as faixas de ocorrência da ressonância acústica para lâmpadas HPS SON 150W e SON – S150W (respectivamente baixa e alta pressão do gás xenônio) e para a lâmpada HPS 250W, respectivamente. Em ambas, as áreas claras representam as zonas livres de ressonância. Pode-se observar que em lâmpadas de mesma especificação e de fabricantes distintos existem diferenças nas faixas de frequência em que a ressonância acústica ocorre e ate mesmo de mesmo fabricante, variando a pressão do gás xenônio [4].

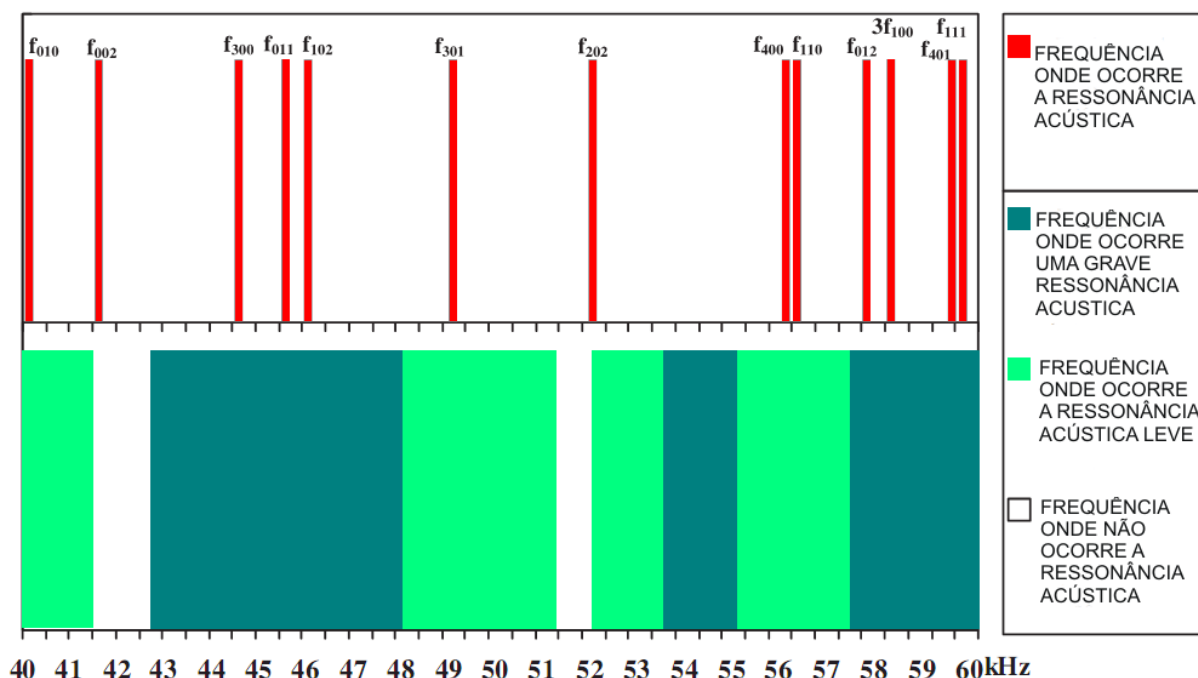


Figura 1.13: Faixas de ocorrência da ressonância acústica em uma lâmpada MV -70W PHILIPS [86].

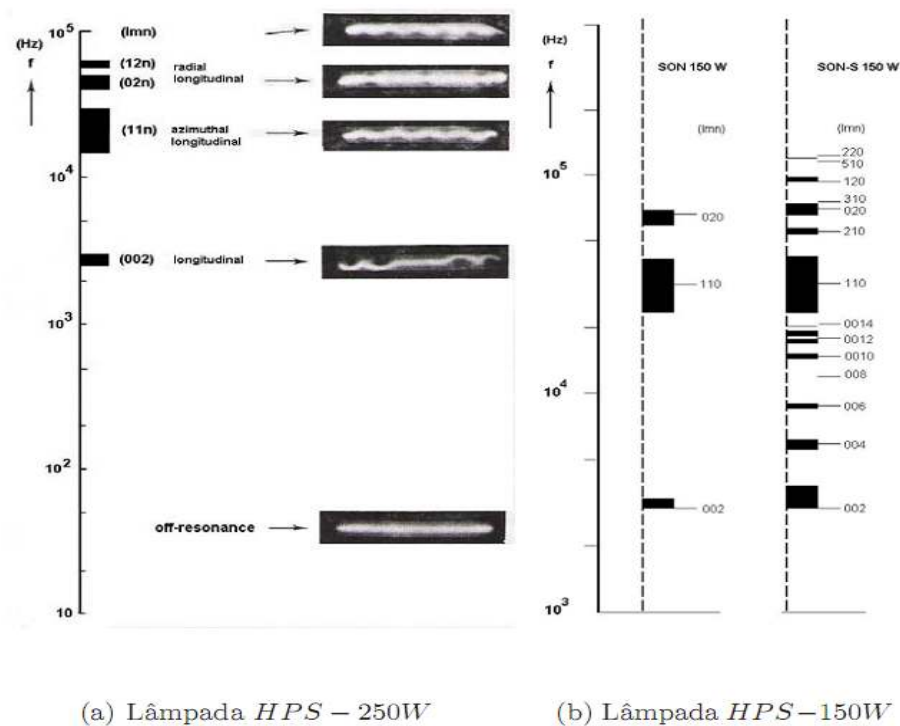


Figura 1.14: Faixas de ocorrência da ressonância acústica em lâmpadas HPS da PHILIPS® [4, 6].

É importante ressaltar que nas lâmpadas HID de baixas potências, em especial nas de vapor metálico, o espectro de ressonância é muito amplo e as zonas livres da ressonância acústica são bastante estreitas. Considerando ainda as diferenças existentes entre as lâmpadas produzidas por um mesmo fabricante, a presença de vários fabricantes no mercado, as tolerâncias geradas no processo de fabricação das lâmpadas e as variações das condições termodinâmicas ao longo do tempo de uso de uma lâmpada, torna-se muito difícil prever as faixas de frequência em que irão ocorrer a ressonância acústica nesses tipos de lâmpada [4].

Vários estudos mostram frequências onde a ressonância acústica ocorre e pequenas janelas onde não ocorra a ressonância acústica. O que pode ser observado facilmente com fotografias do tubo de descarga.

As Figuras 1.15(a) a 1.15(f) apresentam fotografias do arco para diferentes frequências. A fotografia da Figura 1.15(f) apresenta o arco estável operando numa frequência acima da qual a ressonância acústica não ocorre (714kHz), a Figura 1.15(b) apresenta o arco para uma frequência dentro de uma janela livre de ressonância (45kHz). As Figuras 1.15(a) a 1.15(e) apresentam fotografias de arcos que apresentam a presença da ressonância acústica [26].

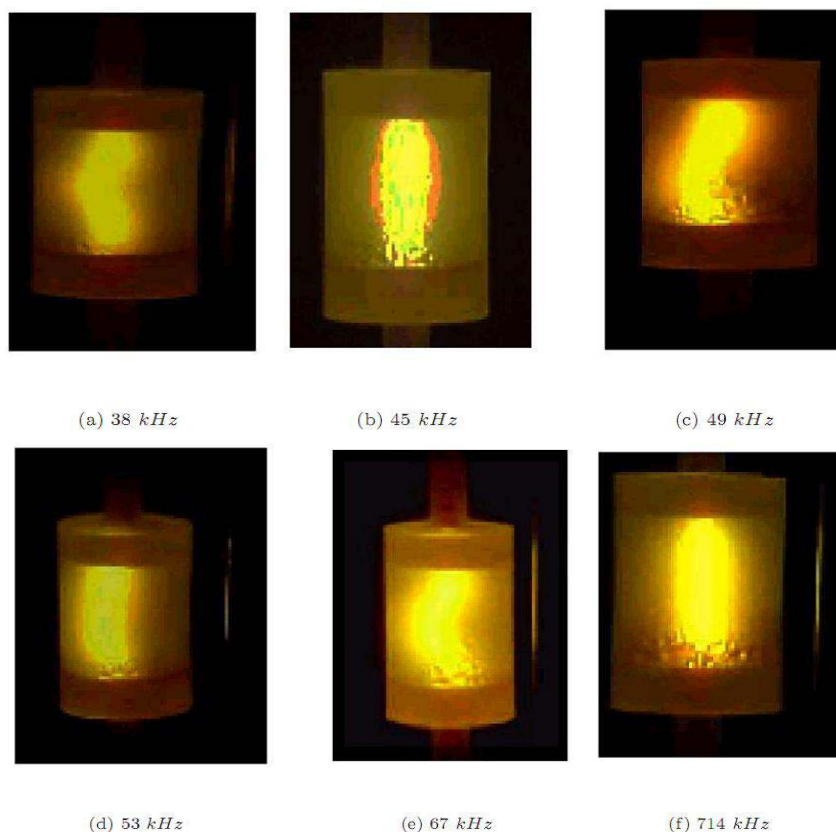


Figura 1.15: Fotografias do arco na lâmpada para diferentes frequências

Podem ser correlatadas as frequências às quais as distorções de arco acontecem às frequências de ressonância de ondas de pressão acústicas. Tal fenômeno de ressonância também pode acontecer em uma cavidade que tenha as mesmas dimensões do tubo de descarga. No tubo de descarga, estas oscilações se sobrepõem à pressão média do gás, produzindo assim modulações na potência aplicada à lâmpada. Isto provoca ondas de pressão viajantes a certas frequências, que refletidas na parede do tubo de descarga, produzem visíveis distorções do arco.

O aumento da frequência proporciona aproximações das faixas de ocorrência da ressonância acústica, enquanto a baixas frequências, as regiões são mais espaçadas.

As frequências ressonantes são determinadas pelas dimensões internas do tubo de descarga e pela velocidade do som. O comprimento do tubo de descarga é relevante, pois a onda acústica é mais refletida contra as extremidades do tubo do que contra as extremidades dos eletrodos, a menos que os eletrodos ocupam uma grande parte do tubo de descarga. A velocidade do som é determinada pelo peso médio molecular do gás. Em lâmpadas padrões *HPS*, o peso médio molecular depende das pressões parciais de sódio, mercúrio e xenônio. As

diferentes velocidades do som para diferentes modos de ressonância sugerem que diferentes temperaturas efetivas estão envolvidas [4].

É possível efetuar os cálculos das frequências em que ocorre a ressonância acústica, tomando como base as referências [4, 27]. Entretanto não cabe aqui a apresentação destes complexos equacionamento. Devido às lâmpadas de vapor de sódio possuírem tubos de descarga longos e estreitos, aparecem amplas faixas de frequência livres da ressonância acústica. Isto torna um pouco mais fácil obter um reator eletrônico operando em altas frequências para este tipo de lâmpada [4]. Para tentar evitar os efeitos da ressonância acústica, operando com inversores em alta frequência, varia pesquisas foram propostas na literatura e estão resumidas a seguir:

- i. operar em altas frequência (20 a 200)kHz, nas faixas estreitas em que não ocorre a ressonância [27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38];
- ii. operar acima da faixa em que ocorre a ressonância acústica, normalmente em frequência superiores a 500kHz [39, 40, 41, 42, 43];
- iii. operar em baixas frequências (50 a 500Hz), acionando a lâmpada com corrente retangular [4, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51];
- iv. utilizar uma estratégia de modulação que altere a frequência do inversor através de um circuito de controle inteligente antes que a ressonância acústica evolua [6, 18, 52, 53, 54, 55, 56];
- v. injeção de harmônicas à fundamental de alta frequência com o intuito de se aproximar da onda quadrada e mais recentemente [6, 20, 57, 60, 61, 62]. É justamente neste item que serão focados os estudos dessa dissertação de mestrado.

## **1.7 - CONCLUSÃO**

A lâmpada de vapor de sódio é constituída basicamente por um tubo de descarga com eletrodos em suas extremidades. No interior do tubo contém um gás inerte para auxiliar a partida e sódio metálico a ser vaporizado.

A lâmpada possui três fases distintas de operação:

- Partida – quando há o rompimento do dielétrico e o início da descarga. Para isso são necessários pulsos de alta tensão;

- Aquecimento- quando ocorre o aumento da temperatura do tubo, com a vaporização do metal e o aumento da pressão;
- Operação em regime permanente – quando a pressão do tubo atinge o equilíbrio, junto com o brilho da lâmpada. Esta fase tem como característica o lento aumento da tensão do arco ao longo do tempo de vida da lâmpada.

A lâmpada de vapor de sódio necessita de um dispositivo limitador de corrente para seu acionamento, além de altas tensões para a partida. Os reatores eletromagnéticos com circuitos ignitores compõem a forma convencional de acionamento, possuindo baixo custo e elevada robustez. As desvantagens deste tipo de acionamento são:

- Elevado tamanho e peso;
- Pobre regulação de potência;
- Dificuldade para o controle do fluxo luminoso;
- Necessidade de utilizar um capacitor para correção de fator de potência;
- Efeito estroboscópico;
- Longo tempo de duração da fase de aquecimento da lâmpada.

A ressonância acústica é a principal limitação dos reatores eletrônicos neste capítulo foram mostradas as soluções para evitar a ressonância acústica. A solução adotada foi utilizar uma frequência de inferior a 2kHz.

## **CAPÍTULO 2**

### **INJEÇÃO DE FORMA DE ONDAS SINTETIZADAS**

#### **2.1 - INTRODUÇÃO**

A solução de se utilizar uma frequência fixa entre (20 – 200) kHz, escolhendo uma faixa de frequência em que não ocorra a ressonância acústica não é eficiente devido à dependência da ressonância acústica com a potência da lâmpada, a sua variação de acordo com o fabricante e até mesmo a possível variação de acordo com a vida útil da lâmpada.

Diante desse problema a técnica de injeção de harmônicas e ainda a utilização de uma faixa de frequência pouco utilizada, que é de 1000 Hz a 10 kHz. Para evitar a ressonância acústica [61].

A injeção de harmônicas é baseada no espalhamento do espectro de frequências da potência aplicada à lâmpada. Dessa forma, reduz-se a potencia associada a cada uma das componentes harmônicas. Se qualquer uma destas frequências corresponderem à ressonância acústica, a intensidade (potência) associada a ela não será suficiente para excitar este fenômeno [6, 14, 57-62].

Este capítulo apresenta uma nova técnica de injeção de harmônicas em lâmpadas HPS, com a utilização de um amplificador classe D proposto em [76]. Simplificando a geração do sinal aplicado à lâmpada de alta pressão de sódio [58, 59, 62].

#### **2.2 - INJEÇÃO DE FORMA DE ONDA SINTETIZADAS EM LÂMPADAS HPS**

A injeção de formas de ondas sintetizadas foi apresentada na literatura em [6, 20, 56, 60, 61], onde foram realizadas investigações sobre a injeção de harmônicas à tensão aplicada na lâmpada [3, 6, 14, 20], com o objetivo de eliminar a Ressonância Acústica em lâmpadas *HID*.

O objetivo desta dissertação consiste na investigação de uma nova técnica de injeção de harmônicas utilizando frequências abaixo de 1kHz para evitar o fenômeno da ressonância acústica na lâmpada de *HPS*, utilizando um amplificador de sinal classe D. As técnicas que

vem sendo adotadas, para se injetar harmônicas está baseada no projeto de filtros passivos e no comando dos braços do inversor [14, 20] e através da soma das harmônicas desejadas ao sinal senoidal de referência do *PWM* (Pulse Width Modulation) para a síntese da tensão aplicada ao filtro *LC*.

### 2.2.1 - INJEÇÃO DE HARMONICAS VIA FILTROS LC

A técnica proposta por [14] consiste em alimentar lâmpadas HID com forma de onda senoidal sobreposta com a terceira harmônica conforme mostrado na Figura 2.1. Onde são usados dois inversores em meia-ponte, um operando com a frequência de chaveamento igual à frequência fundamental (demonstrado na figura como o braço 1 do inversor) e o outro braço operando com a frequência de chaveamento igual a três vezes a frequência da fundamental (demonstrado na figura como o braço 2 do inversor). Dois filtros ressonantes típicos são usados para alimentar a lâmpada, um para cada braço. O capacitor  $C_{B1}$  e  $C_{B3}$  são usados para bloquear a componente CC e não como um dos elementos dos filtros ressonantes. Os filtros ressonantes são compostos com os elementos  $L_1$  e  $C$  para o braço da fundamental e dos elementos  $L_3$  e o mesmo capacitor  $C$  para o braço que gera a terceira harmônica [14].

As formas de onda dos comandos para as chaves do inversor são mostradas na Figura 2.2(a) onde pode-se observar o atraso entre as duas formas de onda representado por  $t_{\phi}$ , enquanto a Figura 2.2(b) mostra as formas de onda das tensões de saída de cada filtro passivo ( $V_{LA1}$  e  $V_{LA3}$ ) e a forma de onda da tensão aplicada à lâmpada,  $V_{LA}$ .

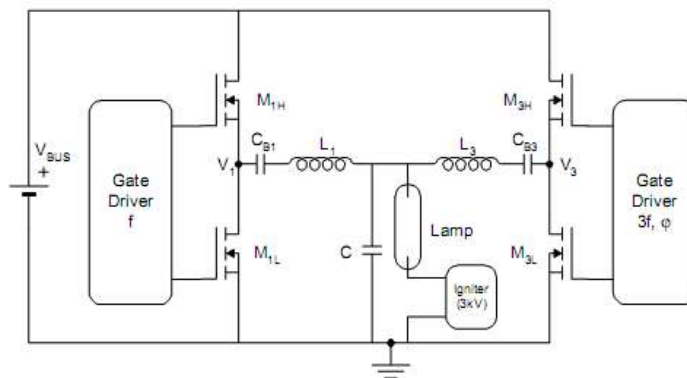


Figura 2.1: Diagrama do circuito utilizado pela técnica proposta por [14, 20]

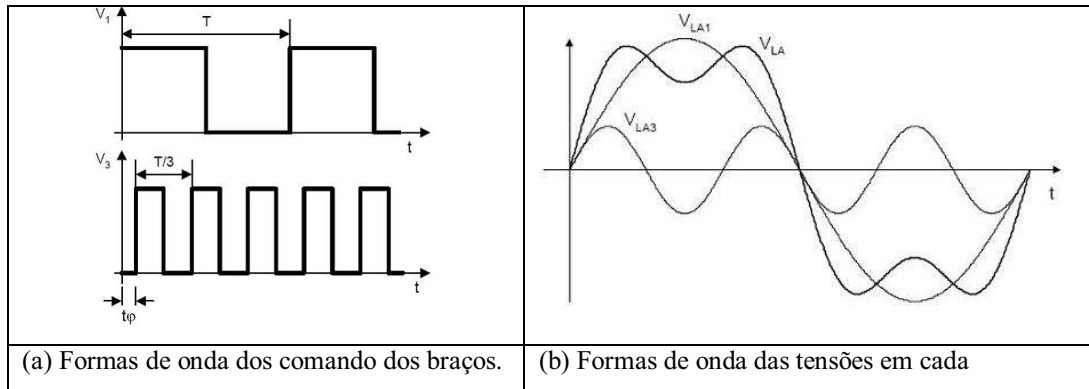


Figura 2.2: Comandos para o inversor com a técnica de injeção de harmônicas e as formas de tensão [6, 14, 20, 57, 60, 61].

As desvantagens deste método são: a necessidade de um filtro passivo para cada harmônica injetada, aumentando dessa forma a quantidade de componentes, o custo, peso e a quantidade de braços no caso de injetar-se harmônicas acima da 3ª, tornando mais complexo os comandos do inversor e conseqüentemente menos confiável o reator.

### 2.2.2 - INJEÇÃO DE HARMÔNICAS VIA PWM

A injeção de harmônicas através da soma das harmônicas desejadas ao sinal senoidal de referência do PWM (Pulse Width Modulation) para a síntese da tensão aplicada ao filtro LC que proporcionará a tensão de regime à lâmpada.

A equação 2.1 descreve o sinal de referência do modulador PWM.

$$S_{ref} = \sum_{i=1}^n a_i \sin(2i\pi f_{fund}t) \quad (2.1)$$

Onde:  $f_{fund}$  é a frequência fundamental da tensão injetada.

Uma vantagem imediata deste método é a necessidade de se projetar apenas um filtro LC de saída e outra é a simplicidade da geração do sinal de referência, sem a necessidade do cálculo do ângulo de defasagem ( $\phi$ ) entre os comandos dos braços do inversor. Por outro lado, é possível incluir outros harmônicos na tensão da lâmpada bem como sintetizar formas de ondas arbitrárias. A síntese dos componentes harmônicos injetados via PWM é feita digitalmente e com isto, a modificação dos sinais injetados é facilmente implementada via software. A figura 2.3 mostra o reator baseado na técnica de injeção de harmônicas através da

soma das harmônicas desejadas ao sinal senoidal de referência do *PWM* (*Pulse Width Modulation*) para a síntese da tensão aplicada ao filtro *LC*.

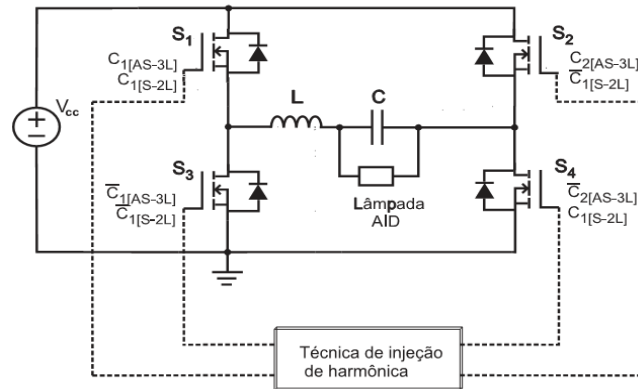


Figura 2.3: Diagrama do circuito que utiliza a técnica de injeção de harmônicas apresentada em [6, 57, 60, 61]

Uma das vantagens apresentadas sobre esta técnica está na utilização de apenas um filtro *LC* na saída do inversor e a simplicidade do cálculo do ângulo de condução dos comandos dos braços do inversor em relação à topologia apresentada em [14, 20].

A Figura 2.4 apresenta as formas de onda para a fundamental e para 3ª harmônica e a resultante que será a referência para o *PWM*, dessa forma sintetizar a tensão aplicada à lâmpada *HPS*.

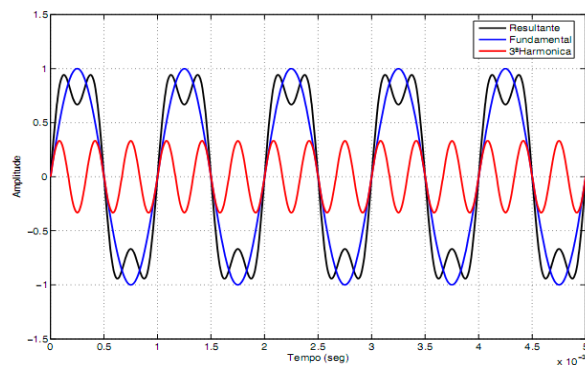


Figura 2.4: Forma de onda de referência para o *PWM*. [6, 57, 60, 61]

As duas técnicas apresentadas acima são utilizadas para o acionamento de uma lâmpada *HPS*. Onde para o acionamento de mais de uma lâmpada seria necessária a utilização de um filtro para cada lâmpada acrescentadas.

### 2.3 - NOVO REATOR ELETRÔNICO PROPOSTO PARA ACIONAMENTO DE LÂMPADAS HPS

Esta dissertação apresenta uma proposta de reator eletrônico, que pode ser utilizado para acionar uma ou mais lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão. O reator proposto alimenta as lâmpadas, com injeção de harmônica, com a frequência da fundamental próxima a 1 kHz, de modo a evitar a ressonância acústica, manter o fluxo luminoso constante e evitar o elevado EMI típico de ondas retangulares. O reator proposto tem como característica a facilidade de gerar o sinal de referência aplicado na lâmpada, sem a utilização de filtros ressonantes na saída do reator.

A figura 2.5 mostra o reator proposto e o modo de ligação das lâmpadas HPS. Onde podem ser ligadas lâmpadas de mesma potência ou de potências diferentes. As lâmpadas tem que ter a mesma tensão de alimentação.

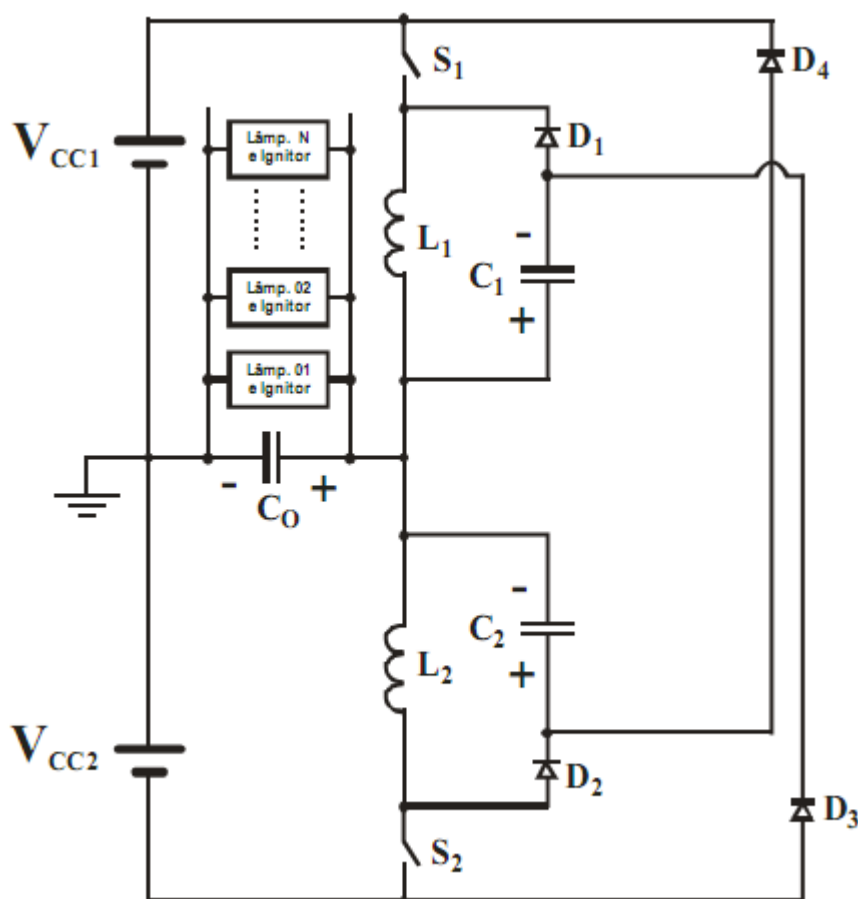


Figura 2.5: Reator Eletrônico Proposto para o acionamento de uma ou mais lâmpadas HPS [59, 59, 62]

O reator proposto funciona como um amplificador realimentado, nos amplificadores não realimentados, a amplitude do sinal PWM gerado depende do nível de tensão da fonte de alimentação do circuito de potência. Qualquer oscilação na tensão de alimentação é repassada para o sinal PWM que provocará distorção na forma de onda do sinal de referência.

É importante ressaltar que as fontes de alimentação auxiliares não necessitam ser estabilizadas pelo fato da topologia ser realimentada além de não possuir filtro ressonante adicional na saída. Para melhor entender como essas vantagens foram implementadas, o controle e as etapas de operação serão comentadas na próxima seção.

### **2.3.1 - ESTRATÉGIA DE CONTROLE**

Inversores em meia-ponte e ponte-completa com um filtro passa baixa na saída são muito utilizados, na prática, para amplificar sinais periódicos genéricos quando se deseja baixa taxa de distorção harmônica no sinal amplificado. Nestas aplicações, um DSP com técnicas de controle avançadas é utilizado para gerar, a partir do sinal de referência e sinal de realimentação, os sinais de chaveamento aplicados nas chaves do inversor de modo a se atingir a resposta dinâmica desejada e manter a carga livre de distúrbios ou variações dos parâmetros do circuito [76, 77, 78].

O novo reator proposto não necessita de DSP e de técnicas de controle avançados para gerar um sinal periódico genérico amplificado a partir de um sinal de referência. Ao invés do DSP, o circuito proposto utiliza um comparador com histerese como pode ser observado na Fig. 2.6. Conseqüentemente, o sinal de referência pode ser gerado por meio de um microcontrolador de baixo custo [76, 77, 78].

A frequência de chaveamento, nesta aplicação, depende da dinâmica da realimentação. No reator proposto, a frequência de chaveamento está em torno de 50 kHz [76, 77, 78]. Um divisor resistivo é usado para coletar uma amostra do sinal de saída do capacitor  $C_o$ . Este sinal é então enviado para uma entrada inversora de um comparador. Na entrada não inversora é aplicado o sinal de referência desejado. O resultado da comparação gerada pelo comparador é usado para comandar as chaves  $S_1$  e  $S_2$  de modo complementar [58].

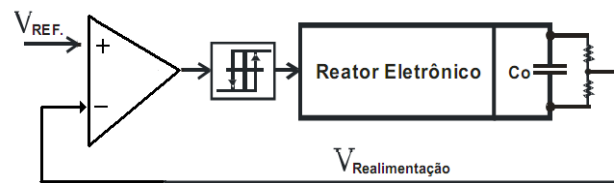


Figura 2.6- Diagrama de blocos da estratégia de controle [58].

Desta forma a impedância de entrada do estágio de controle é igual à impedância de entrada do amplificador operacional (Amp. Op.) utilizado como comparador. Para melhor compreender a função da topologia proposta no processo de amplificar um sinal programável, alguns circuitos simples utilizando Amp. Op. serão abordados a seguir.

Quando se deseja amplificar um sinal que apresenta reduzida potência, um dos circuitos mais utilizados na prática é o seguidor de tensão (*BUFFER*), Figura 2.7, que apresenta as características de [76, 77, 78]:

- Alta impedância de entrada;
- Baixa impedância de saída;
- Ganho unitário.

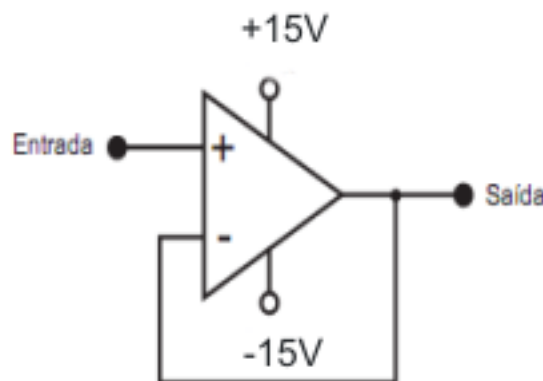


Figura 2.7: Seguidor de tensão (buffer) [76].

A potência máxima na saída do amplificador está limitada à corrente e tensão máxima na saída do amplificador operacional utilizado. Quando se deseja maior potência é necessário acrescentar um estágio de potência na saída do amplificador operacional utilizado como indica a Figura 2.8.

Esse estágio de saída é obtido por um push-pull composto por um transistor NPN e outro PNP. A realimentação passa a ser realizada a partir da saída do estágio de potência acrescentado. O limite máximo de corrente passa a ser o valor nominal de corrente fornecida

pelos transistores utilizados no estágio de potência. Os transistores nesta configuração operam na região linear o que confere ao estágio de potência baixo rendimento [76].

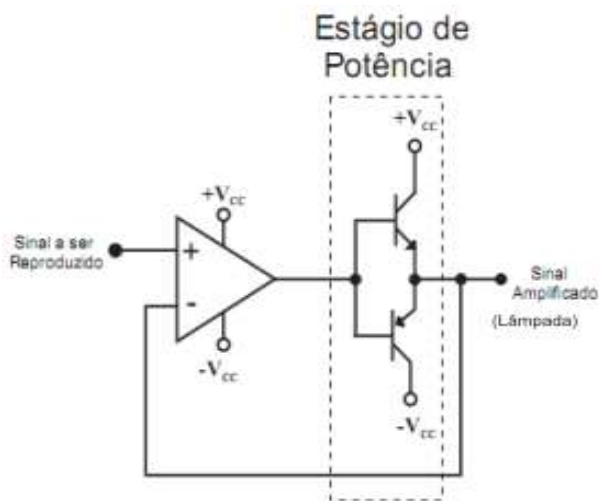


Figura 2.8: Seguidor de tensão com saída push pull a transistor.

Para resolver o problema do baixo rendimento pode-se utilizar ao invés dos transistores Mosfets ou IGBTs, que são acionados por tensão e operam no corte e na saturação [76].

Uma das desvantagens deste tipo de circuito é possuir na saída um sinal PWM que, posteriormente, necessita de um filtro para recompor o sinal amplificado [76].

Retornando ao circuito seguidor de emissor verifica-se que o ganho deste circuito é unitário, mas pode ser alterado se na saída for acrescentado um divisor resistivo para que o circuito passe a possuir controle de ganho como mostrado na Figura 2.9. Esse circuito é conhecido como amplificador não inversor e cujo o ganho é fornecido pela equação 2.2 [76]. Nota-se pela equação que, quando o valor do resistor  $R_2$  tende a zero o valor do ganho tende a ser unitário. Assim, se o valor da resistência  $R_2$  tender a zero e  $R_1$  tender a infinito o circuito se torna um seguidor de emissor cujo o ganho é unitário. Por outro lado quando se deseja um ganho de valor elevado o valor de  $R_2$  deve ser elevado com relação a  $R_1$ .

Considerando que o estágio de potência do amplificador não inversor, mostrado na figura 2.9, e tomando-se todas as precauções para que os Mosfets ou IGBTs, utilizados no estágio de potência, sejam devidamente acionados por drivers próprios para esta aplicação, obtém-se o reator proposto. A semelhança prossegue no que se refere ao ganho, pois a Equação 2.2 utilizada par o cálculo do ganho do amplificador não inversor também é utilizado para o cálculo do ganho do reator eletrônico. Essas observações reforçam a decisão tomada de se denominar o conjunto composto pelo controle do reator eletrônico proposto.

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.2)$$

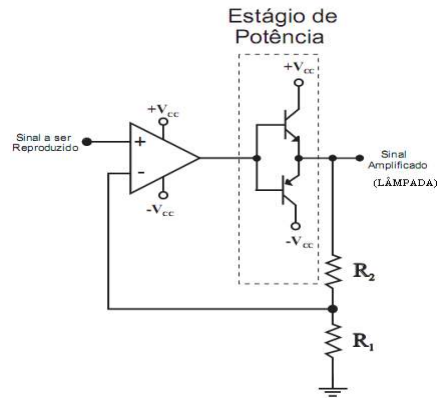


Figura 2.9: Amplificador não inversor [76]

### 2.3.2 - PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DE OPERAÇÃO DO REATOR PROPOSTO

Da mesma forma que o seguidor de tensão, o conversor proposto amplifica em potência a forma de onda de referência aplicada na entrada não inversora do comparador utilizado no controle.

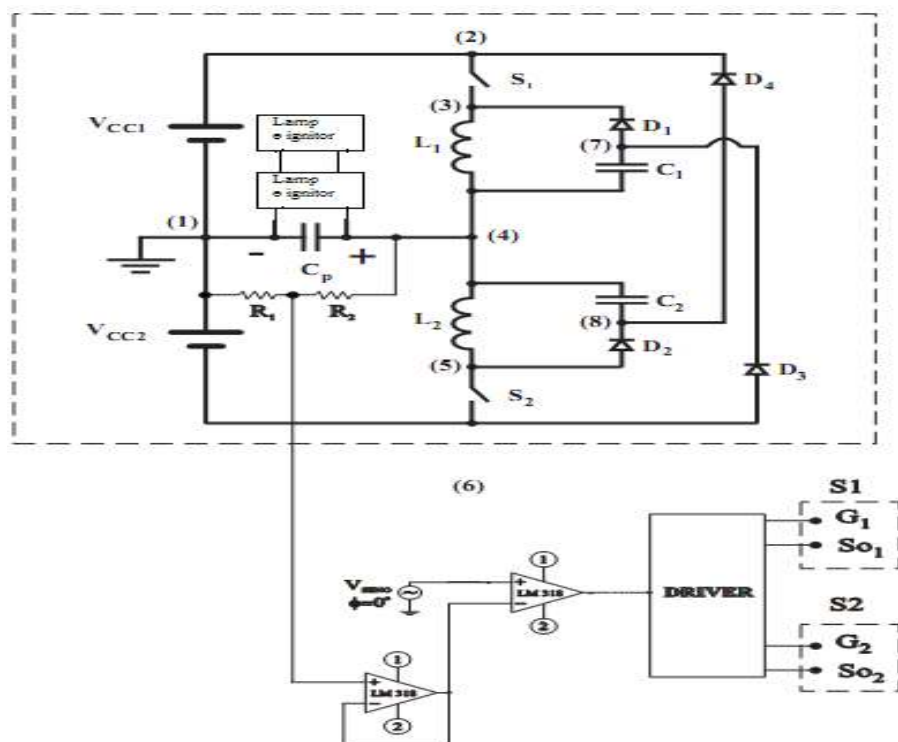


Figura 2.10- Reator proposto com circuito de controle [76].

No reator eletrônico proposto a realimentação na entrada inversora do amplificador operacional é realizada por um divisor resistivo que retira uma amostra de tensão do capacitor  $C_P$ , como mostrado na Figura 2.10, já que a forma de onda amplificada é modulada sobre este capacitor [76].

Toda vez que a tensão de referência ultrapassa a amostra de tensão no capacitor  $C_P$ , a saída do comparador satura em nível alto e a lógica de controle abre a chave  $S_2$  e aciona a chave  $S_1$ , por meio dos “drivers” de gatilho, para que a tensão do capacitor  $C_P$  cresça. Esta operação será denominada Etapa 1, Figura 2.11(a). De modo semelhante, quando a tensão de referência é inferior a amostra de tensão no capacitor  $C_P$  o comparador satura em nível baixo e a lógica de controle abre a chave  $S_1$  e fecha a chave  $S_2$ , sendo esta operação denominada Etapa 2, Figura 2.11(b) [76].

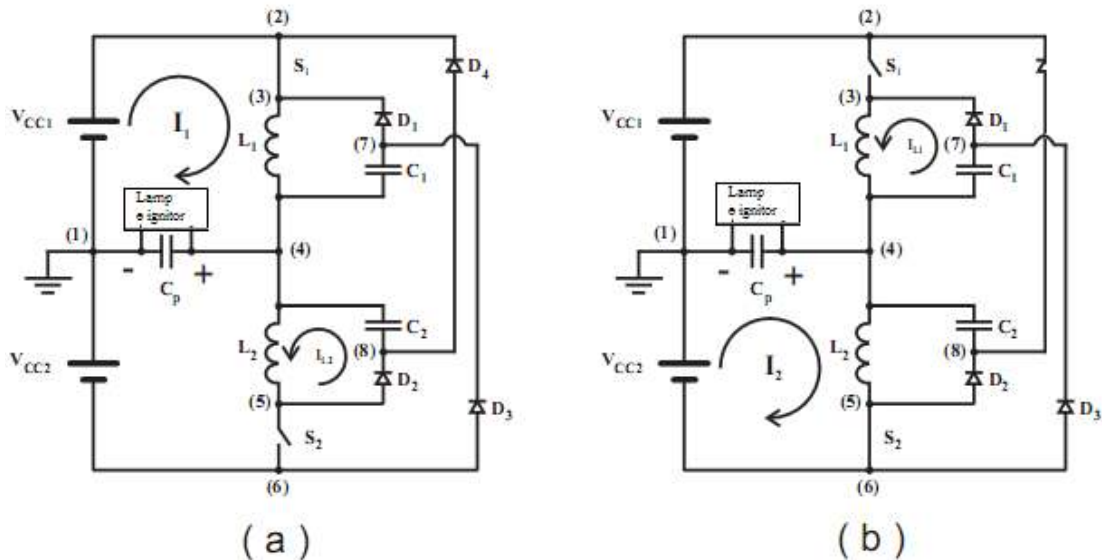


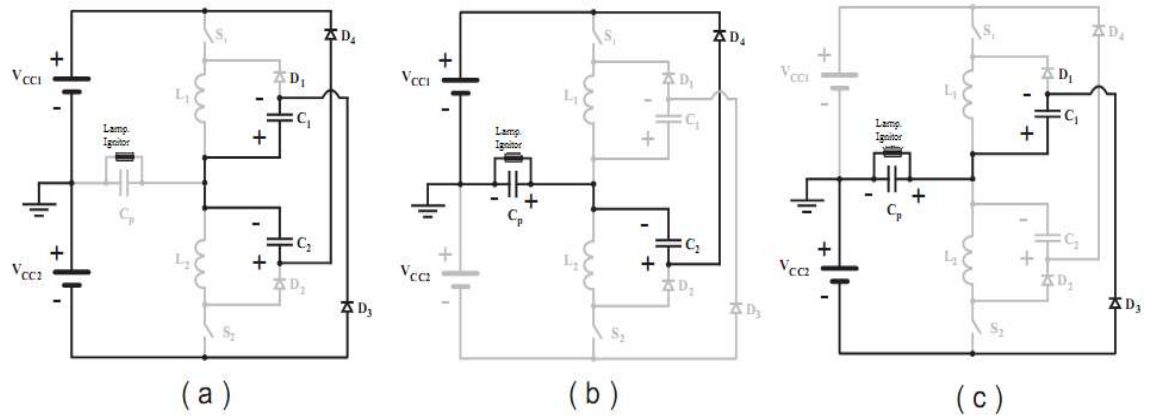
Figura 2.11: (a) Tensão cresce no capacitor  $C_P$  e (b) Tensão decresce no capacitor  $C_P$  [76].

Sempre que a chave  $S_1$  abre, a tensão no indutor  $L_1$  cresce e a medida que se torna superior a tensão no capacitor  $C_1$  mais 0,7V o diodo  $D_1$  fica polarizado de modo direto fazendo com que a energia armazenada no indutor  $L_1$  seja transferida para o capacitor  $C_1$ . O mesmo processo ocorre quando a chave  $S_2$  é aberta, onde a energia é transferida para o capacitor  $C_2$  [76].

No sentido de esclarecer o princípio de operação do amplificador, algumas considerações são relevantes no momento em que as duas chaves estão abertas [76].

- Em qualquer instante de tempo a soma das tensões sobre  $C_1$  e  $C_2$  é igual a soma das tensões das fontes  $V_{CC1}$  e  $V_{CC2}$  ( $V_{C1} + V_{C2} = V_{CC1} + V_{CC2}$ ) como indicado na Figura 2.12(a).

- O capacitor  $C_2$  constitui uma fonte de tensão, no sentido indicado na Figura 2.12(b) ( $V_{C2} = V_{CC1} - V_{CP}$ ).
- O capacitor  $C_1$  constitui uma fonte de tensão, no sentido indicado na Figura 2.12(c) ( $V_{C1} = V_{CP} + V_{CC2}$ ).



$$V_{C1} + V_{C2} = V_{CC1} + V_{CC2}$$

$$V_{C2} = V_{CC1} - V_{CP}$$

$$V_{C1} = V_{CP} + V_{CC2}$$

Figura 2.12: Relação entre as tensões nos capacitores e as fontes de alimentação [76].

Deste modo, toda vez que as duas chaves abrem, caso haja energia armazenada nos indutores  $L_1$  e  $L_2$ , ela será transferida para os respectivos capacitores e na condição de  $V_{C1} + V_{C2} > V_{CC1} + V_{CC2}$  os diodos  $D_3$  e  $D_4$  ficam diretamente polarizados mantendo a igualdade entre as tensões das fontes e dos capacitores ( $V_{C1} + V_{C2} = V_{CC1} + V_{CC2}$ ) conforme mostrado na figura 2.12(a) [76, 77, 78].

Se a chave  $S_1$  estiver conduzindo, a tensão no capacitor  $C_P$  irá crescer e, conseqüentemente, a tensão no capacitor  $C_2$  terá que se ajustar para manter a relação  $V_{C2} = V_{CC1} - V_{CP}$  como mostra a Figura 2.12(b). Neste momento, quando  $V_{C2}$  for ligeiramente maior que  $V_{CC1} - V_{CP}$ ,  $V_{C2}$  pode ser descarregado através de  $L_1$  como mostra a Figura 2.12(a). O mesmo ocorre quando  $S_2$  fecha, ou seja, a tensão no capacitor  $C_1$  terá que se ajustar para atender a relação  $V_{C1} = V_{CP} + V_{CC2}$ , como é exibido na Figura 2.11(c). Na situação em que  $V_{C1}$  for ligeiramente maior que  $V_{CP} + V_{CC2}$ ,  $V_{C1}$  pode ser descarregado através de  $L_2$  como mostra a Figura 2.13(b) [76].

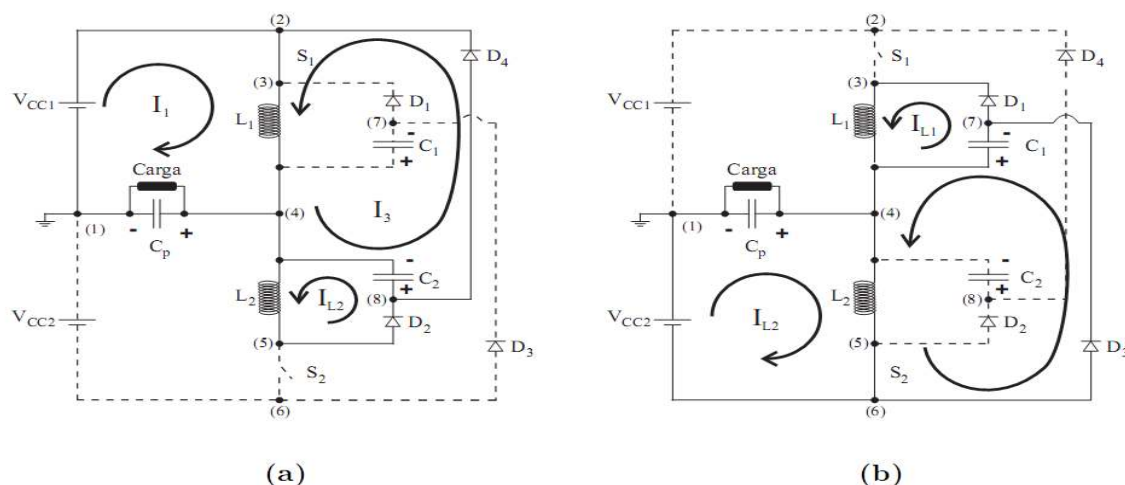


Figura 2.13: (a)  $S_1$  estiver conduzindo; (b)  $S_2$  estiver conduzindo [76].

## 2.4 - GERAÇÃO DO SINAL DE REFERÊNCIA

Nos testes realizados em laboratório com o gerador do sinal de referência, a forma de onda desejada é configurada por meio de uma interface desenvolvida para plataforma Windows<sup>®</sup>. A geração da forma de onda também pode ser feito através do MATLAB<sup>®</sup> ou Microsoft Excel<sup>®</sup>. Os parâmetros como amplitude da fundamental e da componente harmônica desejada são gravadas em uma tabela de pontos, o  $\mu C$  converte a tabela de pontos em um sinal analógico através do conversor DA.

O gerador do sinal de referencia utiliza um  $\mu C$  ARM, modelo LPC2148, de 32 bits com 512 kB de memória flash, interface USB e conversores AD e DA de 10 bits, clock da CPU de 60 MHz. O  $\mu C$  ARM é capaz de gerar um sinal de referência com 3 kHz com 360 pontos de resolução. Para um reator eletrônico comercial pode utilizar um  $\mu C$  de 8 bits para a construção do gerador de sinal de referência.

## 2.5 - CIRCUITO LÂMPADA E IGNITOR

A tensão de ignição para lâmpadas HID é obtida, em geral, de duas formas: por um circuito ignitor externo que gera pulsos de alta tensão através de um transformador ou por um circuito ressonante operado em alta frequência. O método de ignição dependerá das características do reator que está sendo utilizado [58,32]. Para o acionamento das lâmpadas por inversores em alta frequência, o circuito ressonante é a solução normalmente mais empregada.

Para acionamento das lâmpadas em baixa frequência, por reatores convencionais ou eletrônicos, um circuito ignitor externo que provê pulsos de alta tensão é mais interessante, pois caso a opção fosse o circuito ressonante (LCC) haveria uma sobre corrente associada a cada lâmpada, assim como a necessidade de um circuito LCC para cada lâmpada e a exigência de se fazer uma varredura para atingir a quase ressonância de cada filtro.

Deste modo, um circuito ignitor externo é mais adequado para ser implementado no arranjo proposto como pode ser observado na Fig. 2.14 [11].

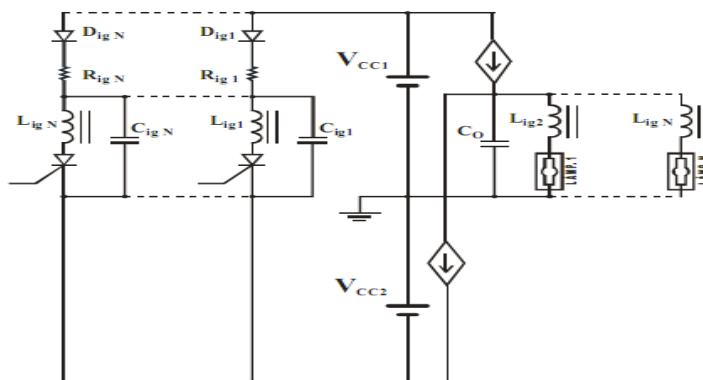


Figura 2.14: Ligação de lâmpadas e ignitores no reator proposto.[58,59,62]

Neste caso, nenhum filtro adicional sintonizado é necessário, visto que, a forma de onda de referência é amplificada e disponibilizada no capacitor  $C_O$  com baixa taxa de distorção harmônica. O reator eletrônico proposto pode ser utilizado para acionar uma ou mais lâmpadas desde que a soma das potências das lâmpadas acionadas não ultrapasse a potência nominal do reator.

Os pulsos de gatilho do ignitor foram obtido através do microcontrolador, utilizando portas de I/O para gerar os pulsos a serem aplicados no gate das chaves. A Fig. 2.15(a) mostra os resultados experimentais da tensão de ignição medida na lâmpada HPS de 150 W. De acordo com as normas NBR 13593 e NBR 14305, o valor mínimo do pulso de tensão aplicado em uma lâmpada de HPS de 150 W é de 2,8 kV e o valor máximo é de 4,5 kV [16, 17]. O número mínimo de pulsos por semi-período da rede, para esta lâmpada, é igual a um. Isto define uma frequência mínima de 120 pulsos por segundo. A Fig. 2.15(b) exibe uma sequência de três pulsos, com intervalo de 1,5 ms [58].

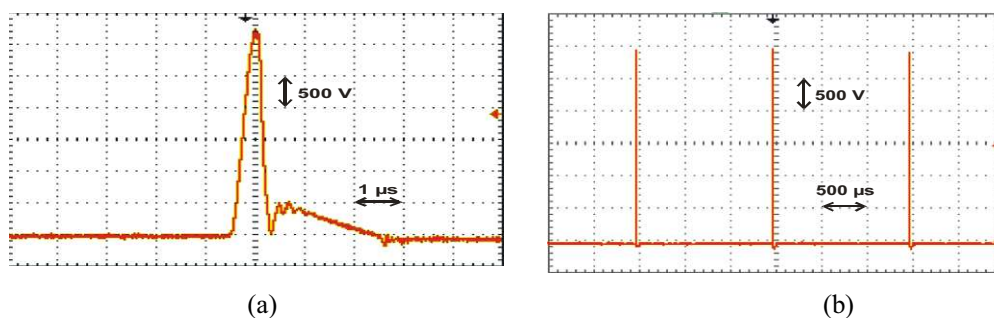


Figura 2.15: Formas de onda de tensão do ignitor aplicado em uma lâmpada HPS de 150W da PHILIPS® [58].

## 2.5.1 - EQUAÇÕES PRINCIPAIS DO PROJETO

A máxima variação de tensão por unidade de tempo (“Slew-Rate”) é um dos aspectos a ser considerado para o correto projeto do amplificador. O “slew rate” máximo é determinado considerando-se a máxima frequência de onda senoidal ou triangular a ser amplificada. Quanto maior a frequência, maior é a taxa da variação de tensão necessária para reproduzir uma forma de onda senoidal ou triangular. A forma de onda quadrada não pode ser considerada no cálculo da máxima taxa de variação de tensão, já que teoricamente, o “Slew-Rate” necessário para reproduzi-las é infinito [76] maiores detalhes sobre a análise matemática pode ser encontrado em [76].

### 2.5.1.1 - EQUAÇÕES DO REATOR PROPOSTO

O equacionamento detalhado da topologia proposta foi apresentado em [76], de onde foram extraídas as equações de 2.3 à 2.9.

1º PASSO – Especificar o valor da potência de saída  $P_o$ , da tensão de pico de saída  $V_{O(PK)}$  e da frequência máxima  $f_{MAX}$  a ser modulada no capacitor  $C_o$ .

2º PASSO – Calcular o valor da tensão RMS nominal na carga ( $V_o$ ) usando (2.3).

$$V_o = \frac{V_{(PK)}}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

onde:

Po = Potência nominal RMS de saída; Vo = Tensão nominal RMS de saída;

Io = Corrente nominal RMS de saída.

3º PASSO – Calcular a corrente nominal RMS na carga utilizando (3.4).

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} \quad (2.4)$$

4º PASSO – Calcular a corrente de pico na carga através de (2.5).

$$I_{O(PK)} = I_o \cdot \sqrt{2} \quad (2.5)$$

5º PASSO – Calcular o valor da capacitância total  $C_T = C_1 + C_2 + C_o$ .

$$C_T = \frac{I_{PK}}{2 \cdot \pi \cdot f_{MAX} \cdot V_{PK}} \quad (2.6)$$

6º PASSO – Calcular o valor de  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_o$  por meio das equações (2.7) e (2.8).

$$C_1 = C_2 = \frac{2}{5} \cdot C_T \quad (2.7)$$

$$C_o = \frac{C_T}{5} \quad (2.8)$$

6º PASSO – Finalmente, calcular o valor da indutância dos indutores  $L_1$  e  $L_2$ .

$$L_1 = L_2 = \frac{V_{CC}^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_{\max}^2 \cdot V_{pk}^2 \cdot C_T} \quad (2.9)$$

Um exemplo será demonstrado no próximo capítulo. Demonstrando os valores encontrados no protótipo construído.

### 2.5.1.2 - O CIRCUITO DE IGNIÇÃO

O circuito de ignição é composto pelo resistor  $R_{ig}$ , pelo tiristor  $S_{ig}$ , pelo diodo  $D_{ig}$ , pelo capacitor  $C_{ig}$  e pelos indutores acoplados  $L_{ig1}$  e  $L_{ig2}$ . As principais formas de onda do circuito de ignição são mostradas na Figura 2.16 [11].

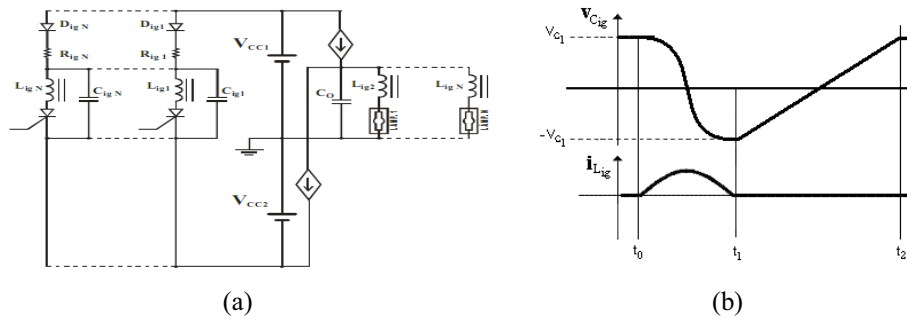


Figura 2.16: Formas de Onda do Circuito de Ignição: (a)-Circuito; (b)- Formas de onda.

Os pulsos de ignição são obtidos através do Circuito de Ignição da seguinte forma [11]:

1. Com o capacitor  $C_{ig}$  previamente carregado, o tiristor  $S_{ig}$  dispara em  $t_0$ , iniciando a ressonância entre  $L_{ig1}$  e  $C_{ig}$ ;
2. Durante o intervalo de tempo entre  $t_0$  e  $t_1$ , o pulso de tensão gerado em  $C_{ig}$  devido à ressonância se reflete em  $L_{ig2}$  a uma amplitude maior. No período de duração do pulso, o diodo  $D_{gr}$  conduz, grampeando a tensão sobre os interruptores do inversor;
3. No instante  $t_1$  a ressonância é bloqueada pelo diodo e o capacitor  $C_{ig}$  passa a se carregar através do barramento CC;
4. Em  $t_2$ ,  $C_{ig}$  está novamente carregado e o processo para obtenção de um pulso de sobretensão pode ser iniciado novamente.

A relação de espiras nos indutores acoplados é definida como a relação entre a tensão de ignição da lâmpada  $V_{ig}$  e a tensão no capacitor  $C_{ig}$ . Portanto:

$$\eta_{ia} = \frac{V_{ig}}{V_g} \quad (2.10)$$

Para compensar as perdas de energia nas indutâncias parasitas, é aconselhável aumentar de 25% a 50% a relação de espiras encontrada em (2.10).

A indutância  $L_{ig2}$  é obtida através da relação de espiras da seguinte forma:

$$L_{ig2} = \eta_{ia}^2 \cdot L_{ig1} \quad (2.11)$$

A duração do pulso de ignição  $t_{pulso}$  é igual à metade do intervalo de tempo compreendido entre  $t_0$  e  $t_1$ . Este intervalo de tempo corresponde a um quarto do período de ressonância entre o indutor  $L_{ig1}$  e o capacitor  $C_{ig}$  [11]. Portanto:

$$t_{pulso} = \frac{\pi \sqrt{L_{ig} \cdot C_{ig}}}{2} \quad (2.12)$$

O pulso de ignição deve ocorrer com o capacitor  $C_{ig}$  totalmente carregado com tensão igual a do barramento CC. Portanto, o intervalo de tempo entre  $t_1$  e  $t_2$  pode ser aproximado por:

$$t_{12} = 10R_{ig} \cdot C_{ig} \quad (2.13)$$

A frequência dos pulsos de ignição  $f_{ig}$  é definida por [11]:

$$f_{ig} = \frac{1}{2t_{pulso} + t_{12}} \quad (2.14)$$

Substituindo as equações (2.13) e (2.14) na equação (2.15) chega-se a [11]:

$$f_{ig} = \frac{1}{\pi \sqrt{L_{ig} \cdot C_{ig}} + 10R_{ig} \cdot C_{ig}} \quad (2.15)$$

Para que  $C_{ig}$  seja carregado com tensão do barramento CC, a partir da equação (2.15), encontra-se [11]:

$$R_{ig} < \frac{1 - f_{ig} \cdot \pi \sqrt{L_{ig} \cdot C_{ig}}}{10 \cdot C_{ig} \cdot f_{ig}} \quad (2.16)$$

## 2.6 - CONCLUSÃO

Este capítulo mostrou duas formas de injeção de forma de ondas sintetizadas apresentada na literatura em 2005 por [14], com a finalidade de evitar a ressonância acústica, e por [6] em 2007 propondo melhorias no modo de operação do inversor full-bridge com a utilização de apenas um filtro sintonizado.

A utilização de um amplificador de sinal para injetar forma de ondas sintetizadas na lâmpada HPS, o reator proposto utilizando o amplificador tem como principal vantagem a facilidade da geração do sinal aplicado na lâmpada. Com isso os resultados experimentais serão demonstrados no próximo capítulo mostrando as formas de ondas aplicada na lâmpada HPS.

O projeto do reator proposto foi mostrado neste capítulo, assim como, o ignitor utilizado e o projeto do ignitor utilizado, com as formas de ondas do ignitor que é aplicada à lâmpada.

## CAPÍTULO 3 EXEMPLO DE PROJETO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 3.1 - INTRODUÇÃO

Para verificar experimentalmente o funcionamento do reator eletrônico proposto, um protótipo foi construído, acionando lâmpadas *HPS* de 100W, 150W, 250W e 400W.

Este capítulo apresenta um exemplo de projeto para a determinação dos parâmetros e componentes do circuito, além da análise da estabilidade da malha de controle. Ao final, são mostrados os resultados experimentais obtidos com o protótipo construído.

### 3.2 - EXEMPLO DE PROJETO

#### 3.2.1 - CÁLCULO DO REATOR ELETRÔNICO

Deseja-se projetar um amplificador de 1000W que seja capaz de modular uma senóide de 125V de pico de frequência máxima de 4kHz.

Tabela 3-1: Especificação do Projeto.

| COMPONENTES               | VALORES             |
|---------------------------|---------------------|
| $P_o$                     | 800W                |
| $V_{O(pk)}$               | 114V                |
| $f_{max}$                 | 2kHz                |
| $I_{L1(pk)} = I_{L2(pk)}$ | $\square I_{CARGA}$ |

A tensão nominal eficaz na carga ( $V_o$ ) é:

$$V_o = \frac{V_{O_{pk}}}{\sqrt{2}} \quad (3.1)$$

$$V_o = \frac{114}{\sqrt{2}} = 80V \quad (3.2)$$

$$P_o = V_o \cdot I_o \quad (3.3)$$

Onde:

- $P_O$  = Potência nominal eficaz de saída
- $V_O$  = Tensão nominal eficaz de saída
- $I_O$  = Corrente nominal eficaz de saída

A corrente nominal eficaz na carga é dada pela Equação 3.3.

$$I_O = \frac{800W}{80V} = 10A$$

A corrente de pico na carga:

$$I_{O_{pk}} = 10 \cdot \sqrt{2} = 14,4A$$

Usando a Equação 4.6, o valor da capacitância  $C_T$  é:

$$C_T = \frac{14,4A}{2 \cdot \pi \cdot 2000Hz \cdot 114} = 10\mu F$$

Adotando  $C_1 = C_2 = 2 \cdot C_S$  a capacitância  $C_P, C_I$  e  $C_2$  é:

$$C_1 = C_2 = \frac{2}{5} \cdot C_T = \frac{2}{5} \cdot 10\mu F = 4\mu F$$

$$C_P = \frac{C_T}{5} = \frac{10\mu F}{5} = 2\mu F$$

Finalmente o valor da indutância dos indutores  $L_1$  e  $L_2$  é obtido pela Equação 3.9

$$L_1 = L_2 = \frac{(144)^2}{4 \cdot \pi \cdot (114)^2 \cdot (2kHz)^2 \cdot (10\mu F)}$$

$$L_1 = L_2 = 1mH$$

### 3.2.2 - CÁLCULO DOS COMPONENTES DO CIRCUITO DE IGNIÇÃO.

A capacitância de ignição foi definida com o valor  $C_{ig} = 150 \text{ nF}$ . A partir de (2.12) pode-se encontrar a equação que fornece o valor da indutância  $L_{ig1}$ , dado por (3.4):

$$L_{ig1} = \left( \frac{2t_{pulso}}{\pi \sqrt{C_{ig}}} \right)^2 \quad (3.4)$$

Substituindo-se os valores, tem-se que:

$$L_{ig1} = \left( \frac{2 \times 500 \times 10^{-9}}{\pi \sqrt{150^{-9}}} \right)^2 = 10 \mu\text{H} \quad (3.5)$$

Para a construção dos indutores acoplados  $L_{ig1}$  e  $L_{ig2}$  foi definido como núcleo o ferrite do tipo EE de dimensões 30/15/14. Portanto, de acordo com a, os parâmetros do núcleo escolhido são:

$$Ap_{ia} = 1,43 \text{ cm}^4 \quad (3.6)$$

$$Ae_{ia} = 1,2 \text{ cm}^2 \quad (3.7)$$

A corrente de ressonância sobre o indutor  $L_{ig1}$  é dada por:

$$I_{Lig1} = \frac{Vg}{Z_o} \text{sen } \omega_o t \quad (3.8)$$

Onde  $\omega_o$  é a frequência angular de ressonância, dada por (3.10), e  $Z_o$  é a impedância do circuito ressonante, dada por (3.11).

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_{ig1} C_{ig}}} = 816 \times 10^3 \text{ rad/s} \quad (3.9)$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{L_{ig1}}{C_{ig}}} = 8,16 \Omega \quad (3.10)$$

Os valores de correntes máxima e eficaz no indutor  $L_{ig1}$  são portanto dados respectivamente por (3.11) e (3.12).

$$I_{Lig1.\max} = \frac{Vg}{Z_o} = 26,94 \text{ A} \quad (3.11)$$

$$I_{Lig1.\text{rms}} = \frac{I_{Lig1.\max}}{\sqrt{2}} = 19,05 \text{ A} \quad (3.12)$$

A energia acumulada no indutor é dada por:

$$E_{ia} = \frac{10 \times 10^{-6} \times 19,05^2}{2} = 1,81 \text{ mJ} \quad (3.13)$$

O fator de indutância é dado por:

$$A_{L.ia} = \frac{1,2^2 \cdot 0,3^2 \times 10^{-9}}{2 \times 1,81 \times 10^{-3}} = 35,7 \text{ nH/esp}^2 \quad (3.14)$$

O número de espiras de  $L_{ig1}$  é, portanto:

$$N_{Lig1} = \sqrt{\frac{10 \times 10^{-6}}{35,7 \times 10^{-9}}} = 16,73 \text{ esp} \quad (3.15)$$

O indutor  $L_{ig1}$  foi construído com 17 espiras. Já o número de espiras de  $L_{ig2}$  é calculado a partir da relação de transformação entre os dois indutores, dado por:

$$\eta_{ia} = \frac{V_{ig}}{V_g} = 13,64 \quad (3.16)$$

Portanto:

$$N_{Lig2} = \eta_{ia} \cdot N_{Lig1} = 228 \text{ esp} \quad (3.17)$$

Foi adotado o valor de 270 espiras, visando à compensação das indutâncias parasitas, como citado anteriormente.[11].

O cálculo dos indutores apresentados acima é um exemplo para a lâmpada de 100W, foram utilizados núcleos maiores que o núcleo de projeto para evitar a saturação do mesmo. A indutância  $L_{ig2}$  tem que ter uma indutância que possibilite a proteção contra um pico de corrente maior do que 200% da corrente nominal da lâmpada durante a ignição. A indutância ideal encontrada nos resultados experimentais foram de 4.3mH, para as lâmpadas de 100W, 150W e 250W, e de 3,3mH para a lâmpada de 400W.

### 3.3 - SIMULAÇÃO DO REATOR ELETRÔNICO E CIRCUITO IGNITOR

As simulações dos circuitos ignitor e do reator eletrônico foram realizadas no Orcad. Com uma resistência equivalente a lâmpada de 100 Watts. Os parâmetros calculados anteriormente foram utilizados para a simulação dos circuitos.

O circuito ignitor foi simulado separadamente do circuito do reator eletrônico para que possam observar mais detalhadamente a forma de onda do circuito. A figura 3.1 mostra o circuito ignitor simulado.

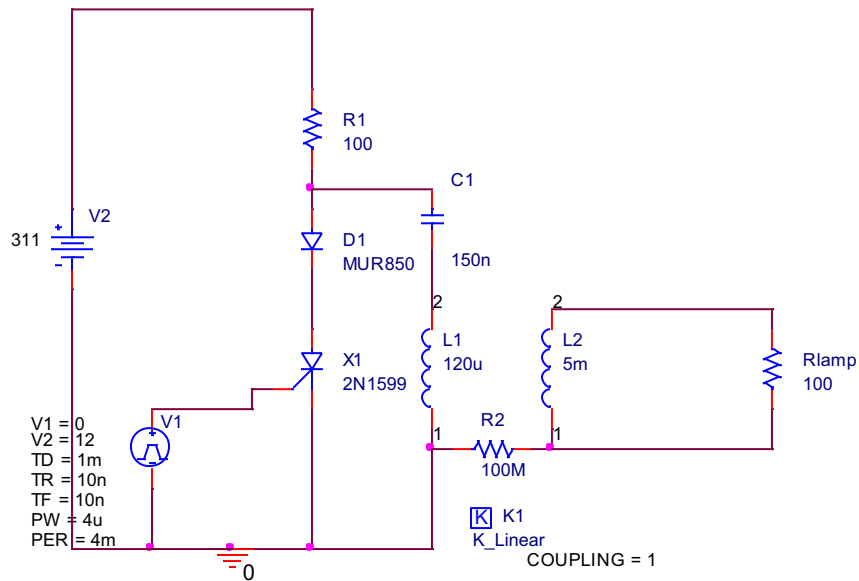


Figura 3.1- Circuito para simulação do ignitor

A figura 3.2

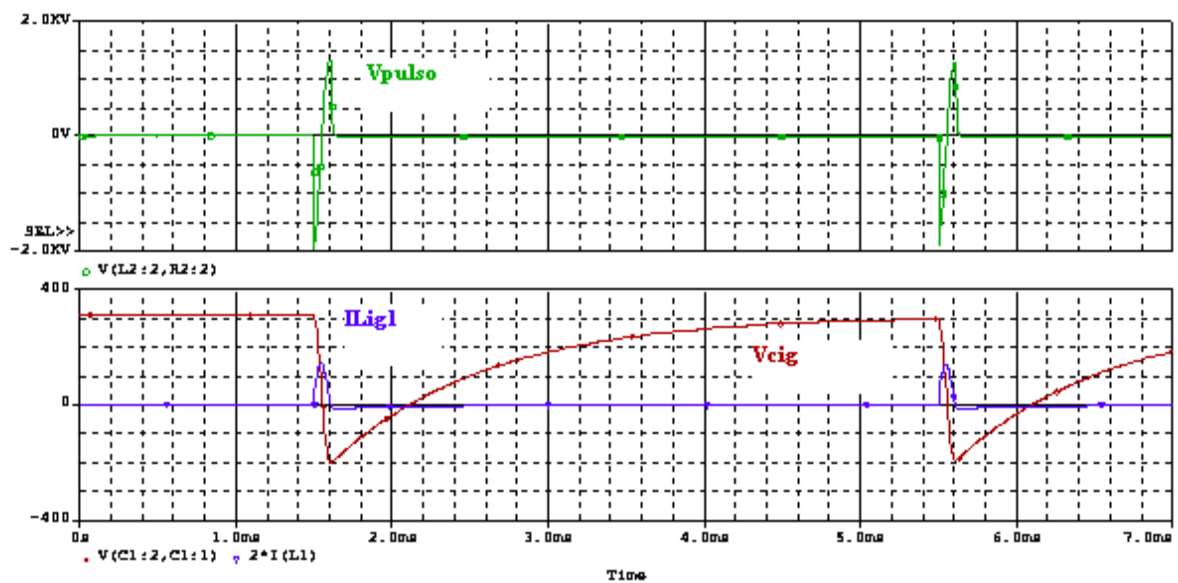


Figura 3.2- Pulsos gerados pelo ignitor e tensão e corrente no capacitor C1.

A figura 3.3 apresenta o circuito do reator eletrônico em que foram realizadas as simulações. Os valores dos componentes utilizados na simulação foram os mesmos valores utilizados para obter os resultados práticos da lâmpada de 100 W.

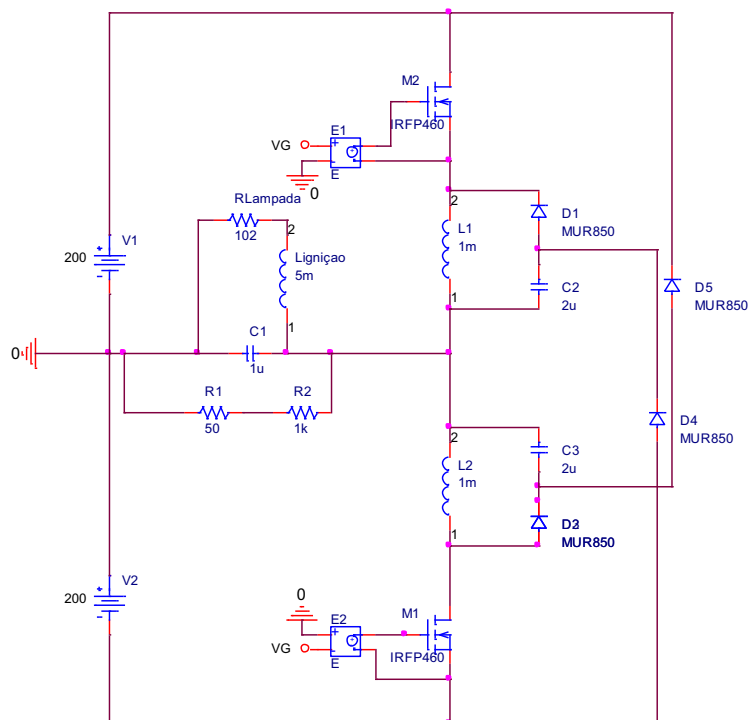


Figura 3.3- Circuito do reator eletrônico simulado

A figura 3.4 demonstra a simulação da tensão, corrente e potência aplicado em uma resistência equivalente a resistência da lâmpada quando ela está em regime permanente.

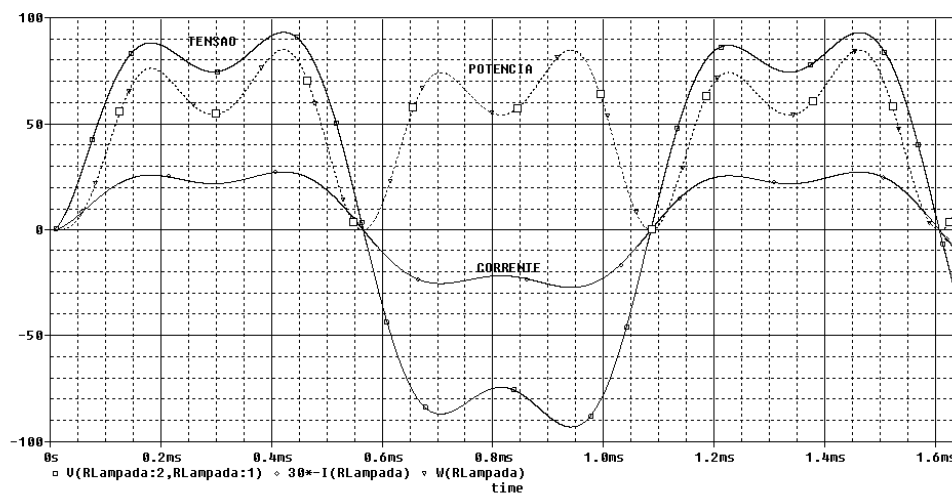


Figura 3.4- Tensão , corrente e potência na lâmpada.

A figura 3.5 apresenta o espectro de tensão e corrente das formas sobre a resistência equivalente da lâmpada. Com a fundamental em 980Hz e a terceira harmônica em 2880Hz.

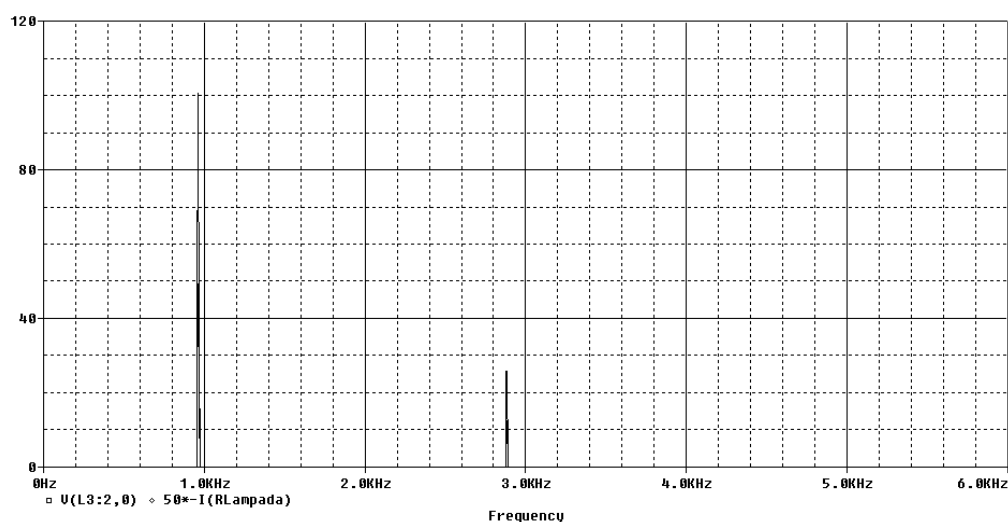


Figura 3.5- Espectro da tensão e corrente na resistência equivalente da lampada.

### 3.4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para a obtenção dos resultados experimentais foram utilizadas duas fontes CA/CC com tensão e corrente controlada com display indicador da corrente e tensão com precisão de um décimo de volt para a tensão e de um décimo de ampere para a corrente. O fundo de escala da tensão é de 300V e o da corrente de 10A. As fontes foram ligadas em serie de modo a compor a fonte simétrica de entrada do amplificador de potência monofásico. O conversor utilizado foi o mesmo utilizado por Vincenzi, F. em [76], foram feitas pequenas alterações no valor do capacitor de saída para aumentar a frequência de saída do conversor. O mesmo acontece com o circuito de geração de sinal e circuito de controle.

Os resultados experimentais, para o protótipo de 1000W, foram obtidos de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3-2: Valor dos Componentes Utilizados no Protótipo [76].

| COMPONENTES   | ESPECIFICAÇÃO |
|---------------|---------------|
| $L_1$ e $L_2$ | 1 mH          |
| $C_0$         | 1 $\mu$ F     |
| $C_1$ e $C_2$ | 2 $\mu$ F     |
| S1            | SK45GAL063    |
| S2            | SK45GAL063    |
| D1,D2,D3,D4   | APT30D100B    |

A Figura 4.1, mostra o sinal de referência, forma de onda superior, composto por uma fundamental com 3,3 V de pico e frequência de 960 Hz, mais terceira harmônica com 1,089 V de pico (33 % da fundamental). A forma de onda inferior mostra o sinal de referência amplificado com um ganho de 1:41 obtido sobre o capacitor  $C_O$ . As Figuras 3.2 e 3.3 mostram a taxa de distorção harmônica total dos sinais de referência e sinal amplificado apresentados na Figura 3.1 [76].

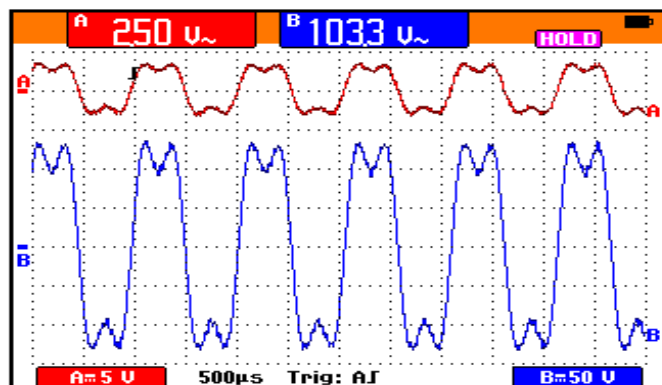
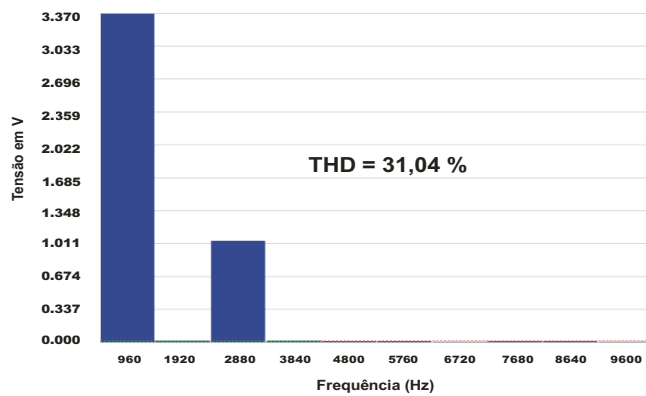
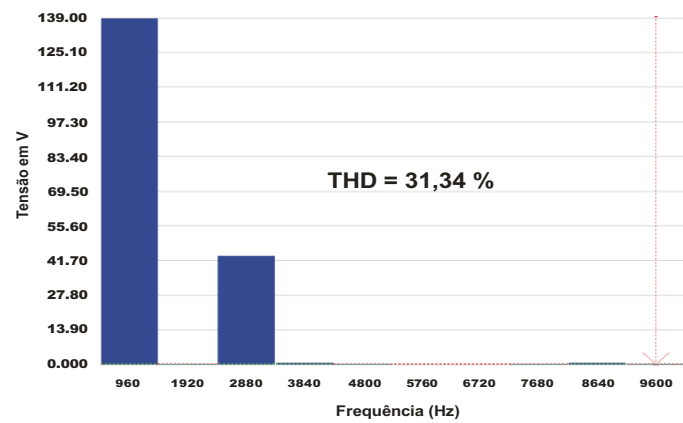


Figura 3.1 – CH-A Sinal de referência, CH-B, sinal amplificado na lâmpada, sinal inferior.

A realimentação garante que o sinal de saída se mantenha com baixa distorção harmônica para qualquer condição de carga. Isto é, menor que 1%, desde a operação a vazio até a potência nominal para a qual foi projetado, como mostrado na Figura 3.4. Os ensaios de rendimento e THD foram realizados com a utilização de varias configurações de lâmpadas (como uma lâmpada de 100 Watts e uma lâmpada de 400 Watts) e outras configurações de lâmpadas, e a curva da Figura 3.5 mostra que o rendimento é superior a 80% a partir 250W.[58]



(a)



(b)

Figura 3.2- Espectro harmônico do sinal de referência.

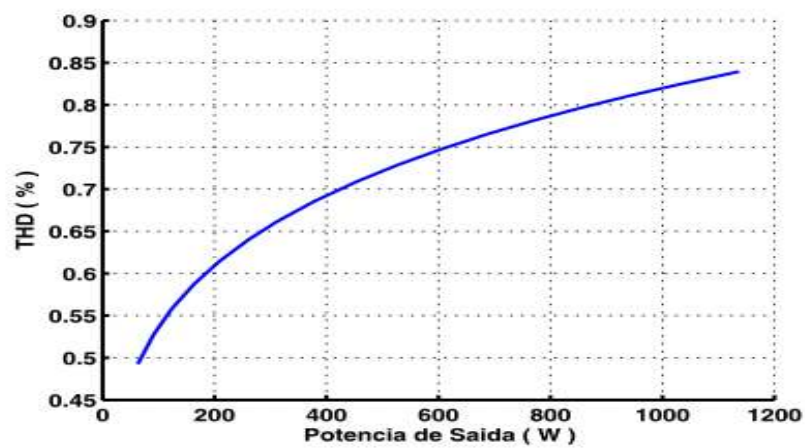


Figura 3.3: THD do sinal de referência amplificado ( $VC_O$ ) para diferentes condições de carga [58]

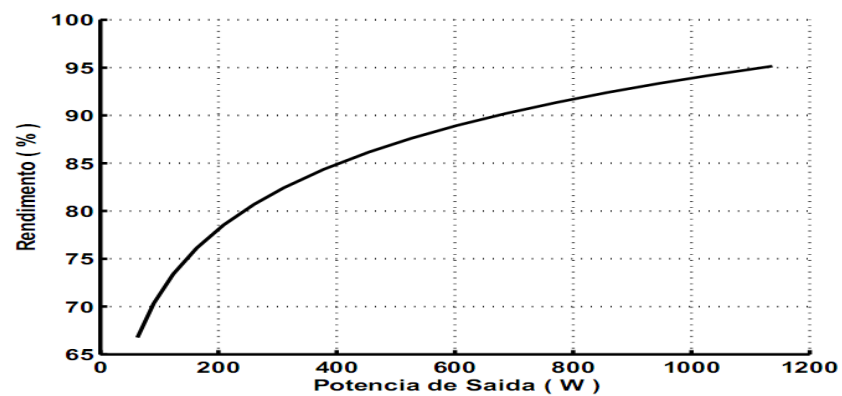


Figura 3.4: Curva do rendimento em função da potência de saída.

Para o melhor aproveitamento do rendimento do conversor foram utilizadas potências sempre acima de 250W, utilizando mais de uma lâmpada ao mesmo tempo.

Para um melhor entendimento do comportamento do conversor, foi montado o diagrama de Bode através de dados experimentais. No experimento uma onda senoidal com amplitude de 1V foi inserida ao amplificador, que opera com ganhos de 10, 20, 30, 40 e 50 e tensão na fonte simétrica de 70V. No diagrama de Bode da Fig. 3.5 observa-se que a curva cai a uma taxa de aproximadamente 12 dB/oct, caracterizando a resposta de um sistema de segunda ordem [76].

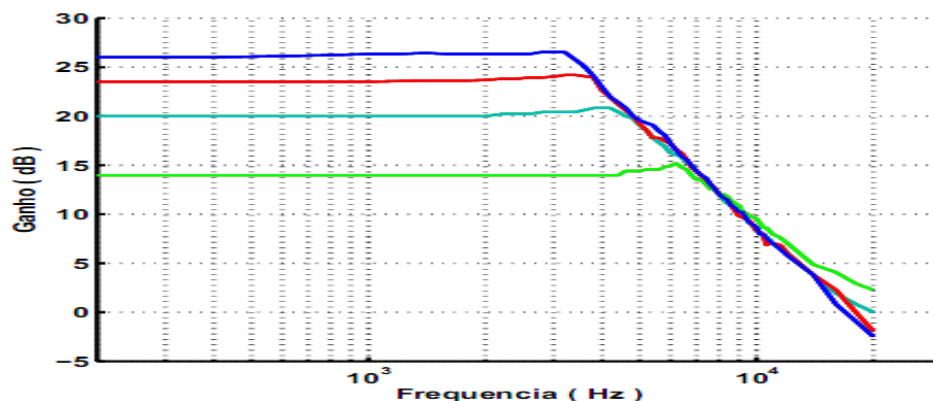


Figura 3.5: Curva do ganho em dB em função da frequência.

### 3.4.1 - RESULTADOS DAS LÂMPADAS *HPS*

Para o funcionamento correto das lâmpadas de *HPS* se faz necessário que o conversor respeite o processo de funcionamento da lâmpada. Para que ocorra a formação do arco é necessário a aplicação de um pulso em alta tensão na lâmpada, para que ocorra a ignição. Após a ignição o conversor tem que respeitar as condições aquecimento e funcionamento em regime da lâmpada, como apresenta no primeiro capítulo.

Os resultados serão apresentados em seqüência de potência, onde serão demonstrados as etapas de aquecimento e a lâmpada em regime permanente para as lâmpadas de 100W, 150W, 250W e 400W. Os pulsos gerados para ignição da lâmpada foram apresentados no capítulo 2. Os sinais apresentados abaixo mostram as formas de ondas após a ignição.

### 3.4.1.1 - LÂMPADA DE 100W, 150W, 250W E 400W

A figura 3.6 demonstra a etapa de aquecimento da lâmpada de 100W, a Figura 3.7 demonstra o aquecimento da lâmpada de 150W, a Figura 3.8 demonstra o aquecimento da lâmpada de 250W e a Figura 3.9 demonstra o aquecimento da lâmpada de 400W, onde pode observar que o processo de aquecimento, e as etapas de aquecimento da lâmpada que garante um bom funcionamento da lâmpada. Como mostrado na figura 1.3. Evitando que a sobre corrente não atinja valores muito altos.

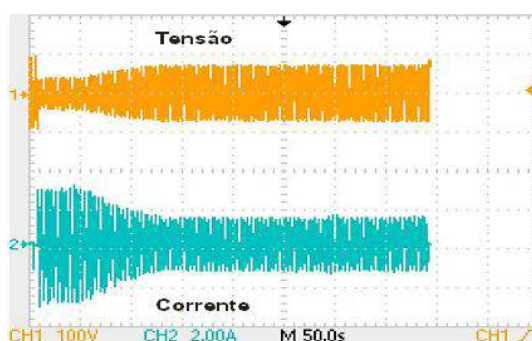


Figura 3.6: Formas de onda de tensão (100 V/div) e forma de onda de corrente (2 A/div) na lâmpada HPS de 100W da PHILIPS®.

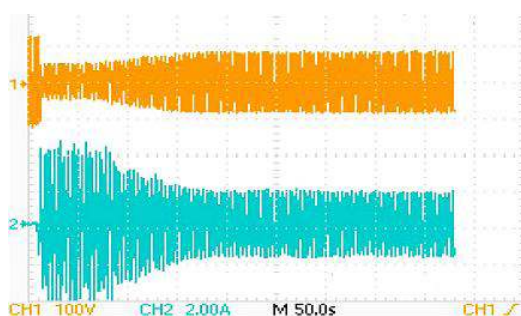


Figura 3.7: Formas de onda de tensão (100 V/div) e forma de onda de corrente (2 A/div) na lâmpada HPS de 150W da PHILIPS®.

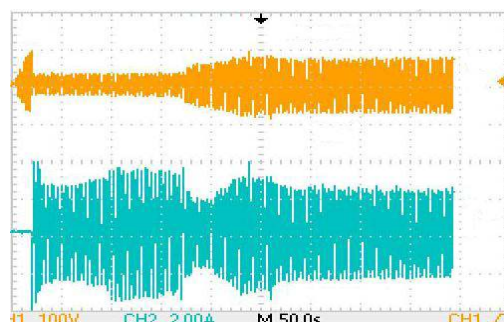


Figura 3.8: Formas de onda de tensão (100 V/div) e forma de onda de corrente (2 A/div) na lâmpada HPS de 250W da PHILIPS®.

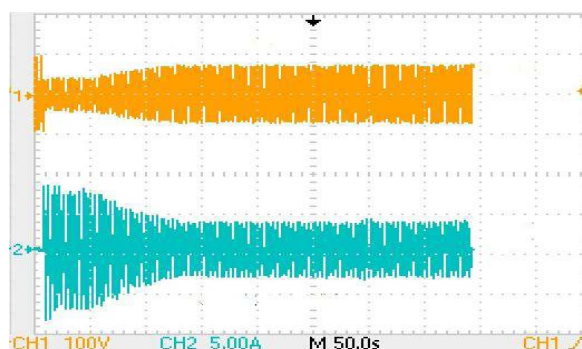
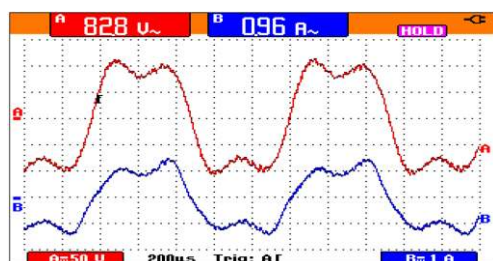


Figura 3.9: Formas de onda de tensão (100 V/div) e forma de onda de corrente (2 A/div) na lâmpada HPS de 400W da OSRAM®.

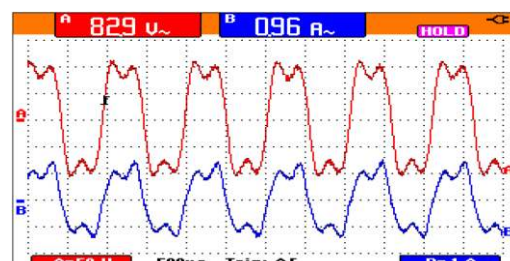
Para a lâmpada de 100W a tensão logo após a ignição fica em torno de 38V enquanto a corrente sobre a lâmpada chega a ter o valor 3,8A durante alguns segundos. Em regime permanente a tensão fica em torno de 90V e a corrente em torno de 1,2A.

As Figuras 3.10 mostram as formas de onda de tensão e corrente na lâmpada de 100W, logo após o processo de aquecimento, em regime permanente em diferentes escalas de tempo.

O indutor de filtro de saída foi desenvolvido para cada lâmpada limitando a corrente de partida da lâmpada em pelo menos 200% da corrente nominal da lâmpada.



(a)  $t=200\mu s$

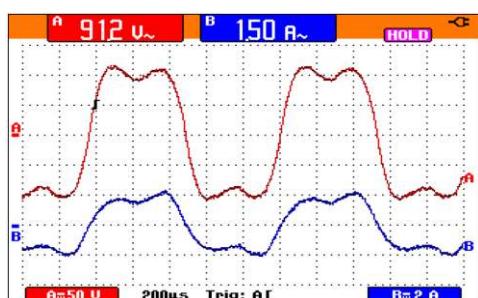


(b)  $t=500\mu s$

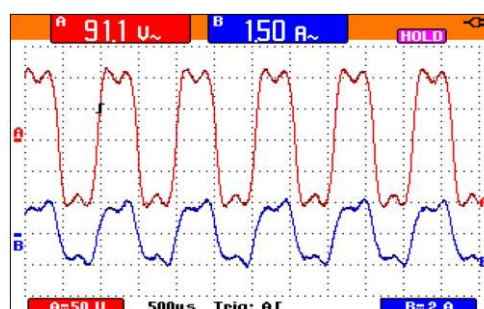
Figura 3.10 : Canal A-Vermelho- Tensão sobre a lâmpada 100W, Canal B-Azul-Corrente na lâmpada 100W, PHILIPS®.

As figuras 3.11 mostra as formas de onda de tensão e corrente sobre a lâmpada de 150W, logo após o processo de aquecimento, em diferentes escalas de tempo.

Os resultados demonstrados para as lâmpadas de 100W e 150W foram obtidos pelo osciloscópio da *FLUKE*® modelo 199C. Para as lâmpadas de 250W e 400W foram os resultados foram obtidos pelo osciloscópio da Tektronix® modelo TDS 2022B.



(a)  $t=200\mu s$



(b)  $t=500\mu s$

Figura 3.11 : Canal A-Vermelho- Tensão sobre a lâmpada 100W, Canal B-Azul-Corrente na lâmpada 100W, PHILIPS®.

A figura 3.12 mostram as formas de onda de tensão e corrente na lâmpada de 250W, logo após o processo de aquecimento, em regime permanente.

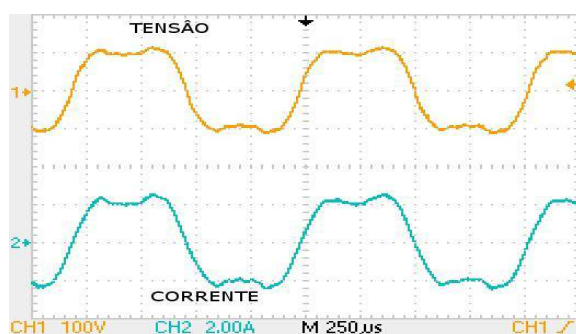


Figura 3.12 Canal 1-Amarelo - Tensão sobre a lâmpada 250W, Canal 2-Azul-Corrente na lâmpada 250W, PHILIPS®.

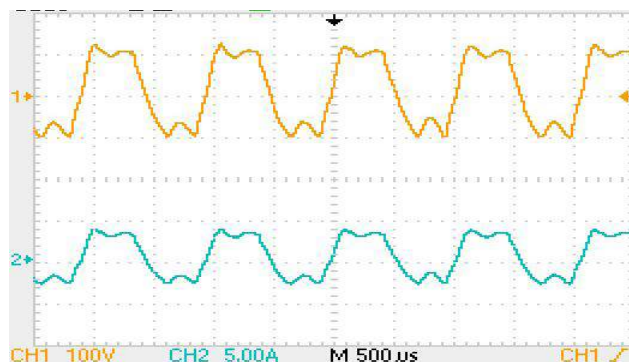


Figura 3.13: Canal 1- Amarelo – Tensão sobre a lâmpada de 400W, Canal 2 – Azul – Corrente na lampada 400W, OSRAM®.

A figura 3.13 mostra as forma de onda de tensão e de corrente da lâmpada de 400W.

A Figura 3.14 mostra a tensão e corrente, parte positiva, na chave  $S_1$  onde se observa a comutação ZVS. A corrente com valor negativo, no intervalo de tempo em que a chave  $S_1$

permanece aberta, é a corrente no diodo D<sub>4</sub>. Para obter a corrente na chave sem que tenha a corrente no diodo D<sub>4</sub>, torna-se quase impossível pela inserção de ruídos no conversor.

Os sinais de comando das chaves gerado pelo circuito de histerese são demonstrados nas Figura 3.15 e Figura 3.16 juntamente com a corrente na lâmpada, para que torne possível observar o comando da chave em relação à tensão de saída.

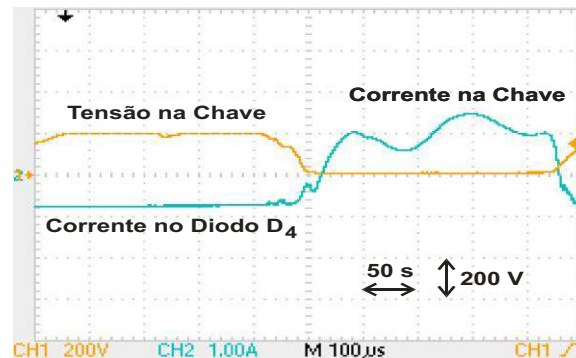


Figura 3.14: Tensão e corrente na chave S1 e corrente no diodo D<sub>4</sub>.

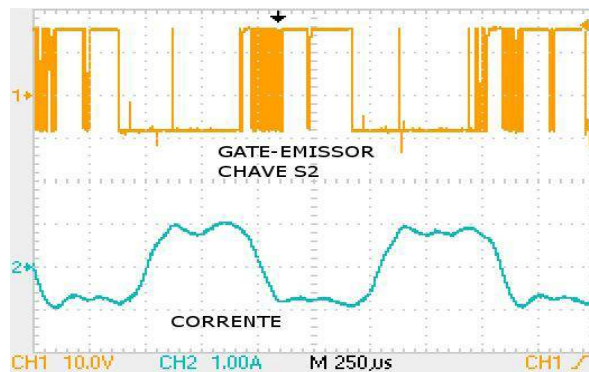


Figura 3.15: Tensão gate-emissor da chave S2 e corrente na lâmpada de 100W OSRAM®.

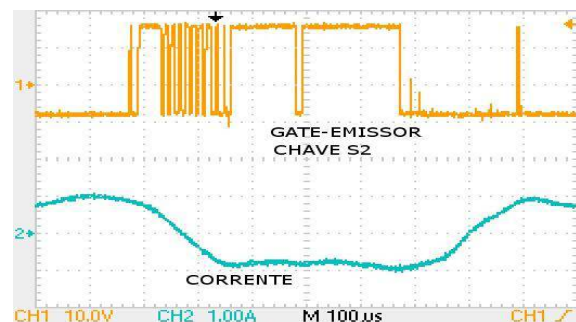


Figura 3.16: Tensão gate-emissor da chave S2 e corrente na lâmpada de 100W OSRAM®.

Uma das formas de observar a ocorrência da ressonância acústica é através de fotografias do tubo de descarga. Foram tiradas fotos dos tubos de descarga das lâmpadas de

100W, 150W e de 250W para que possa observar o arco. A utilização de um papel celofane roxo para filtrar o comprimento de onda amarelo predominante na lâmpada.

A Figuras 3.17 mostram fotos tiradas do tubo de descarga, para comprovar que a ressonância acústica não evoluiu. Porque com a injeção da terceira harmônica a potência aplicada na lâmpada e dividida em espectro de potência, o que evita a evolução da ressonância acústica. E a frequência utilizada está abaixo de 1kHz.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.17: Fotos do tubo de descarga da lampadas de 100W(a), 150W(b) e 250W(c).

O conversor foi capaz de acionar mais de uma lâmpada HPS como mostrado na fotografia (figura 3.18) do conversor em funcionamento.

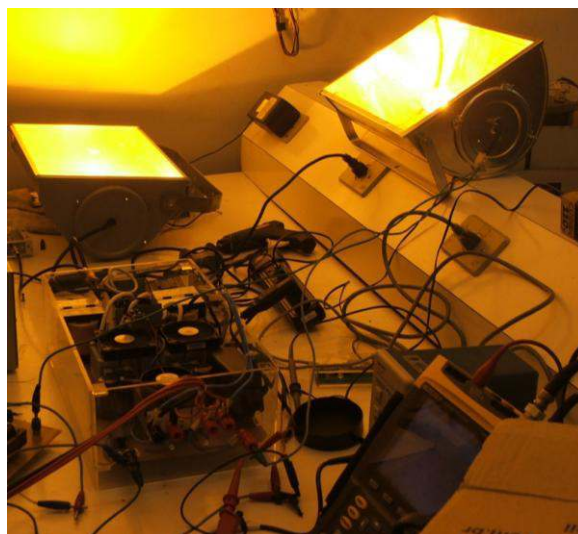


Figura 3.18: Fotografia do conversor funcionando com duas lâmpadas HPS de 100W e 150W

### **3.5 - CONCLUSÃO**

A injeção de formas de onda de tensão sintetizadas nas lâmpadas foram apresentados neste capítulo mostrando os resultados gerados pelo reator eletrônico proposto. Onde foi injetado a fundamental em 960Hz e a terceira harmônica em 2880Hz.

A facilidade de geração do sinal de referência e o sinal de gatilho dos interruptores, faz com que a proposta tenha uma estratégia de controle simplificada, reduzindo o custo final do projeto. Contudo a geração do sinal de referencia pode ser implementado analogicamente ou utilizando um microcontrolador de baixo custo.

Com a injeção da terceira harmônica na lâmpada impediu a evolução da ressonância acústica principal problema a ser resolvido pelos reatores eletrônicos.

## **CAPÍTULO 4 CONCLUSÃO GERAL E PROPOSTA DE CONTINUIDADE**

### **4.1 - CONCLUSÃO GERAL**

A proposta de injeção de harmônicas em lâmpadas de Alta Pressão de Sódio foi proposta por Marco Alonso, utilizando inversor meia-ponte, com o principal objetivo de evitar o aparecimento e a evolução da ressonância acústica.

O trabalho apresentou um amplificador Classe D utilizado como reator eletrônico para mais de uma lâmpada HPS. A motivação para a escolha do conversor foi a capacidade do mesmo de reproduzir um sinal de até alguns kHz. Possibilitando a aplicação de um sinal senoidal com a sua terceira harmônica correspondente com mais facilidade do que proposto na literatura.

Como o conversor mantém a sua saída realimentada foi possível alimentar mais de uma lâmpada com o conversor, na obtenção dos resultados foram utilizadas duas lâmpadas de potência diferentes. Cada lâmpada possuem um circuito ignitor independente, sendo possível acionar as lâmpadas simultaneamente ou não.

A utilização de várias lâmpadas torna o conversor adequado para luminárias tipo trevo ou cruzetas por exemplo. O que faz com que o custo benefício do conversor seja compensado. Como o reator utiliza um microcontrolador ARM é possível implementar a estágio de correção de fator de potência, o controle dos ignitores e a geração do sinal aplicado na lâmpada com um único microcontrolador.

Com a injeção da forma de onda sintetizado não foram observado visualmente a ocorrência da ressonância acústica nas lâmpadas de Alta Pressão de Sódio.

### **4.2 - PROPOSTA DE CONTINUIDADE**

- i. Implementar o estágio de correção do fator de potência;
- ii. A utilização de apenas uma fonte CC para alimentar a lâmpada;
- iii. Aplicar outras formas de ondas sintetizadas na lâmpada;

- iv. Modificar o microcontrolador que gera a tensão de referência com a melhor relação custo/benefício;
- v. O desenvolvimento de um reator eletrônico com alto fator de potência sem a ocorrência da ressonância acústica, atendendo as especificações das normas vigentes, e que seja de baixo custo visando a sua introdução no mercado de reatores eletrônicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp?TeamID={EB94AEA0-B206-43DE-8FBE-6D70F3C44E57}> acesso em 04/04/2008.
- [2] Cavalcante, F. S. Reatores Eletrônicos Para Lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão de 70W. 2001. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina.
- [3] Có, M.A. Sistemas eletrônicos microcontrolados para acionamento de lâmpadas de alta intensidade de descarga. Tese de doutorado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória -ES-BR 2003.
- [4] de Groot, J. ; van Vliet, J. The High-Pressure Sodium Lamp. Philips Technical Library, 1986.
- [5] Coaton, J.R. e Marsden, A.M. Lamps and Lighting. Arnold, fourth edition, 1997.
- [6] Moraes, L.F.M., Estudo, análise e implementação de formas de onda de tensão sintetizadas através de PWM, com estágio de ignição e de correção de fator de potência para reatores eletrônicos para lâmpadas HPS. 2007. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Brasil.
- [7] Loudon, W.C. and Schmidt, K. High-pressure Sodium Discharge Arc Lamps, Illuminating Engineering, December 1965, pp 696-702.
- [8] Olsen, J. e Moskowitz, W. Optical measurement of acoustic resonance frequencies in HID lamps. IEEE Industry Applications Conference - IAS, 3(32):2263 – 2269, Oct. 1997
- [9] Anderson, A.S. Sistema Eletrônico Para Lâmpadas de Descarga de Alta Pressão Para Iluminação de Exteriores. 2001. 91f. Proposta de Tese (Doutorado em Eng. Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [10] Tomm, F.L. – Projeto de Reatores Eletrônicos para HID baseado no conversor chopper AC, 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, RS.
- [11] Fontoura, K.L. Análise, Projeto E Implementação De Reatores Eletrônicos Para Acionamento De Lâmpadas De Alta Intensidade Em Descarga “Aid”, Controlados Por Circuitos De Lógica Reconfigurável “Fpga”. 2007. Proposta de Tese (Doutorado em Eng. Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia.

- [12] <http://www.iee.org/TheIEEE/Research/Archives/ArcLamps/index.cfm>.
- [13] Rashid, M. H. Power Electronics. Circuits, Devices, and Applications, 2nd edition. Prentice Hall. New Jersey, 1993.
- [14] Alonso, J.M.; Ribas, J.; Rico-Secades, M.; García, J.G.; Cardesin, J. e Dalla Costa, M.A. Evaluation of high-frequency sinusoidal waveform superposed with 3rd harmonic for stable operation of metal halide lamps. IEEE Transaction On Industry Applications, 41(3):721–727, 2005.
- [15] Dos Reis, F; et. al. Full bridge single stage electronic ballast for a 250W high pressure sodium lamp. *IEEE Power Electronics Specialists Conference- PESC*, (36):1094-1099, 2005.
- [16] Peng, H.; Ratanapanachote, S.; Enjeti, P.; Laskai, L. e Pitel, I. Evaluation of acoustic resonance in metal halide (MH) lamp and an approach to detect its occurrence. IEEE Industry Application Society - IAS, 3:2276 – 2283, 1997.
- [17] “Ultra-High Efficiency White Light Emitting Diodes”, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 45, no. 41, 2006, pp.L1084-L1086
- [18] Demian Jr. A. E – Proposta de reatores eletrônicos para iluminação com alto desempenho. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2008
- [19] Vilela Júnior. J. A., “Desenvolvimento E Análise De Topologias Não Convencionais Para Reatores Eletrônicos”, Dissertação de Mestrado UFU - 2003
- [20] Alonso. J. M.; Ribas. J.; M. Rico-Secades; J.G. García e J.Cardesin. Evaluation of high-frequency sinusoidal waveform superposed with 3th harmonic for stable operation of metal halide lamps. IEEE Industry Applications Conference - IAS, 3(37):1483 – 1488,
- [21] Michel, A.L.; Pappis, D; Campos, A.; Prado, R.N. “Electronic Ballast with Luminous Automatic Variation and Presence Detection Using Microcontroller and Self-Oscillating Command”, V Induscon-2002, paper code 067.
- [22] YOUN, Y. S.; CHO, G. H. Regenerative Signal Amplifying Gate Driver of Self-Excited Electronic Ballast for High Pressure Sodium (HPS) Lamp. Power Electronics Specialists Conference, p. 993-998, 1996.
- [23] Tsay, C. L.; Chun, H. S. e outros.”Development Of A Versatile Ballast For metal Halide Lamps With Phase-Shift Soft-Switching Control”. IEEE 1996.A

- [24] <http://www.luz.philips.com>, Catálogo de lâmpadas HID.2008.
- [25] <http://catalog.myosram.com>, Catálogo de lâmpadas HID, 2008.
- [26] Tsay, C. L. et al. Develop of the versatile electronic ballast for metal halide lamp with phase-shift soft-switching control. IEEE Industry Application Society - IAS, pages 2112– 2119, 1996.
- [27] Brañas, C. et. al. Design of LCsCp resonant inverters as a power source for HID lamp ballast applications. IEEE Transaction Industry Applications, 41(6):1584– 1593, 2005.
- [28] Cardesin, J.; Alonso, J.M; et. al. Design optimization of the LCC parallel-series inverter with resonant current mode control for 250W HPS lamp ballast. IEEE Transaction On Power Electronics, 20(5):1197– 1204, Set 2005.
- [29] Cardesin, J.; Alonso, J.M; et. al.. Small-signal analysis of a low-cost power control for LCC series-parallel inverters with resonant current mode control for HID lamps. IEEE Transaction On Power Electronics, 20(5):1205– 1212, Set 2005.
- [30] Brañas,C., et. al. Study Of output power variation due to component tolerances in LCsCp resonant inverters applied to HPS lamp control. IEEE Transaction On Industrial Electronics, 51(1):122– 131, Feb 2004.
- [31] Ben-Yaakov, S. e Gulko, M. Design and performanca of an electronic ballast for high-pressure sodium (HPS) lamps. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 44(4):486– 491, august 1997.
- [32] Andre,A., Perin, A. e Barbi, I. Ignitors of electronic ballast for HID lamps. IEEE Brazilian Power Electronics Conference - COBEP, pages 644– 649, 2001. CDRom.
- [33] Brañas, C. , Azcondo, F.J. e Bracho, S., Electronic ballast for HPS lamps with dimming control by variation of the switching frequency. Soft start-up method for HPS and fluorescent lamps. IEEE Industrial Electronics Society - IECON, (24):953 – 958, 1998.
- [34] Cavalcante, F.S. e Barbi, I.; A new dimmable 70W electronic ballast for high pressure sodium lamps. IEEE Industry Applications Conference - IAS, 3(37):1856 – 1862, 2002.
- [35] Cardesin J. , Alonso, J.M., Ribas, J., Rico-Secades, M. e García, J.G. A low cost electronic ballast for 250W high pressure sodium vapour lamps using the CC/CC buck converter as power factor preregulator. IEEE Industry Applications Conference - IAS, 3(37):1847 – 1851, 2002.

- [36] Ferrero, F.J., Rico, M. Alonso, J.M., Blanco, C. e Ribas, J. Analysis and design of an AC/AC resonant converter as a high pressure sodium lamp ballast. 2(24):947 – 952, 1998.
- [37] Marques, L.S.B., Perin,A. e Mineiro,E.S.Jr. Flyback electronic ballast topology employed to drive the automotive HID D2S-35W lamp. IEEE International Conference On Industrial Applications-INDUSCON, (6), 2004. CDROM.
- [38] Correa, J.,Ponce, M., Arau,J. e Alonso, J.M. Dimming in metal-halide and HPS lamps operating at HF: effects and modeling. IEEE Industry Applications Conference - IAS, 2(37):1467 – 1474, 2002.
- [39] Ohsato,M.H., Mao,Q., Ohguchi, H., Shimizu,T., Kimura,G. e Takagi, H. MHz operation of voltage-fed inverter for HID lamps using distributed constant line. IEEE Transaction on Industrial Applications, 34(4):747–751, July/August 1998.
- [40] Gulko, M. et. al. A MHz electronic ballast for automotive-type HID lamps. IEEE Power Electronics Specialists Conference - PESC, 1(28):39–45, 1997.
- [41] Ray-Lee,L. , et. al. 2.65 MHz self-oscillating complementary electronic ballast with constant-lamp-current control for metal halide lamp. IEEE Industry Applications Society -IAS, 3(41):1377–1383, Oct. 2006.
- [42] Cardesín,J. , et. All, Low-cost PFC electronic ballast for 250W HID lamps operating as constant power source with 400kHz switching frequency. IEEE Power Electronics Specialists Conference-PESC, (36):1130–1135, 2005.
- [43] Ribas,J., et. al. High frequency electronic ballast for metal halide lamps based on a PLL controlled class E resonant inverter. IEEE Power Electronics Specialists Conference-PESC, (36):1118–1123, 2005.
- [44] Wang, J., et. al. Low-frequency sine wave modulation of 250W high-frequency metal halide lamp ballasts. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, 2(19):1003 – 1007, 2004.
- [45] Costa, R.E, da Silveira,J.S.,Marchesan, T.B., Campos, A. Prado,R.N. – Industrial electronic ballast to supply 70W HPS lamp, INDUSCON, VIII conferência Internacional de Aplicações Industriais, 2008.
- [46] Li,H., Shen,M. e Qian,Z. A novel low frequency electronic ballast for HID lamps. IEEE Industry Applications Conference - IAS, 1(39):668 – 673, Oct. 2004.

- [47] Có, M.A., Resende, C.Z. , Simonetti, D.S.L., Vieira, J.L.F. e Almeida, P.C.A. Microcontrolled electronic gear for low wattage metal halide (MH) and high pressure (HPS) lamps. IEEE Industry Applications Conference - IAS, 3(37):1863 – 1868, 2002.
- [48] Yan,W., Ho,Y.K.E. e Hui,S.Y.R. Investigation on methods of eliminating acoustic resonance in small wattage high-intensity-discharge (HID) lamps. IEEE Industry Application Society - IAS, 5:3399 – 3406, 2000. Roma, Italy.
- [49] Có,M.A ,et al. Reator eletrônico microcontrolado para lâmpadas AID – comparações com um reator convencional. Congresso Brasileiro de Automática - CBA, pages 3234 – 3239, 2002
- [50] Shen,M., Qian,Z. e Peng,F. A novel two-stage acoustic resonance free electronic ballast for HID lamps. IEEE Industry Applications Conference - IAS, 3(37):1869 – 1874, 2002.
- [51] Zhao,J. ,Shen,M. , Chen, M. e Qian, Z. A novel low-frequency square wave electronic ballast for low-wattage HID lamps. IEEE Industry Applications Conference - IAS, 1(38):321 – 324, Oct. 2003.
- [52] . Andre,A.S e Perin, A.J. Reator eletrônico para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão de 400W sem ressonância acústica. IEEE International Conference On Industrial Applications-INDUSCON, (6), 2004. CDROM.
- [53] Andre,A.S e Perin, A. Electronic ballast for high-pressure sodium lamps. IEEE Brazilian Power Electronics Conference - COBEP, pages 650 – 655, 2001. CDROM
- [54] Andre, A.S., Perin, A. , Postiglione, C.S. e Moia, J. Técnicas para a operação de lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão, por reatores eletrônicos, sem ressonância acústica. Congresso Brasileiro de Automática - CBA, 2004. CDROM.
- [55] Van Tichelen,P., Weyen, P. e Meynen, G. Test result from high intensity discharge lamps with current supplied at 50 Hz, 400 Hz and modulated between 15 and 35 kHz. IEEE Industry Application Society - IAS, 4:2225 – 2230, Oct. 1996.
- [56] Zhou, J. Ma, L. e Qian, Z. A novel method for testing acoustic resonance of HID lamps. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, 1:480–485, 1999.
- [57] Morais, L.M.F. , Donoso-Garcia, P.F. Seleme Junior, S.I. e Cortizo, P.C. Acoustic resonance avoidance in high pressure sodium lamps via third harmonic injection in a

- PWM inverter based electronic ballast. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 22, NO. 3, MAY 2007
- [58] Rodovalho, D.S. , Vincenzi, F. , Freitas, L.C. , Coelho, E.A.A, Vieira Jr, J.B – Nova Topologia de Reator eletrônico utilizado para acionar uma ou mais lâmpadas HPS com forma de onda de tensão Sintetizada, Congresso Brasileiro de Automática - CBA, 2008. CDROM.
- [59] Rodovalho, D.S. , Vincenzi, F. , Freitas, L.C. , Coelho, E.A.A, Vieira Jr, J.B – Nova Topologia de Reator eletrônico utilizado para acionar uma ou mais lâmpadas HPS com forma de onda de tensão Sintetizada. INDUSCON, VIII conferência Internacional de Aplicações Industriais, 2008. Anais
- [60] Moraes, L.M.F., Donoso-Garcia, P.F. , Seleme Junior, S.I. e Cortizo, P.C. Electronic ballast for high pressure sodium lamps without acoustic resonance via controlled harmonic injection synthesized with PWM. IEEE Power Electronics Specialists Conference-PESC,(36):1107–1112, 2005.
- [61] Moraes, L.M.F., Donoso-Garcia, P.F., Seleme Junior, S.I. e Cortizo, P.C. Análise da amplitude da 3a harmônica para se evitar a ressonância acústica em lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão. IEEE International Conference On Industrial Applications-INDUSCON,(7):CD-ROM, 2006.
- [62] Rodovalho, D.S. , Vincenzi, F. , Freitas, L.C. , Coelho, E.A.A, Vieira Jr, J.B – A New electronic Ballast used to Drive one or more High-Pressure Sodium Lamps with voltage Synthesized WaveForm, Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, \*\*\*\*\*\_\*\*\*\*\*, 2009.
- [63] Rashid, M.H – Power electronics HandBook., Alonso J.M. chapter 21 – electronic ballasts. 2001 p-507-532.
- [64] BEN-YAAKOV, S; GULKO, M. Design and performance of an electronic ballast for high-pressure sodium (HPS) lamps. IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 44, No. 4, p.486-491, August 1997.
- [65] CARDESIN, J. et al.; A low cost electronic ballast for 250W high pressure sodium vapour lamps using the CC/CC buck converter as power factor preregulator. In: IEEE INDUSTRY APPLICATION SOCIETY ANNUAL METTING, IAS'02, Pittsburgh, USA, 2002 Anais... 1 CDROM.

- [66] TRESTMAN, G; Minimizing cost of HID lamp electronic Ballast. In: International conference on industrial electronics, control and instrumentation. IECON, 2002, Sevilla, Spain, Anais... CDROM.
- [67] BOR-RENN, L; YUEN-CHOU, H. Dimming control for high intensity discharge lamp with power factor correction. In: EUROPEAN POWER ELECTRONIC CONFERENCE - EPE, 1999, Lausanne, Switzerland. Anais....CD-ROM.
- [68] FIORELLO, R. Lamp ignitor circuit. In: Power Supply Control Products (PS) – Data Book, Unitrode Products from Texas Instrument, 2000. Design Note 72, cap. 9, p.52-54.
- [69] TSAY C. L. et al. Develop of the versatile electronic ballast for metal halide lamp with phase-shift soft-switching control. In: IEEE INDUSTRY APPLICATION SOCIETY ANNUAL METTING – IAS, 1996, San Diego, California, U.S.A. Anais... p. 2112 – 2119.
- [70] PONCE, M. et al.; Electronic ballast for HID lamps with high frequency squarewave to avoid acoustic resonance. In: IEEE APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE, APEC, Anaheim, 2001 Vol. 2, Anais... pp. 658-663.
- [71] JIANG, Y; ZHOU, J; QIAN, Z; A novel single stage switch PFP converter with constant power control for ballast for medium HID lamps. In:IEEE 2000, Anais... p. 3415-3418.
- [72] Duarte, J. L., Wijntjens, J., and Rozenboom, J.: “Getting more from fluorescent lamps through resonant converters.” Proc. IECON, San Diego, pp. 560–563, 1992.
- [73] Alonso, J. M., Blanco, C., López, E., Calleja, A. J. and Rico, M.:“Analysis, design and optimization of the LCC resonant inverter as a high-intensity discharge lamp ballast.” IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 13, No. 3, pp. 573–585, May 1998.
- [74] Gulko, M., and Ben-Yaakov, S.: “Current-sourcing push–pull parallel-resonance inverter (CS-PPRI): theory and application as a discharge lamp driver” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 41, No. 3, pp. 285–291, June 1994.
- [75] Brañas. C, Bracho. S. Electronic ballast for 150W HPS lamps with compensated output power. Electroncs Letters, 35(13), june 1999.

- [76] Vincenzi, F.R.S Fonte de tensão ca trifásica programável adequada para testes de equipamentos eletrônicos no contexto da qualidade da energia elétrica. Tese de Doutorado, 2007, Universidade Federal de Uberlândia, MG.
- [77] VINCENZI, F. et al. A switched power amplifier for audio application. COBEP – V Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, Foz do Iguaçu PR. Anais do COBEP 1999. Foz do Iguaçu, v. 2, p. 521–526, 1999.
- [78] VINCENZI, F. et al. A new audio switched power amplifier. INTELEC - International Telecommunications Energy Conference, Copenhagen Proceedings of IEEE INTELEC 1999. Piscataway - NJ - USA, único, p. 01–06, 1999.
- [79] Morais. L.M.F, Donoso-Garcia. P.F., Seleme Jr. S.I. e Cortizo. P.C. Batimento de tensão em um circuito LC utilizado na ignição de lâmpadas de descarga. *IEEE International Conference On Industrial Applications* INDUSCON, (7): CD-ROM, 2006.
- [80] Dos Reis. F.S. et. al. Low cost high Power factor for high pressure sodium lamps. *IEEE International Conference On Industrial Application*, INDUSCON (6), 2004. CD-ROM.
- [81] Morais. A.S., et. al. An electronic ballast employing a boost half-bridge topology. *IEEE Brazilian Power Electronics Conference.* COBEP, pages 204, 208, 2003.
- [82] Brañas. C, Azcondo. F.J, Bracho. S. Class D  $LC_sC_p$  series parallel resonant inverter with inherent maximum output Power suitable for driving HPS lamps. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE*, 1(X):318-323, 2000.
- [83] Costa. R. E , et. al, Industrial electronic ballast to supply 70 w hps lamp, *IEEE International Conference On Industrial Applications-* INDUSCON, ST-21, 2008 – Midia-eletrônica.
- [84] COSTA. M. A. D, Et. al. Projeto e implementação de um reator eletrônico microcontrolado, de elevado fator de potência, orientado a lâmpadas de vapor metálico. Congresso Brasileiro de Automática, CBA , 40914. 2008.
- [85] Chen. M, Xu. J, Liang. W, Qian, Z. Power control strategy of electronic ballast for HID lamps. *IEEE Industry Application Society IAS*, 3(4):1103 1106 Oct. 2006.
- [86] Cheng, C.-A.; Liang, T.-J.; Lin, R.-L. e Chen, J.-F. Design and implementation of frequency-modulated electronic ballast for metal-halide lamps. *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 153, No. 5, September 2006