

CLÁUDIO ROBERTO BARBOSA SIMÕES RODRIGUES

REATOR ELETRÔNICO RESSONANTE ORIENTADO AO TESTE DIMERIZADO DE  
LÂMPADAS DE VAPOR DE MERCÚRIO E VAPOR DE SÓDIO EM ALTA PRESSÃO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas Eletrônicos.

Orientador: Henrique Antônio Carvalho Braga, Dr. Eng.

Juiz de Fora

2009

Rodrigues, Cláudio Roberto Barbosa Simões

Reator eletrônico ressonante orientado ao teste dimerizado de lâmpadas de vapor de mercúrio e vapor de sódio em alta pressão / Cláudio Roberto Barbosa Simões Rodrigues. -- 2009.

131 f. :il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009.

1. Transformadores e reatores. 2. Materiais eletrônicos. I. Título

CDU 621.314

# **Reator Eletrônico Ressonante Orientado ao Teste Dimerizado de Lâmpadas de Vapor de Mercúrio e Vapor de Sódio em Alta Pressão**

*Cláudio Roberto Barbosa Simões Rodrigues*

Dissertação submetida ao corpo docente da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada por:

Prof. Henrique Antônio Carvalho Braga, Dr. Eng.  
(UFJF)

Prof. Pedro Francisco Donoso-Garcia, Dr. Eng.  
(UFMG)

Prof. Pedro Gomes Barbosa, D. Sc.  
(UFJF)

Prof. Moisés Vidal Ribeiro, D. Sc.  
(UFJF)

Juiz de Fora, MG – Brasil

Março de 2009

*Ao meu filho Francisco.*

# Agradecimentos

*Ao concluir esta dissertação, desejo expressar meus sinceros agradecimentos:*

*À FAPEMIG, pela concessão da bolsa de mestrado que permitiu a dedicação ao curso e à pesquisa.*

*Ao professor Henrique Braga, pela orientação, dedicação e pela confiança em mim depositada. Sei que o mestrado me presenteou com um novo amigo.*

*Aos professores Pedro Donoso-Garcia, Pedro Barbosa e Moisés Ribeiro por terem aceitado integrar a banca examinadora deste trabalho. Honra-me muito o aceite dos senhores.*

*Aos demais professores da pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFJF pelos ensinamentos e pelo apoio.*

*Ao acadêmico do curso de Engenharia Elétrica da UFJF Luiz Fernando Guedes, pelo suporte técnico na implementação dos protótipos, pelo desenvolvimento do indutor variável e pela amizade.*

*Aos demais amigos e colaboradores do NIMO: Eng. Vinícius Lacerda, Pedro Almeida e Anderson Pagliotto, pelo companheirismo e pelas conversas que muitas vezes culminaram em valiosas idéias para solucionar os problemas enfrentados durante os trabalhos.*

*Aos amigos do Mestrado em Engenharia Elétrica da UFJF, principalmente aos Engenheiros Frederico Ghetti e Rômulo Miranda, presentes desde a graduação.*

*À “Família JUDAC” e aos irmãos do Ministério Kyrie pelas orações, pela sincera amizade e por sempre me apoiarem nos momentos de dificuldade e partilharem a alegria das minhas vitórias.*

*Ao meu irmão Márcio, por toda ajuda e companheirismo desde sempre.*

*Aos meus pais pelo apoio e dedicação contínuos ao longo da minha formação.*

*À minha esposa Cecília, pelo carinho, paciência e renúncia que foram essenciais para o sucesso deste trabalho.*

*Ao Francisco, por ser a alegria da minha vida.*

*E por fim, à Deus, que abençoou todo o trabalho.*

*“A mente que se abre a uma nova idéia jamais  
voltará ao seu tamanho original.”*

*Albert Einstein*

## RESUMO

Este trabalho apresenta a proposta de um reator eletrônico ressonante dedicado à realização de testes de funcionalidade básica de lâmpadas de vapor de sódio e de vapor de mercúrio em alta pressão. Os testes são realizados com potência reduzida visando economizar energia elétrica e minimizar o ofuscamento dos operadores. O reator proposto é parte integrante de um sistema de reatores eletrônicos que deve substituir um conjunto de reatores eletromagnéticos utilizados em uma bancada de testes de componentes de iluminação pública. A utilização do conjunto de reatores substitutos propiciará a redução do peso e do volume da bancada, facilitando sua confecção em escala. O trabalho inclui um estudo teórico sobre lâmpadas de descarga de alta intensidade (HID) e sobre o fenômeno da ressonância acústica, que pode acometer estas lâmpadas quando são alimentadas em alta frequência. O estudo sobre reatores eletrônicos para lâmpadas HID apresentado enfatiza o reator eletrônico série-paralelo ressonante. Este reator é utilizado neste trabalho para a realização dos testes com potência reduzida das lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão de 70W e vapor de mercúrio em alta pressão de 125W sem a excitação do fenômeno da ressonância acústica e sem a necessidade de modificação de nenhum parâmetro do circuito. Para isto, foi desenvolvida uma metodologia para que o projeto do circuito ressonante série-paralelo pudesse atender ambas as lâmpadas em operação dimerizada. Apresentam-se ainda resultados experimentais dos testes realizados com o reator implementado.

**PALAVRAS CHAVE:** Reator Eletrônico, Lâmpadas HID, Vapor de Sódio, Vapor de Mercúrio, Ressonância Acústica.

## **ABSTRACT**

This work presents a proposal of a resonant electronic ballast intended for the basic functionally testing of high pressure sodium and mercury lamps. The tests are performed with reduced power in order to save energy and to minimize operators' glare effect. The proposed ballast is part of an electronic system that would replace a number of electromagnetic ballasts used in a lighting components bench test equipment. The use of this electronic system will provide the reduction of the weight and volume of the bench test equipment, favoring its commercial production. Theoretical studies about high intensity discharge lamps and acoustic resonance phenomenon, which can affect those kind of lamps in high frequency operation, are accomplished. The study of electronic ballasts for HID lamps presented emphasizes the series-parallel load resonant ballast. This ballast is used in this work for testing 70W high pressure sodium lamps and 125W high pressure mercury vapour lamps with reduced power, without exciting the acoustic resonance phenomenon and with no need of any circuit parameter modification. For this purpose, it was developed a design methodology of the series-parallel resonant circuit aiming dimmed operation of both lamps. Experimental results of tests performed with the implemented ballast are also included.

**KEY WORDS:** Electronic Ballast, HID Lamps, Sodium Vapor, Mercury Vapour, Acoustic Resonance.



# Simbologia

## 1. Símbolos adotados em expressões matemáticas e figuras

Símbolo	Significado	Unidade
$V_b$	Tensão do barramento CC	V
$L$	Indutância	H
$C_s$	Capacitor série	F
$C_p$	Capacitor paralelo	F
$v_0$	Tensão de saída do circuito inversor	V
$v_L$	Tensão sobre a lâmpada	V
$R$	Resistência equivalente da lâmpada	$\Omega$
$T$	Período de chaveamento	S
$f_s$	Frequência de chaveamento	Hz
$\omega_s$	Frequência de chaveamento	rad/s
$\omega_0$	Frequência de ressonância	rad/s
$Q$	Fator de qualidade	--
$F$	Frequência normalizada	--
$\alpha$	Relação entre os capacitores	--
$v_0'$	Tensão de saída do circuito inversor com nível CC subtraído	V
$a_1$	Amplitude do primeiro harmônico da tensão de saída do inversor	V
$A_{1rms}$	Valor rms do primeiro harmônico da tensão de saída do inversor	V
$\omega_p$	Frequência de ressonância na partida da lâmpada	rad/s
$V_L$	Tensão eficaz nominal de regime permanente da lâmpada	V
$P_L$	Potência nominal da lâmpada	W
$v_{0,1}$	Primeiro harmônico da tensão de saída do inversor	V
$M$	Mosfet	--
$C_b$	Capacitor do barramento CC	F
$R_t$	Resistor de controle de frequência de chaveamento	$\Omega$
$C_t$	Capacitor de controle da frequência de chaveamento	F
$v_{Lrms}$	Tensão eficaz de regime permanente da lâmpada	V

## 2. Acrônimos e abreviaturas

Símbolo	Significado
a.C	Antes de Cristo
VMAP	Vapor de Mercúrio em Alta Pressão
VSAP	Vapor de Sódio em Alta Pressão
MVMAP	Multi-vapores Metálicos em Alta Pressão
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
HID	<i>High Intensity Discharge</i>

UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
CFLCL	Companhia Força e Luz Cataguases Leopoldina
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos
LED	<i>Light Emmiting Diode</i>
E-27	Padrão de soquete para lâmpadas
E-40	Padrão de soquete para lâmpadas
IRC	Índice de reprodução de cor
TCC	Temperatura de cor correlata
CA	Corrente Contínua
CC	Corrente Alternada
Al <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Alumínio policristalino
Ni	Novio
Hg	Mercúrio
Xe	Xenônio
UV	Ultra-violeta
L	Comprimento do tubo de descarga
D	Diâmetro do tubo de descarga
EMI	Interferência eletromagnética
rms	Valor médio quadrático
ZVS	<i>Zero voltage switching</i>
ZCS	<i>Zero current switching</i>
$t_d$	<i>Dead time</i>
MOSFET	<i>Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor</i>
LCC	Circuito série-paralelo ressonante
$f_p$	Frequência de projeto do circuito ressonante
$f_i$	Frequência de chaveamento escolhida

### 3. Símbolos de Unidades de Grandezas Físicas

Símbolo	Significado
$\Omega$	Ohm
m	Metro
lm	Lumens
W	Watt
lm/W	Lumens por watt
kg	Kilograma
cm	Centímetros
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
V	Volt
Cd	Candela
K	Kelvin
s	Segundo
°C	Graus Celcius
Hz	Hertz

---

W/cm	Watt por centímetro
Atm	Atmosfera
A	Ampère

---

#### 4. Prefixos numéricos

Prefixo	Valor
p	$10^{-12}$
n	$10^{-9}$
$\mu$	$10^{-6}$
m	$10^{-3}$
c	$10^{-2}$
k	$10^3$
M	$10^6$
G	$10^9$
T	$10^{12}$

---

# Sumário

<b>Capítulo 1 – Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 – História da Iluminação Pública.....	1
1.2 – A Importância da Iluminação Pública.....	6
1.3 – Manutenção do Sistema de Iluminação Pública.....	8
1.4 – Bancada de Testes de Componentes de Iluminação Pública.....	9
1.4.1 – Teste de Reatores Eletromagnéticos.....	11
1.4.2 – Teste de Relés Fotoelétricos.....	13
1.4.3 – Teste de Bases para Relés Fotoelétricos.....	13
1.4.4 – Teste de Lâmpadas.....	13
1.5 – Proposição do Trabalho.....	14
1.6 – Objetivos.....	16
1.7 – Sumário.....	17
<b>Capítulo 2 – Lâmpadas de Descarga em Alta Pressão.....</b>	<b>19</b>
2.1 – Glossário de Luminotécnica.....	19
2.2 – Lâmpadas de Descarga.....	21
2.3 – Pressão da Descarga.....	24
2.4 – Lâmpadas de Descarga em Baixa Pressão.....	25
2.5 – Lâmpadas de Descarga em Alta Pressão.....	25
2.5.1 – Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão.....	25
2.5.2 – Lâmpadas de Vapor de Mercúrio em Alta Pressão.....	30
2.5.3 – Lâmpadas de Multivapores Metálicos em Alta Pressão.....	33
2.6 – Conclusões Parciais.....	35
<b>Capítulo 3 – Ressonância Acústica.....</b>	<b>36</b>
3.1 – Introdução.....	36
3.2 – Descrição do Fenômeno da Ressonância Acústica.....	37
3.3 – Modos.....	38
3.4 – Cálculo de Frequências Críticas.....	39
3.5 – Métodos de Detecção da Ocorrência de Ressonância Acústica.....	41

3.6 – Métodos para Evitar a Excitação a Ressonância Acústica.....	43
3.7 – Conclusões Parciais.....	47
<b>Capítulo 4 – Reatores Eletrônicos para Lâmpadas HID.....</b>	<b>48</b>
4.1 – Introdução.....	48
4.2 – Reatores Eletrônicos Não-Ressonantes.....	52
4.3 – Reatores Eletrônicos Ressonantes.....	54
4.3.1 – Inversor Série-Ressonante.....	56
4.3.2 – Inversor Paralelo-Ressonante.....	58
4.3.3 – Inversor Série-Paralelo Ressonante.....	60
4.4 – Projeto do Circuito Série-Paralelo Ressonante.....	67
4.5 – Conclusões Parciais.....	73
<b>Capítulo 5 – Projeto do Reator e Resultados Experimentais.....</b>	<b>76</b>
5.1 – Introdução.....	76
5.2 – Ensaios para a Determinação da Freqüência de Operação.....	77
5.3 – Projeto do Reator para Atender às Lâmpadas VSAP 70W e VMAP 125W.....	87
5.4 – Resultados Experimentais.....	93
5.5 – Conclusões Parciais.....	102
<b>Capítulo 6 – Conclusões .....</b>	<b>104</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>108</b>
<b>Apêndice 1 – Cálculo dos Componentes do Circuito de Disparo e do Filtro Capacitivo.....</b>	<b>116</b>
<b>Apêndice 2 – Resultados dos Ensaios para a Determinação da Freqüência de Chaveamento do Inversor .....</b>	<b>121</b>

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 História da Iluminação Pública

Desde os tempos mais remotos, o homem procura soluções para vencer a escuridão. Primeiro, o homem aprendeu a dominar o fogo e a conservá-lo. Em seguida, através da utilização de combustíveis, passou a alimentar o fogo para que pudesse ter luz quando e onde precisasse. Com o tempo foram surgindo novas soluções como tochas, candeeiros, velas, lampiões e por fim as lâmpadas elétricas.

A descoberta e o domínio do fogo foi o primeiro passo do homem na direção de ampliar seu universo tanto em relação ao tempo quanto em relação ao espaço, já que o fogo, utilizado como fonte de luz, trazia a claridade no período noturno e também para ambientes onde a luz do sol não podia entrar.

O primeiro dispositivo, do qual se tem relatos, que tratava de iluminação pública é o Farol de Alexandria, mostrado na Figura 1.1. O farol, que tinha cerca de 135 metros de altura, foi construído por volta do ano 285 a.C por ordem de Alexandre, o Grande. O histórico monumento localizava-se em uma pequena ilha chamada Faros, em frente à cidade de Alexandria no Egito. No alto da torre, os egípcios alimentavam uma fogueira

com lenha ou carvão. A luz produzida pelo fogo era refletida por espelhos para o mar e podia ser vista a 40 milhas de distância [1].



Figura 1.1– Farol de Alexandria [2].

As primeiras luminárias utilizadas pelo homem constituíam-se de rochas, conchas ou outros materiais naturais os quais eram preenchidos com gordura animal que mantinham o fogo aceso por mais tempo, o pavio destas luminárias era composto de fibras de plantas [3]. As lâmpadas de óleo da Mesopotâmia datam de 8000 a. C e as velas foram empregadas pela primeira vez no Egito antigo. Por volta do século VII a. C, os gregos começaram a produzir as chamadas lâmpadas “terracotta” (Figura 1.2) para serem utilizadas em substituição às tochas. Estas lâmpadas eram preenchidas com gordura animal ou óleo e a chama podia durar cerca de três horas [4].



Figura 1.2 – Lâmpada “terracotta” [5].

Muitos modelos diferentes de lâmpadas a óleo foram utilizados na idade média. Com o passar do tempo observou-se melhorias no “*design*” e na fabricação, com utilização de materiais diferentes, adição de refletores e utilização de óleo de peixe e de baleia [3]. Entretanto, apenas em 1784, quando o inventor e físico suíço Aimée Argand inventou a famosa lâmpada de Argand, observou-se um grande avanço com relação à eficiência das fontes luminosas artificiais. A Lâmpada de Argand, mostrada na Figura 1.3 consiste de um pavio circular colocado no interior de uma chaminé de vidro, por onde passava uma corrente de ar ascendente que auxiliava a combustão. A luz é produzida por uma chama estável, de forte intensidade e reduzida geração de fumaça, alimentada primeiramente com óleo, e anos mais tarde com querosene. Este dispositivo foi empregado, com alguns aperfeiçoamentos, por cerca de cem anos [6].



Figura 1.3 – Lâmpada de Argand [7].

A iluminação pública teve um impulso no século XIX, principalmente na Inglaterra, onde as lâmpadas a gás se tornaram amplamente populares [7].

Também no início do século XIX, em 1801, o inglês Humphrey Davy propôs a primeira lâmpada a arco. A lâmpada a arco consiste de dois eletrodos de carbono devidamente espaçados (alguns poucos milímetros) que quando alimentados propiciam a criação de um arco voltaico gerando uma luz intensa e brilhante. Esta é considerada por muitos a primeira lâmpada de descarga desenvolvida. Entretanto, este tipo de lâmpada apresenta algumas desvantagens, como a grande intensidade luminosa o que as restringia à utilização em ambientes externos e a pequena vida útil dos eletrodos de carbono que deviam ser trocados constantemente e também mantidos com uma separação exata, do contrário a lâmpada se apagava [3] e [8]. Vários esforços foram realizados para diminuir as



desvantagens apresentadas pelas lâmpadas a arco. Em 1846, o engenheiro inglês W. E. Staite inventou um mecanismo que aproximava as hastes de carbono automaticamente à medida que estas se desgastavam, aumentando assim a vida útil destas lâmpadas, entretanto, o sistema se mostrava muito dispendioso. Em 1876 em Paris, o engenheiro e antigo oficial do exército russo Paul Jablochhoff, inventou a “vela elétrica” que se apresentou como uma solução mais econômica. A vela elétrica era constituída por duas hastes de carvão, como as outras lâmpadas de descarga. A novidade, porém, era que estas hastes eram dispostas uma ao lado da outra ao invés de ficarem uma em frente à outra. O arco se formava entre as duas extremidades das hastes, à medida que estas se desgastavam o arco descia naturalmente [8].

A lâmpada de Jablochhoff surgiu como uma das primeiras fontes de luz elétrica utilizada em iluminação pública e veio concorrer com a amplamente utilizada iluminação a gás. A luz emitida pela “vela elétrica” tinha uma tonalidade muito clara. Por isso, muitos preferiam a iluminação a gás [7].

A consolidação da iluminação elétrica aconteceu anos mais tarde com o desenvolvimento das lâmpadas incandescentes [9]. Em 1854, o alemão Heinrich Goebel construiu a primeira lâmpada incandescente utilizando fibra carbonizada de bambu, mas só em 1879 foi que o norte-americano Thomas Alva Edison, através de seus experimentos, observou que o aquecimento de um filamento metálico era capaz de liberar elétrons (efeito Edison) e também luz por incandescência [10]. Nascia assim a primeira lâmpada incandescente capaz de ser comercializada, utilizando como filamento um fio de linha carbonizado. Em 1911 com o desenvolvimento das técnicas de trefilação do tungstênio deu-se um grande passo para a popularização das lâmpadas incandescentes, já que os filamentos eram mais robustos e capazes de suportar temperaturas mais elevadas [10].

A invenção da lâmpada incandescente preencheu a necessidade fundamental da humanidade em poder utilizar a luz melhor e mais intensa, sem perigo, sem esforços e a baixo custo.

Em 1857, o físico francês Alexandre E. Becquerel que investigou os fenômenos de fosforescência e de fluorescência, teorizou acerca de tubos fluorescentes, muito parecidos com as lâmpadas fluorescentes tubulares utilizadas hoje em dia, mas o primeiro protótipo de uma lâmpada fluorescente foi construído pelo norte-americano Peter Cooper Hewitt em 1901 e ficou conhecida como lâmpada de mercúrio em baixa pressão a arco. Entretanto,

este tipo de lâmpada só foi introduzido no mercado da iluminação em geral por volta de 1940 alcançando popularização quase imediata. Em 1970 as lâmpadas fluorescentes tubulares já eram as maiores fontes de iluminação artificial. Entre o final da década de 1970 e início da década de 1980, a Philips NV e a OSRAM desenvolveram uma nova concepção em lâmpadas fluorescentes conhecidas como lâmpadas fluorescentes compactas [11] e [12].

Em 1934 foi desenvolvida por Edmund Germer, um inventor alemão, uma variante desta lâmpada, porém, utilizando vapor de mercúrio em alta pressão, o que propiciava uma intensidade muito maior para a fonte luminosa, permitindo que a mesma fosse utilizada para iluminação de áreas externas [5] e [9].

As lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão e de multivapores metálicos surgiram, respectivamente, por volta de 1955 e 1964 [9]. A partir daí, muitos avanços foram observados com relação às lâmpadas de descarga em alta pressão. Hoje em dia, estas lâmpadas são as mais utilizadas em iluminação pública em todo o mundo, devido ao grande fluxo luminoso emitido e à longa vida útil, como será salientado mais adiante neste trabalho.

A iluminação pública no Brasil utilizou-se por séculos de lenha, das velas de cera, das lamparinas à óleo e depois da iluminação à gás. No Rio de Janeiro, por exemplo, em meados do século XVI e início do Século XVII, a pouca iluminação existente nas ruas era proveniente dos oratórios e custeada por particulares. A primeira lanterna que permanecia permanentemente acesa na cidade foi instalada em 1710 na portaria do Convento de Santo Agostinho, no Largo da Carioca. [13].

Até que por volta de 1850 a energia elétrica chegou ao país. Em 1879, D. Pedro I inaugurou a iluminação elétrica da atual estação Central do Brasil, constituída por seis lâmpadas de Jablochhoff alimentadas por dois dínamos [13].

Enquanto as ruas das cidades do Rio de Janeiro e de São Paulo ainda eram iluminadas pela luz das lamparinas, em 1889, a cidade de Juiz de Fora em Minas Gerais, entrava na era da iluminação elétrica, já que acabara de tornar-se a primeira cidade do Brasil e da América do Sul a ter sua própria usina, a usina hidroelétrica de Marmelos, construída pelo industrial Bernardo Mascarenhas às margens do Rio Paraibuna. A construção desta usina valeu a condecoração de “Farol do Continente” à cidade mineira [14].

Hoje em dia, a iluminação elétrica é amplamente utilizada no mundo todo e a iluminação pública utiliza principalmente lâmpadas de descarga de alta intensidade (ou

HID, do inglês *High Intensity Discharge*).

## 1.2 A Importância da Iluminação Pública

Cerca de oitenta por cento das informações que o ser humano pode retirar do mundo externo é obtida por meio da visão [9]. Portanto, a utilização de sistemas de iluminação adequados à tarefa visual realizada em um determinado ambiente não é apenas uma questão de estética, mas uma necessidade.

A iluminação pública é o serviço que tem por objetivo prover de luz, ou claridade artificial, os logradouros públicos. Nos dias atuais, a iluminação de ruas, avenidas, praças, monumentos e demais logradouros públicos é essencial para a boa organização de um município, já que contribui para a segurança da população e para o tráfego de veículos, além é claro de favorecer o comércio, o turismo, o lazer entre outras atividades [15].

Mundialmente, cerca de 30% da energia elétrica gerada é consumida com iluminação artificial [16]. No Brasil, este número chega a 17%, sendo que 3,5% do total da energia elétrica é utilizada em iluminação pública. Existem cerca de 13 milhões de pontos de iluminação pública cadastrados no país [13].

Isso mostra que a iluminação pública está intimamente associada com a qualidade de vida dos cidadãos e com o desenvolvimento sócio-econômico do município. Desta forma a busca por melhorias neste sistema é um assunto de grande importância e sempre atual [17].

Cada ponto de iluminação pública é composto basicamente por uma lâmpada, um reator, um ignitor (dependendo da tecnologia da lâmpada empregada), uma fotocélula e uma luminária que são fixados em um poste. A eficiência deste ponto está ligada às características e ao bom funcionamento de cada um destes componentes. A Tabela 1 abaixo, com dados do ano de 2004, extraída de [18], mostra os tipos de lâmpadas utilizadas na iluminação pública no Brasil e a participação percentual de cada uma.

Tabela 1 – Tipos de lâmpada e sua utilização na iluminação pública no Brasil.

<b>Tipo de lâmpada</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Participação</b>
Vapor de Mercúrio em Alta Pressão (VMAP)	6.777.877	52,0%
Vapor de Sódio em Alta Pressão (VSAP)	5.257.062	40,3%
Mistas	519.208	4,0%
Incandescentes	274.230	2,1%
Fluorescentes	100.248	0,8%
Multi-vapores Metálicos (MVMAP)	63.600	0,5%
Outras	49.168	0,4%
TOTAL	13.041.483	

Apesar de se observar uma maior utilização das lâmpadas VMAP, sabe-se que as lâmpadas VSAP apresentam algumas vantagens quando comparadas com as primeiras, como maior eficiência luminosa (VMAP até 60lm/W e VSAP até 130lm/W) e maior vida útil (VMAP cerca de 24 mil horas e VSAP cerca de 38 mil horas) [15], [19] - [21]. Por estas razões, a ANEEL e a Eletrobrás/PROCEL têm estimulado, inclusive financeiramente, as prefeituras e concessionárias para promoverem ações que resultem em melhorias da eficiência da iluminação pública. Uma das ações típicas consiste em substituir lâmpadas VMAP por lâmpadas VSAP de potência inferior [22].

Como pode ser observado na Tabela 1, a maioria dos pontos de iluminação pública brasileiros utilizam lâmpadas de descarga em alta pressão (VMAP, VSAP e multivapores metálicos). Estas lâmpadas necessitam de um reator para limitar a corrente que as percorre após o estabelecimento do arco de descarga. Os reatores eletromagnéticos têm sido amplamente utilizados no acionamento destas lâmpadas. Eles são simples, confiáveis, robustos e de baixo custo, porém, apresentam alguns inconvenientes como elevados peso, volume e ruído audível, baixa eficiência, pouca regulação de potência, baixo fator de potência e sensibilidade à variação de tensão da rede [23].

A existência destes e de outros inconvenientes dos reatores eletromagnéticos levou a pesquisas no intuito de se desenvolver reatores com melhores características. Desta forma surgiram os reatores eletrônicos para lâmpadas HID.

Os reatores eletrônicos para lâmpadas HID contam com a vantagem da compactação, menor peso, ausência de flicker e efeito estroboscópico, possibilidade de incorporar ignição

e controles diversos à iluminação (como por exemplo a dimerização), maior eficiência e, adicionalmente, podem estender a vida útil das lâmpadas e promover melhor estabilidade luminosa ao longo da vida útil do bulbo. Reatores eletrônicos aplicados a lâmpadas fluorescentes têm sido estudados e desenvolvidos desde os anos 1980, sendo que em 2001 eles superaram os reatores eletromagnéticos em número de unidades vendidas nos Estados Unidos. Por outro lado, a comercialização de reatores eletrônicos para lâmpadas HID é ainda muito incipiente, fato que talvez seja associado ao fenômeno da ressonância acústica, observado quando se alimenta um bulbo de descarga de alta pressão em frequências elevadas (dezenas a centenas de quilohertz). Este assunto será tratado com maiores detalhes em outro capítulo deste texto.

### **1.3 Manutenção do Sistema de Iluminação Pública**

O serviço de iluminação pública é normalmente, oferecido pelas prefeituras dos municípios através das concessionárias de energia elétrica. Como apontado anteriormente, quando o serviço de iluminação pública é de boa qualidade e bem dimensionado, pode-se observar melhores índices de segurança pública e no trânsito, acarretando maior satisfação do contribuinte [17]. Portanto, deve ser papel das concessionárias buscar a excelência na prestação destes serviços, de modo a promover a melhoria da qualidade de vida dos cidadãos.

A manutenção e o acompanhamento da qualidade dos componentes empregados nos sistemas de iluminação pública, bem como os problemas relacionados com perdas de diversas naturezas neste segmento têm sido alvo de trabalhos recentes [24] - [27], ressaltando a importância do tema. No entanto, a realidade das concessionárias de energia elétrica mostra que as atividades de manutenção sofrem com problemas de sazonalidade, particularidades das equipes de campo, dificuldade de interação entre equipes, qualidade oscilante de determinados componentes adquiridos e ausência eventual de comunicação entre os técnicos e demais responsáveis pela aquisição de componentes e gerência do sistema [17].

Neste sentido, foi firmada uma parceria entre a Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e a Companhia Força e Luz Cataguases – Leopoldina (CFLCL, atual Energisa)

através de um projeto P&D Aneel, visando a padronização de rotinas de manutenção, o cuidado na aquisição, recepção e transporte dos materiais. Observou-se que a avaliação cuidadosa de componentes novos ou destinados a descarte são procedimentos que podem reduzir significativamente os custos e desperdícios historicamente verificados no setor [28]. Desta forma foi desenvolvida uma metodologia, apresentada com maiores detalhes em [17], que pretende aperfeiçoar a qualidade das redes de iluminação pública da concessionária. Para dar suporte à avaliação dos componentes usados na iluminação pública foi projetada uma bancada de testes de componentes de iluminação pública, que será descrita com maiores detalhes na seção seguinte.

## 1.4 Bancada de Testes de Componentes de Iluminação Pública

Uma fotografia da bancada de testes de componentes de iluminação pública (doravante chamada apenas de bancada) é apresentada na Figura 1.4.



Figura 1.4 – Fotografia da bancada de testes de componentes de iluminação pública.

A Figura 1.5 mostra uma representação estilizada da bancada onde suas principais funcionalidades são destacadas.

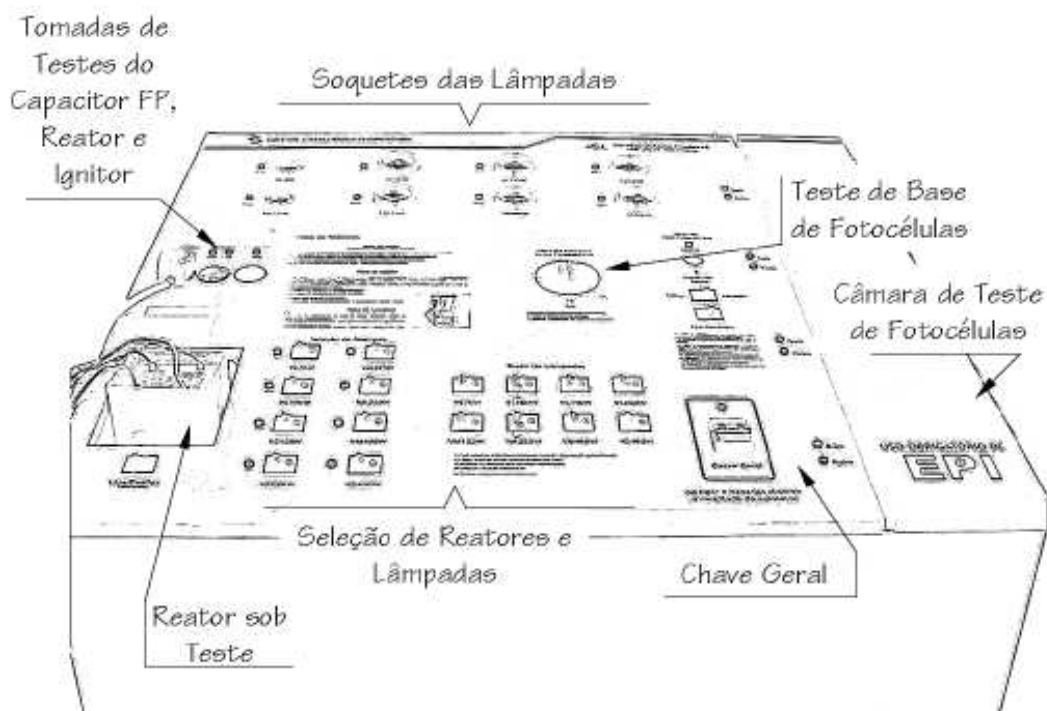


Figura 1.5 – Vista superior frontal da bancada com destaque das principais unidades.

A bancada é um produto pioneiro e semi-automatizado que propicia a realização dos testes de funcionalidade básica de:

- Reatores eletromagnéticos (ignitor, capacitor de correção de fator de potência e indutor);
- Relés fotoelétricos;
- Bases para relé fotoelétrico;
- Lâmpadas HID (vapor de sódio e vapor de mercúrio em alta pressão nas potências utilizadas pela concessionária).

Além dos testes relacionados, a bancada possui um sistema de autoteste para os reatores eletromagnéticos utilizados nos testes das lâmpadas. O equipamento é munido de proteções contra sobrecarga (fusíveis e disjuntor) e contra surtos na rede (DPS). O sistema de realização dos testes utiliza microcontroladores PIC – Microchip, o que propicia grande simplicidade na operação dos equipamentos.

Os reatores e as lâmpadas que podem ser testados na bancada são os modelos utilizados pela CFLCL, tratam-se de lâmpadas e reatores para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão de 70W, 100W, 150W, 250W e 400W, e lâmpadas e reatores para lâmpadas

de vapor de mercúrio de 125W, 250W e 400W.

A seguir serão apresentados, de forma breve, cada um dos testes realizados pela bancada.

### 1.4.1 Teste de Reatores Eletromagnéticos

Este teste pode verificar as funções básicas das principais partes constituintes do reator eletromagnético. A Figura 1.6 mostra o aspecto externo destes reatores, que podem pesar até cerca de 6kg e ocupar um volume próxima a 150cm<sup>3</sup> cada unidade. Dentro do invólucro do reator encontram-se, normalmente, a bobina do reator (ou, simplesmente, reator), o capacitor para correção de fator de potência e o ignitor (no caso de reatores para lâmpadas que precisam de ignitor para o seu funcionamento).

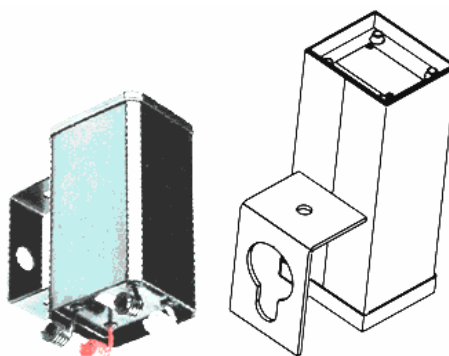


Figura 1.6 – Reatores eletromagnéticos utilizados em lâmpadas HID.

O módulo de teste de reatores eletromagnéticos engloba os testes de capacitor de correção de fator de potência, de ignitor e do indutor do reator, que podem ser realizados separadamente. Além disso, este módulo da bancada conta ainda com um mecanismo de proteção contra falha humana, que desconecta os estágios caso ocorra uma operação indevida [29]. Para a realização do teste, o operador deve selecionar uma chave que indica a potência do equipamento sob teste, caso mais de uma potência seja selecionada, o mecanismo de proteção contra falha humana é acionado desconectando a bancada da rede de energia elétrica.

O teste de ignitor detecta o bom ou mau funcionamento de ignitores. Quando em



boas condições, este componente deve gerar pulsos de alta tensão (acima dos 2kV). A Figura 1.7 mostra o aspecto de um ignitor comercial.



Figura 1.7 – Ignitor

Os pulsos de tensão gerados pelo ignitor sob teste passam por um transformador abaixador que reduz a amplitude do sinal sem alterar suas características principais. Este sinal é então comparado com um sinal de referência e o resultado do teste é traduzido para o operador por meio de um LED que acende quando o componente está funcionando de forma correta.

Ambos os testes do capacitor para correção do fator de potência e da bobina do reator são realizados em baixa tensão (24Vca), para evitar a geração dos pulsos de tensão no caso dos reatores para lâmpadas de vapor de sódio.

O teste da bobina do reator verifica se a mesma está em curto, aberta ou em bom estado. Para isso, realiza-se a medição da indutância da bobina do reator sob teste. O valor obtido é então comparado com um valor de referência, definidos de forma empírica, de acordo com o tipo e a potência do reator selecionado.

Já o teste do capacitor de correção de fator de potência baseia-se na medição da tensão sobre um elemento resistivo que é inserido em série com a alimentação do reator sob teste. Se o capacitor estiver em bom estado, o nível de tensão é suficiente para acender um LED que indica que a unidade está em bom estado.

## 1.4.2 Teste de relés fotoelétricos

Os relés fotoelétricos utilizados pela CFLCL são dos tipos eletrotérmicos, eletromagnéticos e eletrônicos. Todos estes modelos podem ser testados na bancada que realiza o teste da operação diurna e noturna dos componentes, além de verificar a possibilidade de existência de um curto-circuito entre os terminais de entrada do relé, devido a um defeito de fabricação ou a um abalo mecânico durante o transporte. Podem ser testados até 4 relés de forma simultânea. A duração do teste é de cerca de 45 segundos para relés fotoelétricos de tecnologia de fabricação eletrônica ou eletromagnética e de 2 minutos para aqueles de tecnologia eletro térmica.

Para a realização dos testes, os relés devem ser introduzidos em um câmara escura localizada na bancada. Ao final do teste um LED indica se o componente encontra-se ou não em bom estado.

## 1.4.3 Teste de Bases para Relés Fotoelétricos

Este módulo realiza o teste de continuidade elétrica dos terminais das bases. As bases para relés fotoelétricos são um ponto crítico para a manutenção dos sistemas de iluminação pública, já que muitas vezes apresentam maus-contatos devido à oxidação dos terminais. Em muitos casos, a simples limpeza dos contatos da base possibilita sua reutilização [26] e [27].

## 1.4.4 Teste de Lâmpadas

O teste de lâmpada é extremamente simples e consiste na observação do bom funcionamento da lâmpada. O operador deve colocar a lâmpada a ser testada no bocal indicado com a potência e o tipo da mesma e acionar o interruptor para ligá-la. Em seguida, deve-se esperar alguns minutos para que a lâmpada passe pelos processos de ignição e aquecimento e passe a operar em regime permanente. Para evitar conclusões errôneas, a bancada possui um sistema de autoteste dos reatores internos que são utilizados nos testes

das lâmpadas. Sempre que a bancada é energizada o autoteste é realizado automaticamente, garantindo, assim, a confiabilidade dos resultados obtidos.

## 1.5 Proposição do Trabalho

A bancada, está sendo empregada por equipes de técnicos em 12 cidades de 4 estados brasileiros e se mostra eficiente para os propósitos para os quais foi projetada. Entretanto, é um equipamento volumoso e pesado (cerca de 70kg), característica atribuída principalmente à presença de oito reatores eletromagnéticos internos, usados para o teste de lâmpadas. Estes reatores são responsáveis por cerca de 40% do peso total do equipamento. A Figura 1.8 mostra um croqui simplificado da bancada para que se tenha uma melhor percepção do seu volume.

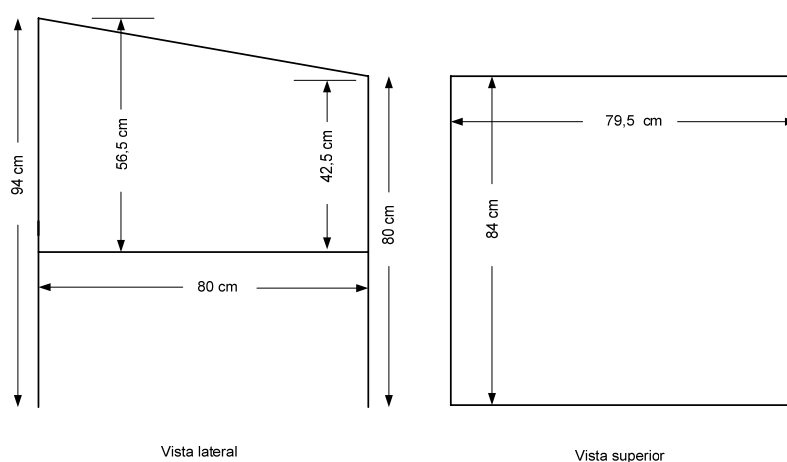


Figura 1.8 – Dimensões da bancada.

Tendo em vista a redução do volume e peso da bancada, o que facilitaria sua produção e comercialização em larga escala, propõe-se a substituição de seus reatores eletromagnéticos convencionais por reatores eletrônicos especialmente projetados para atender ao teste de grupos de lâmpadas. Em outras palavras, os reatores projetados deverão ser capazes de acionar mais de uma lâmpada (não simultaneamente), o que também reduziria a quantidade de circuitos e unidades eletroeletrônicas no interior do equipamento, facilitando o diagnóstico de defeitos, aumentando a confiabilidade dos testes e reduzindo o

custo total da bancada. Além disso, a utilização de reatores eletrônicos permite operar as lâmpadas de forma dimerizada, ou seja, com potência inferior à nominal, o que leva a uma redução do consumo de energia elétrica durante os testes além de reduzir o fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas, que por muitas vezes causa o ofuscamento do operador da bancada e demais funcionários.

Por outro lado, a utilização de reatores eletrônicos pode causar a ocorrência da ressonância acústica, fenômeno que provoca instabilidades no arco de descarga. Portanto, estes reatores devem ser projetados de forma a não excitar este fenômeno.

Contudo, a presença dos oito reatores eletromagnéticos garante a modularização do equipamento e permite o teste simultâneo de várias lâmpadas. Assim, o processo de substituição dos reatores eletromagnéticos precisa tomar como base as facilidades conferidas pela presença dos oito elementos e procurar solucionar as desvantagens da sua utilização.

Desta forma, visando um compromisso entre a economia e a versatilidade desejada com a substituição proposta, chegou-se ao esquema mostrado na Figura 1.9.

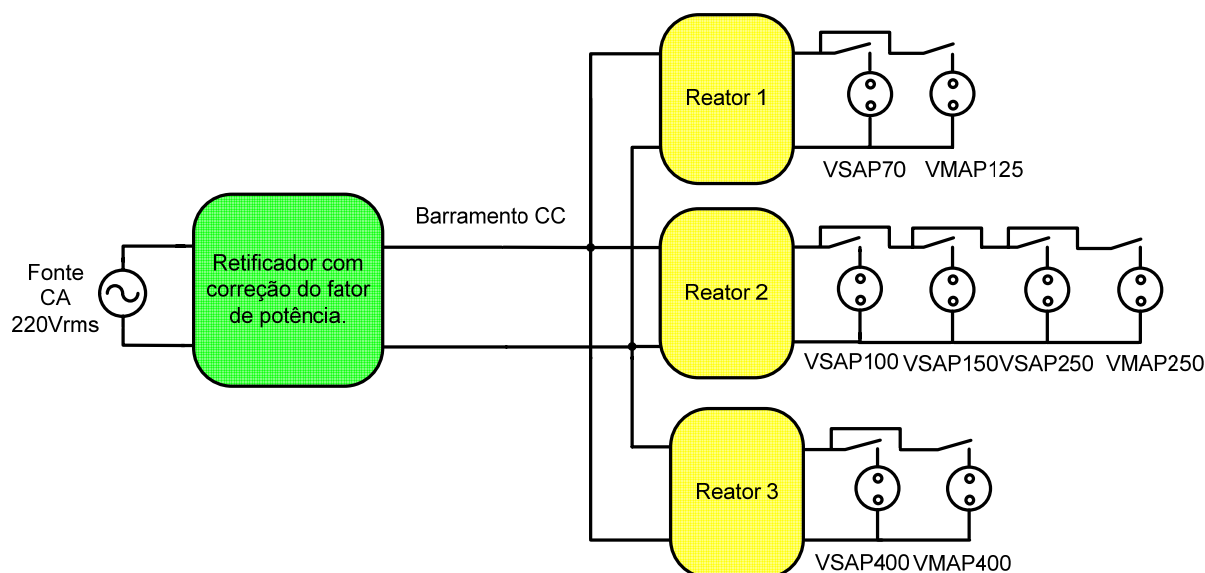


Figura 1.9 – Diagrama de blocos do reator eletrônico proposto.

Todas as lâmpadas de interesse podem ser testadas no novo sistema, na Figura 1.9, as

lâmpadas estão indicadas por VMAP ou VSAP (vapor de mercúrio ou vapor de sódio, respectivamente) seguida de sua potência nominal (por exemplo VSAP100 indica uma lâmpada de vapor de sódio de 100W). É interessante ressaltar que, apesar de na Figura 1.9 as lâmpadas aparecerem em paralelo umas às outras, cada reator pode acionar apenas uma lâmpada de cada vez. Pode-se observar que neste arranjo, um único retificador esta sendo proposto para alimentar todos os reatores da bancada, o que também reduz o volume ocupado e o custo final de implementação.

Esta configuração foi proposta tendo em vista duas premissas: primeiramente, os reatores não deveriam atender a lâmpadas com soquetes diferentes, de forma que apenas um receptáculo fosse disponibilizado para cada reator. Assim, como as lâmpadas VSAP70 e VMAP125 utilizam soquetes E-27, e todas as outras utilizam soquete E-40, definiu-se as lâmpadas que seriam atendidas pelo reator 1. Por fim, cada reator deveria atender a lâmpadas cujas potências não fossem muito díspares para que, com o mínimo possível de ajustes, todas as lâmpadas pudessem ser acionadas com baixa potência. Com isso, as lâmpadas de 400W, que possuem potência muito maior do que as demais, deveriam ser acionadas por um único reator (reator 3). Visando reduzir o número original de reatores em mais de 50%, optou-se por agrupar as demais lâmpadas (VSAP100, VSAP150, VSAP250 e VMAP250) em um único reator, ou seja, o reator 2.

Assim, é então proposto que os oito reatores eletromagnéticos originais sejam substituídos por um sistema contendo um retificador com correção de fator de potência central e três reatores. Pela diversidade de lâmpadas atendidas por um mesmo reator, o projeto final pode vir a necessitar de comandos nos quais o operador deverá atuar para garantir que a lâmpada a ser testada passe pelas fases de ignição, aquecimento e entre em regime operando com potência inferior à nominal sem excitar o fenômeno da ressonância acústica.

## 1.6 Objetivos

Este trabalho tem como foco o projeto, implementação em laboratório e a análise de desempenho do reator 1 apresentado no item anterior. Ou seja, o objetivo é a produção de um reator eletrônico que seja capaz de operar uma lâmpada de vapor de sódio de alta

pressão de 70W ou uma lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão de 125W com potência inferior à nominal, sem provocar o aparecimento da ressonância acústica, com finalidade do teste de funcionalidade das mesmas.

Para a implementação do reator 1, não será utilizado um estágio para a correção do fator de potência. O estágio de entrada do reator será composto apenas por um retificador a diodos com filtro capacitivo. A implementação do estágio de entrada com correção do fator de potência foi deixada para uma possível implementação do sistema proposto como um todo.

## 1.7 Sumário

Com base na concepção, dimensionamento de componentes e implementação do protótipo do reator 1, acredita-se que os demais reatores poderão ser projetados analogamente, empregando os mesmos princípios. Assim, o sistema substituto do conjunto total de reatores eletromagnéticos, usados na bancada original, poderá ser desenvolvido, caso haja uma demanda comercial neste sentido.

Este trabalho foi dividido em seis capítulos, conforme apresentado a seguir.

No Capítulo 2, será apresentado um breve estudo sobre as lâmpadas HID, dando ênfase às lâmpadas de vapor de sódio e de vapor de mercúrio de alta pressão.

O Capítulo 3 é dedicado ao estudo do fenômeno da ressonância acústica, que se mostra como um grande desafio para os projetistas de reatores para lâmpadas HID. A partir de uma análise teórica sobre o assunto, serão apresentadas formas de previsão de faixas livres de ressonância. Abordar-se-á ainda consequências da ocorrência do fenômeno, métodos de detecção e formas de alimentação da lâmpada que evitam a excitação da ressonância acústica.

Algumas topologias utilizadas para reatores de lâmpadas HID e o detalhamento do reator proposto serão o conteúdo do Capítulo 4. Ainda neste capítulo é apresentada toda a parte de projeto do reator com o equacionamento e as simulações. Já os resultados obtidos em laboratório e o detalhamento dos ensaios realizados é o assunto do Capítulo 5.

As conclusões gerais do trabalho e propostas de continuidade do mesmo através de trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6.

Neste capítulo introdutório foi apresentado um breve histórico sobre a iluminação pública dando um enfoque maior à situação nacional. Discutiu-se a importância da iluminação bem dimensionada e sua relação com o bem estar dos cidadãos e o desenvolvimento dos municípios.

Foi também apresentada a situação do sistema de iluminação pública nacional, destacando-se a grande popularização dos reatores eletromagnéticos devido, principalmente ao seu baixo custo e robustez. Já os reatores eletrônicos para lâmpadas HID ainda não experimentam o grande sucesso dos reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes, isto devido principalmente à ocorrência do fenômeno da ressonância acústica.

Discutiu-se ainda a importância da sistematização da manutenção dos sistemas de iluminação pública. Dentro deste tópico foi apresentada a bancada de testes de componentes de iluminação pública, desenvolvida através de uma parceria entre a UFJF e a CFCL. Uma breve explanação a respeito do seu funcionamento foi realizada.

Finalmente, foi apresentada a proposta do trabalho, que tem como motivação a redução do peso e do volume da bancada através da substituição dos reatores eletromagnéticos utilizados para os testes de lâmpadas por reatores eletrônicos que podem ainda gerar uma redução de consumo de energia elétrica durante a realização dos testes.

# Capítulo 2

## Lâmpadas de Descarga em Alta Pressão

Neste capítulo serão descritas algumas particularidades das lâmpadas HID, com maior ênfase nas lâmpadas VSAP e VMAP, que são alvos deste estudo. Antes porém, será apresentado um pequeno glossário com termos utilizados em luminotécnica.

### 2.1 Glossário de Luminotécnica

O objetivo deste glossário é a apresentação de alguns termos que são normalmente utilizados no estudo de sistemas de iluminação. Assim, pretende-se familiarizar o leitor com termos que poderão ser encontrados no decorrer do texto. Os conceitos definidos a seguir, de forma rápida, são muito importantes para a compreensão de algumas características das lâmpadas [30] - [34].

***Fluxo luminoso:*** É a radiação total de luz visível emitida por uma fonte luminosa em todas as direções do espaço por unidade de tempo (segundo). Pode-se dizer que o fluxo luminoso expressa a quantidade de luz emitida por uma fonte luminosa, como por exemplo uma lâmpada, é a energia luminosa emitida pela fonte. A unidade de medida do fluxo



luminoso no sistema internacional é o lúmen (lm).

O fluxo luminoso das lâmpadas, de uma forma geral, é depreciado ao longo da sua vida útil.

**Luminância:** É a sensação de claridade transmitida aos olhos. É a razão entre a intensidade luminosa que emana de uma dada superfície e a área desta superfície. A unidade de medida da luminância no sistema internacional é  $\text{cd}/\text{m}^2$ .

**Refletância:** É a relação entre a luz refletida e a luz incidente em uma superfície, normalmente representada em termos de porcentagem. A refletância varia de acordo com a cor e o material da superfície.

**Intensidade Luminosa:** Grandeza base do sistema internacional para iluminação, cuja unidade é a candela (cd). É o fluxo luminoso irradiado por uma fonte luminosa na direção de um determinado ponto. Pode ser entendido como um vetor luminoso emitido pela fonte de luz.

**Iluminância:** É a relação entre o fluxo luminoso emitido por uma fonte luminosa e a área que recebe esta iluminação a uma determinada distância. A unidade de medida desta grandeza é o lux. É um dos conceitos mais utilizados na luminotécnica, uma vez que pode ser medida por um equipamento chamado luxímetro. A norma brasileira NBR-5410 da ABNT, determina os níveis de Iluminância adequados para diferentes tipos de ambientes levando em consideração as refletâncias das paredes, do chão e do teto, a idade dos usuários e ainda o nível de precisão das atividades desenvolvidas.

**Índice de Reprodução de Cor (IRC):** É uma convenção internacional utilizada para avaliar a capacidade da fonte luminosa de representar as cores dos objetos. Quanto mais alto o IRC (baseado em uma escala de 0 a 100), melhor é a reprodução das cores. Um IRC maior que 75 é considerado excelente, entre 65 e 75 bom, entre 55 e 65 regular e menor que 55 pobre.

As diferenças de IRC entre lâmpadas de maneira geral não são significantes, ou perceptíveis, a menos que a diferença seja maior que três a cinco pontos.

***Temperatura de Cor Correlata (TCC):*** Fornece uma medida da tonalidade da cor da luz emitida pela fonte luminosa. A unidade de medida é o Kelvin (K). Não existe relação entre esta grandeza e o calor físico da lâmpada. Maiores temperatura de cor correspondem a luzes mais brancas, e menores temperaturas de cor a luzes mais amarelas.

O conceito de luz fria e luz quente que relaciona a cor da luz com a sensação térmica da mesma, também não tem relação com a temperatura de cor da fonte. Na verdade, fontes de luz com alto TCC emitem luz branca, considerada fria. Já fontes com TCC baixo emitem luz amarelada, que traz sensação de relaxamento e são consideradas quentes.

***Eficiência Luminosa:*** Relação entre o fluxo luminoso emitido por uma fonte e a potência por ela absorvida. Esta relação expressa a eficiência da fonte e é utilizada para a comparação entre diferentes tecnologias de lâmpadas. A sua unidade de medida é lm/W.

## 2.2 Lâmpadas de descarga

Nas lâmpadas de descarga em geral, o fluxo luminoso é produzido direta ou indiretamente pela passagem de corrente elétrica através de uma mistura gasosa composta de gases inertes e vapores metálicos. Esta mistura de gases encontra-se confinada em um invólucro translúcido, o tubo de descarga, que em geral, contém em suas extremidades os eletrodos, que são responsáveis pela interface entre a descarga e o circuito elétrico de alimentação. A emissão de luz através da descarga é mais eficiente do que a emissão através da incandescência, pois na descarga pode-se atingir maiores temperaturas, o que resulta em menor perda de energia através de radiação infravermelha [33].

Os gases mais comuns utilizados são o argônio, o neônio, o xenônio, o hélio ou o criptônio e os vapores de mercúrio e sódio com alguns aditivos [10].

Em lâmpadas de descarga, o composto metálico responsável pela radiação encontra-se no estado sólido ou líquido na temperatura ambiente. O gás inerte, também conhecido como gás de preenchimento ou "*filling gas*" deve ser isolante elétrico [30]. Quando um campo elétrico de intensidade grande o bastante é aplicado ao gás, ocorre o

rompimento de sua rigidez dielétrica, propiciando o aparecimento de uma descarga elétrica. Este processo é chamado de ignição. É necessário que exista uma conexão entre o gás no interior do tubo de descarga e o meio externo, o que é normalmente feito pelos eletrodos. Entretanto, conexões sem eletrodos também são possíveis, como no caso das lâmpadas de indução [30]. O calor gerado pelo arco elétrico criado através do gás de preenchimento vaporiza o composto metálico criando, assim, condições favoráveis à circulação de corrente pela lâmpada. Desta forma, o arco elétrico é estabelecido em meio ao plasma.

A radiação gerada pela passagem da corrente pela lâmpada pode ou não ser visível. Nos casos em que esta não é visível, utilizam-se substâncias especiais no revestimento interno do tubo de descarga que convertem esta radiação em luz visível.

Após a partida, a lâmpada de descarga apresenta uma impedância dinâmica (derivada da tensão em relação à corrente) negativa, ou seja, à medida que a corrente circula pela lâmpada tem seu valor aumentado, a tensão em seus eletrodos diminui [35]. Portanto, toda lâmpada de descarga necessita de um elemento externo que possua impedância positiva para estabilizar a corrente no ponto de operação nominal da lâmpada. Este elemento é conhecido como reator.

As lâmpadas de descarga não são normalmente alimentadas em corrente contínua (CC) para evitar a cataforese. Este efeito é caracterizado pela concentração de partículas carregadas do plasma nas vizinhanças do catodo, causando maior desgaste de um dos terminais da lâmpada, reduzindo sua vida útil [33]. A cataforese causa o enegrecimento das extremidades do tubo de descarga.

Desta forma, as lâmpadas de descarga são geralmente alimentadas com tensão alternada (CA) na frequência da rede de alimentação utilizando-se de reatores indutivos, conhecidos como reatores eletromagnéticos. Reatores eletrônicos que alimentam as lâmpadas em frequências elevadas também são utilizados, principalmente em lâmpadas fluorescentes. Estes reatores trazem alguns benefícios aos usuários, como será discutido mais adiante neste trabalho, entretanto, seu custo é, normalmente, mais elevado [10] e [30]. No caso das lâmpadas de descarga em alta pressão, o uso de reatores eletrônicos pode propiciar o aparecimento do fenômeno da ressonância acústica, que será abordado com mais detalhes no próximo capítulo.

Toda lâmpada de descarga tem seu funcionamento afetado pela temperatura ambiente. Seu funcionamento em temperaturas inferiores a 0°C é considerado inadequado

e temperaturas excessivamente altas podem provocar falhas ou funcionamento insatisfatório com alterações na cor da luz emitida. A operação nestas condições pode diminuir a vida útil da lâmpada [30] e [31].

De maneira geral, as lâmpadas de descarga não apresentam um comportamento linear para toda a faixa de frequências e toda faixa de temperaturas de operação. Seu comportamento com alimentação em baixa frequência apresenta dependência fortemente não linear entre a tensão e a corrente. No entanto, operando em altas frequências (acima de alguns quilohertz), elas comportam-se praticamente como uma resistência pura, porém o valor desta resistência varia de acordo com a potência entregue [34]. A Figura 2.1 mostra os oscilogramas da tensão e da corrente de uma lâmpada de vapor de sódio em alta pressão (VIALOX NAV-E 70W da OSRAM) acionada em baixa e alta frequência.

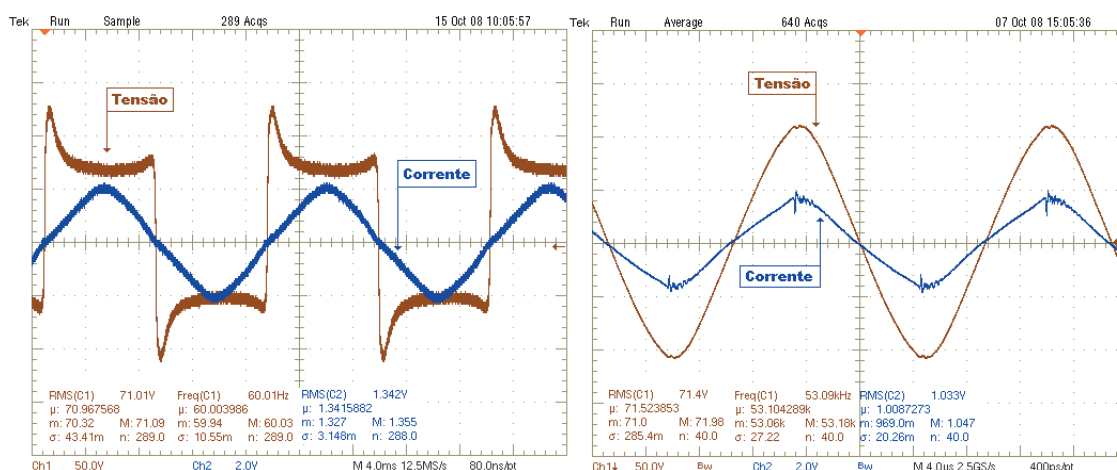


Figura 2.1 – À esquerda, tensão e corrente em baixa frequência (60Hz). À direita, tensão e corrente em alta frequência (53kHz).

Na operação em baixa frequência, pode ser observada a existência de picos de tensão sobre a lâmpada. Isto acontece porque a lâmpada não permanece constantemente ionizada, isto é, a tensão de alimentação passa devagar o bastante por zero para que algumas porções do vapor se resfriem. Assim, os picos de tensão aparecem para que ocorra a re-ignição destas massas de vapor. Após um processo cíclico de ignição a tensão terminal se estabiliza em um nível típico que depende da potência da lâmpada. A corrente, por outro lado, é praticamente senoidal, mostrando a não linearidade desta lâmpada quando operam em baixa frequência.

Já para operação em altas frequências, diz-se que a lâmpada permanece sob ionização constante. A frequência que garante este tipo de operação está intimamente ligada à pressão

interna e ao o raio do tubo de descarga [34] - [38].

## 2.3 Pressão da descarga

De acordo com a pressão interna do tubo durante sua operação, as lâmpadas de descarga são classificadas como lâmpadas de descarga em baixa pressão ou lâmpadas de descarga em alta pressão.

As lâmpadas de descarga em baixa pressão possuem tubos de descarga com dimensões bem maiores do que aqueles tubos utilizados nas lâmpadas de descarga em alta pressão. Isto ocorre porque a baixa pressão no interior do tubo faz com que a densidade de corrente também seja menor. Portanto, tubos maiores são necessários para maior irradiação do fluxo luminoso.

A descarga em alta pressão permite que os átomos se excitam em níveis superiores, propiciando melhor qualidade da cor emitida. Devido à alta pressão, a temperatura do arco de descarga é muito elevada (se comparada com a temperatura atingida nas descargas em baixa pressão), o que reduz o rendimento da lâmpada, uma vez que parte da potência entregue é irradiada na forma de calor. Esta alta temperatura exige que seja empregada uma ampola externa ao tubo para que a temperatura seja mantida e também para prover proteção ao tubo de descarga [35].

Para que uma lâmpada HID opere em regime permanente, ela deve passar antes pelos estágios de ignição e aquecimento. Os níveis de tensão para a ignição e o tempo de aquecimento variam de acordo com o tipo de lâmpada e com sua potência. Durante o processo de aquecimento, observa-se que a tensão, a potência e o fluxo luminoso da lâmpada vão crescendo em direção aos seus valores nominais. A corrente que é muito alta no momento da ignição vai decrescendo até atingir seu valor nominal quando a lâmpada entra em regime permanente [30].

## 2.4 Lâmpadas de descarga em baixa pressão

Existem basicamente dois tipos de lâmpadas de descarga em baixa pressão: as lâmpadas de descarga em baixa pressão de vapor de sódio e as lâmpadas de descarga em baixa pressão de vapor de mercúrio, estas últimas conhecidas como lâmpadas fluorescentes e que são comercializadas na forma tubular ou compacta. Estas não serão apresentadas aqui por fugirem ao escopo do trabalho.

## 2.5 Lâmpadas de descarga em alta pressão

As lâmpadas de descarga em alta pressão, também conhecidas como lâmpadas HID utilizam vapores metálicos (em geral mercúrio e/ou sódio) a pressões da ordem de 1 a 10 atm e operam com uma densidade de potência de arco de 20 a 200 W/cm [30].

Existem, atualmente, três tipos básicos de lâmpadas de descarga em alta pressão:

- Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão (VSAP);
- Lâmpadas de Vapor de Mercúrio em Alta Pressão (VMAP);
- Lâmpadas de Multivapores Metálicos em Alta Pressão (MVMAP).

A dimerização de lâmpadas HID de uma forma geral, pode provocar a redução da vida útil e da eficiência luminosa, além de alterações no TCC. Estes efeitos nocivos dependem de fatores, como o tempo em operação dimerizada e o nível de dimerização, pó que torna difícil a quantificação dos malefícios. Os fabricante de lâmpadas HID recomendam que estas lâmpadas operem cerca de 15 minutos com potência nominal antes de se reduzir a potência e que os nível máximo de dimerização seja de 50% [39].

### 2.5.1 Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão

O sódio quando submetido a altas temperaturas e pressões torna-se uma substância muito agressiva, portanto o tubo de descarga de uma lâmpada deste tipo precisa ser confeccionado com material especial. Por este motivo, só foi possível a produção de

lâmpadas VSAP após o desenvolvimento do alumínio poli cristalino ( $Al_2SO_3$ ), conhecido como alumina, que é uma espécie de cerâmica translúcida. Este material pode suportar os ataques do sódio em altas temperaturas e pressões, sendo utilizado na confecção do tubo de descarga destas lâmpadas. Além disso, a alumina possui outras características interessantes para a fabricação destes tubos de descarga, como o alto ponto de fusão ( $2050^{\circ}C$ ) e a sua grande dureza, o que confere ótima resistência a choques mecânicos [23] e [30].

A Figura 2.2 mostra o esquema de uma lâmpada VSAP de 400W com suas partes principais.

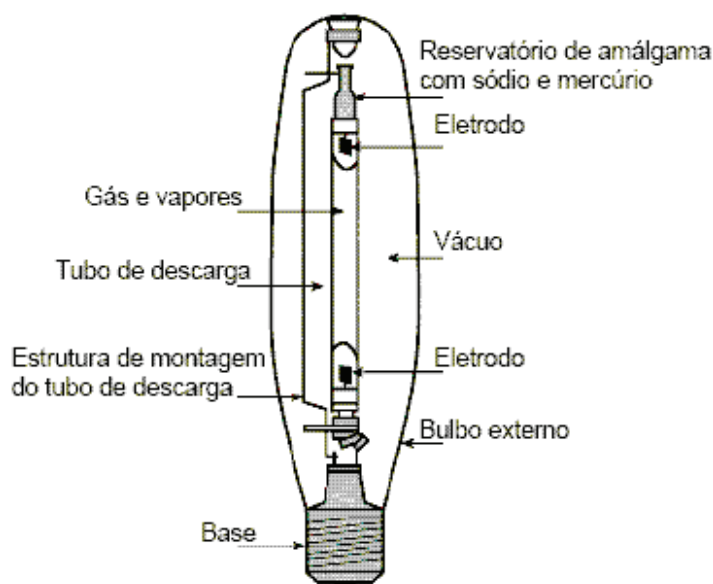


Figura 2.2 – Estrutura mecânica da lâmpada VSAP [33].

No tubo de descarga, que é selado com nióbio, encontram-se os eletrodos, revestidos também com nióbio. Estes eletrodos fazem a interface entre a descarga e o circuito elétrico. O bulbo externo, no qual é gerado vácuo, pode ter formatos diferenciados (ovóide ou tubular) e é construído com um vidro duro (boro silicato). Ele tem a função de proteger as partes metálicas contra oxidação e também de promover proteção térmica ao tubo de descarga, evitando que o plasma sofra variações bruscas de temperatura [31] e [32].

A luz é produzida através de uma descarga elétrica no vapor de sódio que se encontra confinado em alta pressão. Os elétrons recebem energia do campo elétrico

existente entre os eletrodos. Assim os átomos de sódio são excitados e passam então a emitir luz.

Para que esta descarga se estabeleça em uma lâmpada VSAP, é necessário um pulso de alta tensão com duração de poucos micro segundos, chamado de pulso de ignição. Este pulso de curta duração é suficiente para causar a ionização do gás. Normalmente são utilizados ignitores dedicados a gerar estes pulsos, que, tipicamente, variam entre 1,5 kV e 5,0 kV dependendo da potência da lâmpada. Estes valores são observados quando a lâmpada está fria. No caso de partida com a lâmpada quente, ou seja, logo após seu desligamento, são necessários pulsos de cerca de 20 kV, por isso deve-se observar um tempo mínimo de 1 minuto para seu reacendimento. Depois de estabelecido o arco elétrico no interior do tubo de descarga, a lâmpada necessita de cerca de 15 minutos para atingir o seu brilho máximo. Enquanto isso não ocorre, a luz emitida apresenta variações de cor [10], [23], [30] - [33].

Já são fabricadas lâmpadas VSAP que não precisam de ignitor para sua partida, isto é possível através de diferenciações de pressão e composição do gás. Existem também, lâmpadas VSAP especiais que possuem dois tubos de descarga em seu interior, entretanto apenas um deles funciona de cada vez. Isso faz com que em casos de faltam momentânea de energia, a iluminação se re-estabeleça o mais rápido possível [30], [31] e [33].

Não existem restrições quanto à posição (horizontal, vertical ou inclinada) de funcionamento das lâmpadas VSAP. Isto porque estas lâmpadas têm tubos de descarga com diâmetros pequenos, o que permite uma pequena curvatura do arco, garantindo mudanças desprezíveis no seu comportamento elétrico [33].

A energia luminosa irradiada pelas lâmpadas VSAP cobre grande parte do espectro visível, ao contrário das lâmpadas de vapor de sódio em baixa pressão, que emitem a maioria da sua radiação (cerca de 85%) na faixa conhecida como linha D do sódio, que possui comprimento de onda de aproximadamente 589nm, fazendo com que a luz produzida seja praticamente monocromática (amarela). A emissão das VSAP na linha D é de aproximadamente 40% [30].

Além do sódio, dentro do tubo de descarga encontram-se também mercúrio e xenônio, que auxiliam na partida e reduzem perdas por calor, elevando a tensão de arco da lâmpada [35].

As lâmpadas VSAP possuem excelente fator de manutenção do fluxo luminoso.



Sua vida útil é limitada por um lento aumento na sua tensão de operação [33].

A dimerização de lâmpadas VSAP apresenta características diferentes das demais lâmpadas HID. Enquanto as lâmpadas VMAP e MVMAP apresentam tensão praticamente constantes com a variação da potência, pode-se observar variações na tensão das lâmpadas VSAP com a variação da potência. Devido a esta característica, a resistência equivalente destas lâmpadas permanece praticamente constante quando a potência entregue varia [31] - [33]. A Figura 2.3 mostra o comportamento típico da variação da resistência equivalente com a potência para uma lâmpada VSAP de 70W. Observa-se que a resistência equivalente da lâmpada permanece praticamente constante para uma boa faixa de variação da potência.

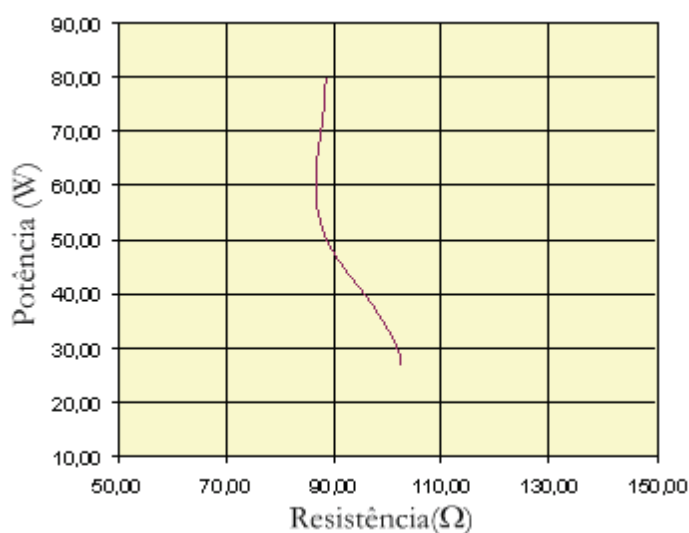


Figura 2.3 – Característica de variação da resistência equivalente com a potência típica de uma lâmpada VSAP de 70W alimentada em alta frequência.

As lâmpadas VSAP sofrem alterações em suas características elétricas ao longo da sua vida útil. Isto ocorre devido ao envelhecimento da lâmpada (desgaste dos eletrodos, aumento da pressão do gás xenon entre outros efeitos). Por isso, a norma NBR IEC 662:1997 delimita uma área de tolerância em torno do ponto de operação para as lâmpadas VSAP alimentadas por reatores eletromagnéticos. Estes limites de operação são delimitados por um diagrama quadrilateral. A Figura 2.4 mostra um diagrama quadrilateral de uma lâmpada VSAP de 400W. É importante salientar que lâmpadas de potências distintas ou com diferentes geometrias do bulbo (tubular ou ovóide) têm diagramas quadrilaterais também diferentes. A curva que aparece na Figura 2.4 representa a característica de tensão

contra potência para um reator eletromagnético típico [23].

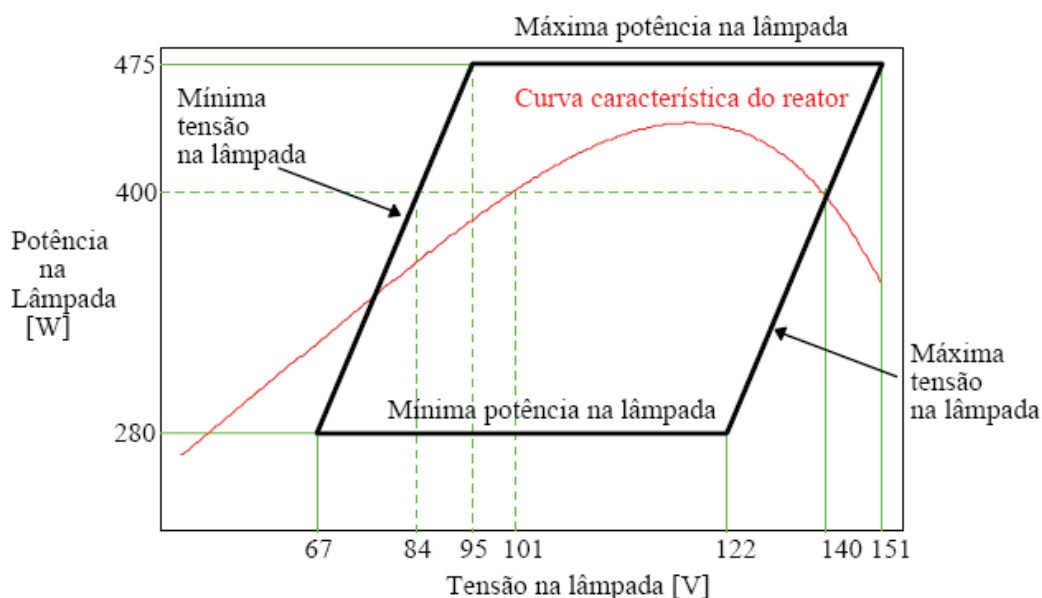


Figura 2.4 – Paralelogramo de potência de uma lâmpada VSAP de 400W [34].

Os limites inferior e superior do trapézio de potência definem a máxima potência de operação que não acarreta em diminuição da vida útil da lâmpada e a potência mínima que garante um tempo de aquecimento satisfatório, respectivamente.

A menor tensão permitida varia de acordo com a potência dissipada pela lâmpada e é definida pelo limite esquerdo. O limite direito informa o máximo valor de tensão permitido. Uma vez que a tensão de regime das lâmpadas VSAP aumenta com o seu envelhecimento, o ponto de intersecção entre a linha do limite direito do trapézio e a curva do reator define a condição de operação da lâmpada no final da sua vida útil [32].

Suas características de alta eficiência e longa vida útil garantem às lâmpadas VSAP ótima aceitação comercial, sendo amplamente utilizadas em aplicações de iluminação exterior em que a definição das cores não é um fator primordial.

A seguir, são apresentadas algumas características destas lâmpadas que variam de acordo com os modelos e com a potência [10], [15], [19], [21], [23], [30], [31], [33] - [35]:

- Eficiência luminosa: 83 a 150 lm/W;
- Vida útil: 16000 a 24000 horas;
- Índice de reprodução de cores: 20% a 60%.
- Temperatura de cor correlata 1900K a 2200K.

## 2.5.2 Lâmpadas de Vapor de Mercúrio em Alta Pressão

Uma lâmpada de vapor de mercúrio em alta pressão é apresentada na Figura 2.5.

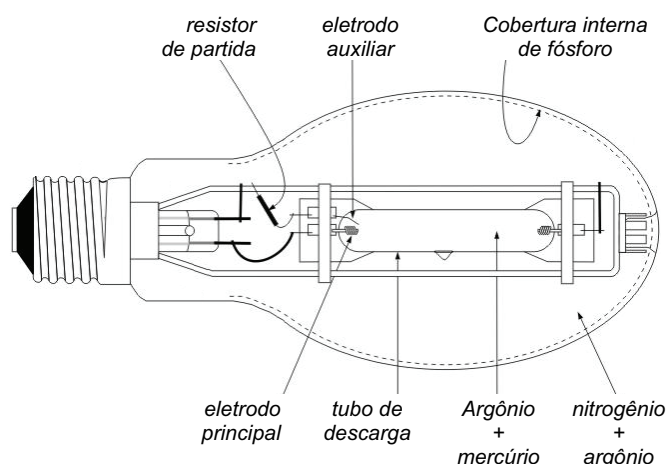


Figura 2.5 – Lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão [40].

Conforme apresentado na Figura 2.5, no interior do bulbo existe um tubo de descarga de quartzo onde se encontra o vapor de mercúrio em alta pressão, tendo em cada uma das extremidades do tubo um eletrodo principal de tungstênio coberto com óxido de bário (um material que emite elétrons). Junto a um destes eletrodos existe um eletrodo auxiliar (também chamado de eletrodo de partida) que é ligado em série com um resistor de partida que fica do lado de fora do tubo de descarga. Geralmente, este resistor tem valor entre  $10\text{k}\Omega$  e  $30\text{k}\Omega$  [10] e [30].

A função do eletrodo auxiliar é prover a ignição da lâmpada de vapor de mercúrio a partir de valores de tensão relativamente baixos (127V a 220V), na faixa de tensão típica oferecida pelas concessionárias de energia. Ao acender a lâmpada, a tensão aparece nos eletrodos principais, mas devido à grande distância entre eles, a descarga não ocorre imediatamente. Porém, a mesma tensão aparece no espaço relativamente pequeno entre o eletrodo auxiliar e o eletrodo principal adjacente, resultando numa descarga localizada inicial, limitada pela resistência de partida conectada em série. A descarga local se expande e, finalmente, a descarga entre os eletrodos principais é estabelecida. Assim, ao contrário das lâmpadas de sódio de alta pressão e lâmpadas de vapores metálicos, a lâmpada VMAP não necessita de um circuito ignitor externo. Este período de ignição dura apenas alguns poucos segundos [30].

A tensão de ignição é muito afetada pela temperatura ambiente, uma vez que os diversos gases existentes no tubo de descarga apresentam diferentes variações da pressão com a temperatura. A Figura 2.6 mostra a variação da tensão de ignição com a temperatura para uma lâmpada VMAP. Observa-se um aumento da tensão de ignição com a diminuição da temperatura ambiente.

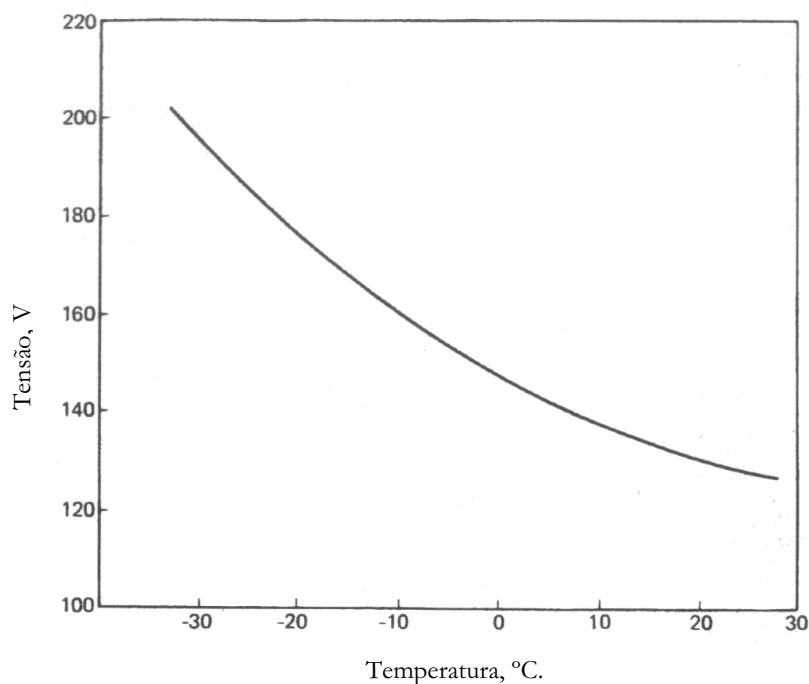


Figura 2.6 - Variação típica da tensão de ignição com a temperatura de uma lâmpada VMAP [30].

Além do vapor de mercúrio, no interior do tubo de descarga também é encontrado um gás inerte, (argônio) que facilita a formação da descarga inicial.

Com o aquecimento do meio interno e crescimento da pressão dos vapores, o fluxo luminoso produzido vai crescendo, e cerca de 4 minutos depois a lâmpada atinge seu brilho máximo, quando emite uma luz branca azulada [15].

Durante o processo de partida e aquecimento a cor da luz vai sofrendo alteração, passando de vermelho - róseo durante a ignição, até atingir a cor branca azulada quando em regime.

Devido à alta pressão de operação, a re-ignição imediata de uma lâmpada VMAP é impossível; ou seja, uma demora de 3 ou 4 minutos é necessária para permitir a pressão do vapor de mercúrio voltar a um determinado valor cuja tensão da fonte de alimentação seja capaz de restabelecer o arco elétrico da lâmpada.

O bulbo de vidro transparente tem formato ovóide e contém nitrogênio, formando uma atmosfera protetora que reduz a oxidação das partes metálicas, melhora as características de isolamento térmica e limita a intensidade da radiação UV que atinge a camada de “fósforo” que é utilizado para revestir a camada interna de revestimento do bulbo [30]. Esta camada de “fósforo” tem a função de melhorar o IRC da lâmpada. Estas lâmpadas emitem uma luz azulada e pobre nas radiações vermelhas, esta camada converte as radiações UV em luz vermelha, que melhora a composição espectral do fluxo luminoso final produzido [10].

A dimerização de lâmpadas VMAP apresenta características semelhantes à das lâmpadas de multivapores metálicos. Observa-se, como citado anteriormente, que a tensão sobre a lâmpada permanece praticamente constante com a variação da potência. Com isso, percebe-se uma variação da resistência equivalente da lâmpada com a variação da potência [31] - [33], conforme apresentado na Figura 2.7, que mostra a característica típica de uma lâmpada VMAP de 125W.

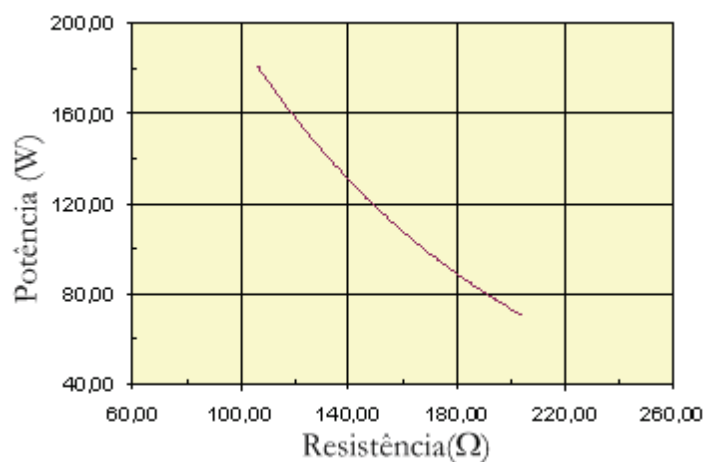


Figura 2.7 – Característica de variação da resistência equivalente com a potência típica de uma lâmpada VMAP de 125W alimentada em alta frequência.

Algumas características destas lâmpadas são descritas a seguir [10], [15], [19], [21], [23], [30], [31], [33] - [35]:

- Eficiência luminosa: 44 a 55 lm/W;
- Vida útil: 9000 a 20000 horas;
- IRC: 16% a 52%;
- TCC: 3600K a 6000K;

Vale ressaltar que estas características apresentam valores bastante variáveis já que estão atreladas a diferentes modelos e potências.

O fluxo luminoso destas lâmpadas é muito depreciado com o tempo de utilização, chegando a uma depreciação de cerca de 20% com 2000 horas de operação [30].

Existem lâmpadas VMAP que possuem um reator interno ao bulbo. Estas, portanto podem operar sem a necessidade de nenhum componente externo (já que as VMAP não utilizam ignitores). O grande problema deste tipo de lâmpada é que a sua eficácia luminosa fica muito abaixo daquelas que utilizam reator externo [30].

### 2.5.3 Lâmpadas de Multivapores Metálicos em Alta Pressão

São lâmpadas semelhantes às de vapor de mercúrio, nas quais se introduzem, além do argônio e mercúrio, outros elementos, de forma que o arco elétrico se realize numa atmosfera mista de vários gases e vapores. Desta forma consegue-se melhor eficiência, entre 70 lm/W e 110 lm/W, dependendo da potência da lâmpada, e também melhor composição espectral da luz emitida, que é extremamente branca, atingindo temperaturas de cor entre 3600 K e 5600 K. A principal característica das lâmpadas MVMAP é o seu ótimo IRC que pode variar de 70% a 95% [30] - [35].

As lâmpadas MVMAP necessitam de reator e ignitor como elementos auxiliares. Alguns modelos de baixa potência possuem o ignitor interno ao bulbo. Seu tempo de acendimento dura cerca de 3 minutos e o de reacendimento pode variar de 5 a 8 minutos.

Os vapores metálicos utilizados no interior do tubo de descarga variam bastante de fabricante para fabricante, já que suas características ainda não foram normalizadas internacionalmente. Existem, basicamente, três tipos de tecnologia utilizadas na fabricação que conferem diferentes valores para eficiência, TCC e IRC, sendo estas:

- Tecnologia das três cores, que utiliza vapores de índio, sódio e tálio;
- Tecnologia de sódio e escândio com presença de índio e tálio;
- Tecnologia das terras raras, que utiliza tálio disprósio e hólmio.

A Figura 2.8 mostra uma representação simplificada de uma lâmpada de multivapores metálicos.

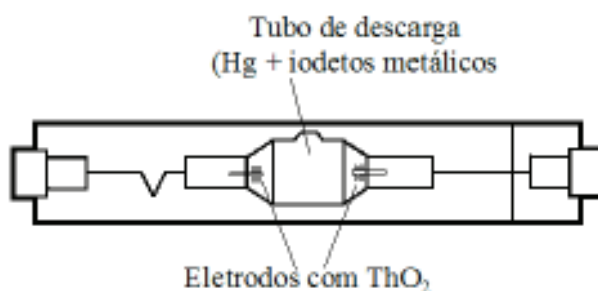


Figura 2.8 – Lâmpada de multivapores metálicos.

Devido às suas ótimas propriedades de cor, as melhores dentre as HID, estas lâmpadas são produzidas em diversos formatos, com ou sem bulbo externo e numa vasta gama de potências, que vão, tipicamente, desde 35W até 18000W. Por isso o tubo de descarga pode também variar de alguns poucos milímetros até dezenas de centímetros [30].

Uma característica contraditória das lâmpadas MVMAP é que elas apresentam pouca uniformidade com relação à temperatura de cor. Isto significa que a temperatura de cor de lâmpadas de mesma especificação pode variar. Além disso, a cor destas lâmpadas sofre também com problemas de estabilidade ao longo de sua vida útil [30].

Dentre as lâmpadas HID, estas são as que mais sofrem com o fenômeno da ressonância acústica, que acontece quando as lâmpadas são alimentadas com tensão em alta frequência.

Estas lâmpadas apresentam vida útil bem longa, chegando até 24000 horas. Porém, assim como as lâmpadas VMAP sofrem grande depreciação de luminosidade com o passar do tempo. A Figura 2.9, retirada de [3], mostra um gráfico da manutenção do fluxo luminoso com a utilização para lâmpadas HID. Observa-se que as lâmpadas VSAP se destacam, pois mesmo no final da sua vida útil apresentam maior fluxo luminoso do que as demais lâmpadas quando novas.

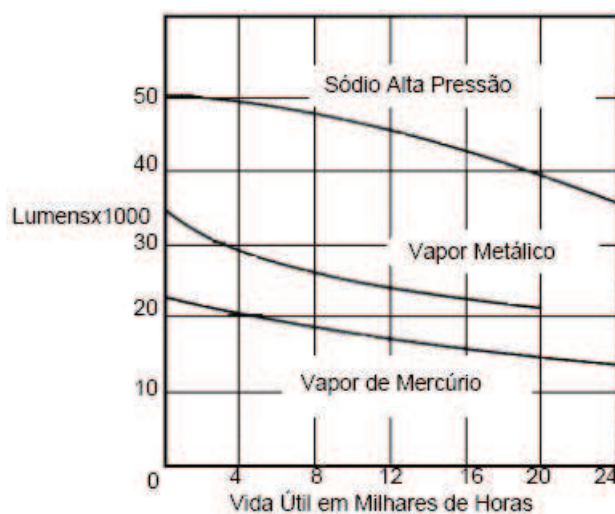


Figura 2.9 – Curva típica de manutenção de luminosidade de lâmpadas de descarga em alta pressão de 400W [3].

## 2.6 Conclusões Parciais

Neste capítulo foi descrito o funcionamento das lâmpadas de descarga com maiores detalhes do funcionamento das lâmpadas HID em geral. Foram destacadas particularidades das lâmpadas VSAP, VMAP e MVMAP.

Para os casos das lâmpadas VSAP e VMAP, foram apresentados resultados obtidos em laboratório que mostram o comportamento da resistência equivalente destas lâmpadas com a variação da potência dissipada. Observa-se que as lâmpadas VSAP apresentam resistência equivalente praticamente constante em quase toda a faixa de dimerização, devido à variação da tensão de arco durante a variação da potência. No caso das VMAP, a resistência equivalente varia de forma proporcional ao inverso da potência, como reflexo da manutenção de uma tensão de arco praticamente constante para grande faixa de potências.

Antes porém, apresentou-se uma pequena revisão acerca de conceitos básicos de luminotécnica. Discutiu-se ainda a importância da energia sob a forma de luz para a vida dos cidadãos no mundo de hoje e sua relevância no desenvolvimento da sociedade.



# Capítulo 3

## Ressonância Acústica

### 3.1 Introdução

Hoje em dia, no mundo inteiro, a grande maioria dos pontos de iluminação que utilizam lâmpadas HID (vapor de sódio em alta pressão, vapor de mercúrio em alta pressão e multivapores metálicos) utilizam reatores eletromagnéticos [23] e [35]. Estes equipamentos são muito difundidos por serem baratos, robustos, recicláveis e altamente confiáveis. Entretanto, apresentam elevado peso e volume, baixa eficiência, ruído audível, efeito estroboscópico, baixo fator de potência, sensibilidade a variações de tensão da rede elétrica de alimentação, não possibilitam o controle da potência entregue à lâmpada e necessitam de ignitores externos para acionarem a maioria das lâmpadas [23] e [33]. Estes reatores trabalham na frequência da rede de alimentação (50Hz ou 60Hz).

Por outro lado, os reatores eletrônicos para lâmpadas HID, que operam normalmente em altas frequências (acima dos 20kHz), contam com a vantagem da compactação, menor peso, ausência de flicker e efeito estroboscópico, possibilidade de incorporar ignição e controles diversos à iluminação, maior eficiência e, adicionalmente, podem estender a vida útil das lâmpadas e promover melhor estabilidade luminosa ao longo da vida útil do bulbo [28], [30] e [35].

Apesar de todas estas vantagens, existem poucos reatores eletrônicos para lâmpadas HID no mercado. Um dos fatores mais importantes para isso é a ocorrência do fenômeno da ressonância acústica, que afeta todos os tipos de lâmpadas HID quando alimentadas com frequências acima de alguns poucos kilohertz [23], [28], [31], [33], [35], [40] - [44]. Pode-se dizer que o grande desafio dos tempos atuais para os projetistas de reatores eletrônicos para lâmpadas HID é evitar a ocorrência deste fenômeno.

## 3.2 Descrição do Fenômeno da Ressonância Acústica

A ressonância acústica é uma instabilidade no arco de descarga, que ocasiona flutuações de baixa frequência (0 a 20 Hz), podendo produzir cintilação luminosa, mudança de cor, desgaste dos eletrodos, extinção do arco de descarga, ou em casos extremos, a explosão do tubo de descarga [23], [28], [31], [33], [35], [40] - [46]. A Figura 3.1 mostra uma forma de manifestação da ressonância acústica. À esquerda é apresentada uma descarga estável, onde não há a ocorrência de ressonância acústica e à direita uma descarga instável, ou seja, onde ocorre a ressonância acústica.

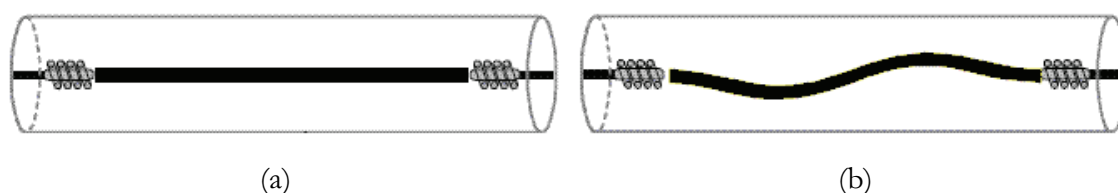


Figura 3.1 – Comportamento do arco de descarga. (a) Arco estável. (b) Arco instável [35].

Esta instabilidade ocorre devido à oscilação da potência entregue à lâmpada (que acontece em uma frequência igual a duas vezes a frequência de chaveamento do circuito inversor), que gera flutuações na temperatura e na pressão do gás no interior do tubo. Com isto, surgem ondas de pressão que se deslocam ao longo do tubo e refletem em suas paredes. Se a frequência destas oscilações de pressão (que é a mesma frequência da oscilação da potência entregue à lâmpada) for igual ou muito próxima à frequência de ressonância própria do tubo de descarga surgem ondas estacionárias de pressão de grande

amplitude. Estas, superpostas à pressão média do gás, provocam a oscilação do arco de descarga [23], [43],[44], [46] e [47].

A ressonância acústica pode se manifestar de forma visível através de anomalias no comportamento do arco de descarga como oscilações, distorções nas extremidades, deslocamento em direção à parede do tubo de descarga e até instabilidades que provocam flutuação do fluxo luminoso emitido [34] e [35]. Este comportamento anômalo do arco de descarga sempre vem acompanhado de variações na tensão e na corrente da lâmpada. Em muitos casos, observa-se a variação dos parâmetros elétricos da lâmpada sem se observar distorções ou variações no comportamento do arco elétrico, neste caso, pode-se dizer que a ressonância acústica não é visível, mas acontece.

A taxa de choques entre íons acelerados no interior do tubo de descarga com átomos neutros causa flutuações na pressão que propiciam o aparecimento deste fenômeno. A distância entre os eletrodos de uma lâmpada é proporcional à sua potência. Assim, lâmpadas de maior potência têm tubos de descarga maior, e por isso, menor densidade atômica e campo elétrico. Isto faz com que a taxa de choques entre íons e átomos neutros seja reduzida com o aumento da potência. Assume-se então, que o risco de excitação da ressonância acústica é menor quanto maior for a potência nominal da lâmpada [35].

As lâmpadas de multivapores metálicos de baixa potência são as mais susceptíveis à ocorrência de ressonância acústica dentre as lâmpadas HID. Isto ocorre pois elas possuem tubos de descarga esféricos ou cilíndricos de pequeno tamanho [35] e [44]. Para estes tipos de lâmpada, a ressonância acústica pode ocorrer em todo o espectro de operação em alta frequência normalmente utilizado [48].

### 3.3 Modos

Em tubos de descarga cilíndricos, que são os mais utilizados na confecção de lâmpadas HID, a ressonância acústica pode ocorrer em diferentes modos, como mostra a Figura 3.2, ou ainda como uma combinação destes. Estes modos estão relacionados com a forma de oscilação do arco de descarga dentro do tubo podendo ser azimutal, radial ou longitudinal [35], [44] e [47]. Cada modo apresenta ressonância de diversas ordens que

ocupam diferentes faixas de frequência, sendo as ressonâncias de primeira ordem consideradas mais críticas.

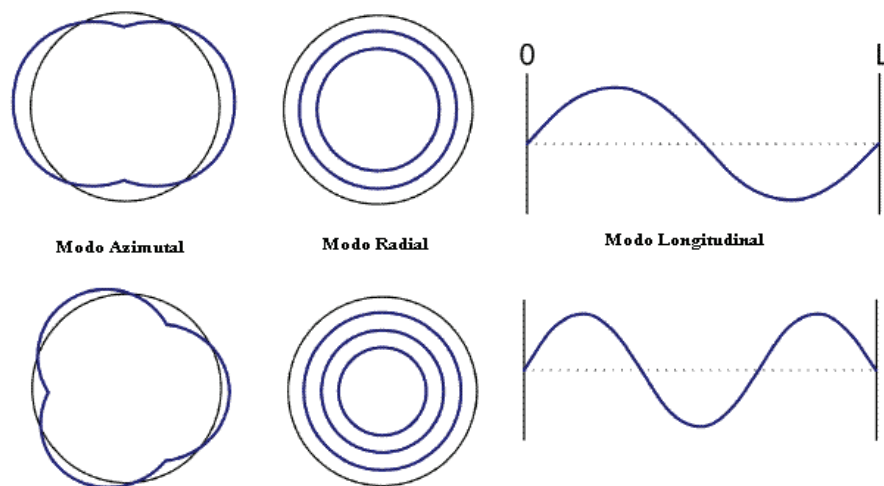


Figura 3.2 – Modos de oscilação do arco em um tubo cilíndrico [44].

Considerando uma faixa de frequências de alimentação de lâmpadas HID entre 30kHz e 100kHz, lâmpadas com tubo de descarga com comprimento relativamente maior do que seu próprio diâmetro ( $L > 4D$ ) apresentam ressonâncias acústicas azimutais e radiais como predominantes. As ressonâncias de modo axial, nestes casos, dependem mais do formato dos extremos do tubo, conforme estudo apresentado em [35].

O número de modos de ressonância para lâmpadas com diferentes gases de preenchimento, porém com mesma geometria, aumenta com a pressão interna do gás.

Cada um dos modos de ocorrência da ressonância acústica tem uma forma de influência sobre os efeitos de convecção dentro do tubo de descarga, sobretudo nas vizinhanças dos eletrodos. Este comportamento pode ser utilizado para a distinção dos modos.

### 3.4 Cálculo de Frequências Críticas

A frequência de ressonância própria do tubo de descarga depende das características geométricas do tubo (comprimento e raio), da composição do gás de preenchimento, da curva de temperatura da lâmpada, além de outros parâmetros que

determinam a velocidade do som no interior do tubo [44]. Muitas destas informações só são conhecidas pelos fabricantes das lâmpadas. Como não existe uma padronização dos fabricantes quanto à construção das lâmpadas, as dimensões do tubo e a composição e pressão do gás de preenchimento variam, de forma que as frequências de ressonância própria dos tubos de descarga podem diferir para lâmpadas produzidas por diferentes fabricantes [43]. Além disso, deve-se ter sempre em mente que lâmpadas de potências diferentes apresentam tubo de descarga com comprimentos distintos, o que faz com que as frequências de ressonância própria não sejam as mesmas.

Baseando-se nas informações citadas anteriormente, pode-se inferir que o fenômeno da ressonância acústica deve se manifestar em determinados valores de frequência (ou em faixas de frequência) dentro de todo o espectro.

Estas frequências críticas podem ser calculadas utilizando-se a teoria da mecânica dos fluidos, através da solução numérica da equação de onda das oscilações de pressão do gás no interior do tubo. Não é objetivo deste trabalho realizar estes cálculos, mas sim mostrar que estas frequências críticas podem ser calculadas. Maiores detalhes sobre este tópico podem ser encontrados em [35], [44] e [48]. A equação (3.1), retirada destas referências, leva às frequências onde teoricamente a ressonância acústica pode ocorrer.

$$f_{m,n,n_z} = \frac{C}{s} \sqrt{\left(\frac{n_z}{L}\right)^2 + \left(\frac{\phi_{mn}}{R}\right)^2} \quad (3.1)$$

$$\frac{dJ_m(\pi\gamma)}{d\gamma} = 0 \quad (3.2)$$

em que  $m$  é o número de diâmetros nodais,  $n$  é o número de círculos nodais e  $n_z$  é a ordem da ressonância acústica,  $C$  é a velocidade do som no interior do tubo,  $L$  o comprimento do tubo,  $R$  o raio do tubo e  $\phi_{mn}$  é a solução de (3.2) onde  $J_m$  é a função de Bessel de ordem  $m$ .

As frequências  $f_{100}$ ,  $f_{010}$  e  $f_{001}$  são as que apresentam ressonâncias de maior amplitude, e muitas referências chegam a desprezar as demais [35].

É importante notar que com esta equação podem ser determinados os valores de frequência onde teoricamente pode ocorrer a ressonância acústica, não sendo determinadas a energia necessária para a excitação e nem a amplitude da mesma. Segundo [50], para que a

ressonância acústica seja excitada a potência da lâmpada deve variar no mínimo entre 5% e 10% de sua potência nominal.

Conforme frisado em [44], o cálculo das frequências críticas nos dá uma idéia geral sobre as faixas onde a ressonância acústica pode ocorrer. Entretanto, trata-se de uma análise aproximada que necessita de verificação experimental.

### 3.5 Métodos de Detecção da Ocorrência de Ressonância Acústica

A detecção da ocorrência do fenômeno da ressonância acústica mostra-se como uma ferramenta muito importante para o projeto de reatores eletrônicos para lâmpadas HID. Os métodos de detecção baseiam-se no monitoramento de grandezas físicas ou elétricas das lâmpadas.

Admitindo esta divisão, serão apresentadas a seguir algumas formas de detecção encontradas na literatura.

#### *a) Métodos físicos de detecção*

Os métodos de detecção da ressonância acústica através da observação de parâmetros físicos da lâmpada podem basear-se na medida da temperatura do arco de descarga, das oscilações da luz e do arco de descarga ou ainda na medida do som emitido pelo arco durante a ocorrência da instabilidade.

Métodos de detecção que se baseiam no som emitido pela lâmpada necessitam de uma câmara acústica para que o som exterior não interfira na medição. Assim, este método de detecção parece ser útil apenas para medições em laboratório especializado, já que a necessidade de uma câmara acústica torna o projeto de um reator comercial inviável [51]. Já os métodos de detecção da temperatura do arco são em sua maioria indiretos e empregam medições de grandezas elétricas das lâmpadas.

Destas três variantes, a medição óptica é a mais amplamente utilizada e documentada na literatura, isto se deve ao fato de que este método é menos susceptível a interferências e também por relacionar a amplitude da oscilação do arco com a amplitude

da ressonância acústica [44].

O método de medição óptica é utilizado de muitas formas, desde a detecção visual, que limita o número de pontos de frequência que podem ser observados, passando pela filmagem ou fotografia do arco de descarga, até métodos que utilizam fotodiodos que podem detectar variações no fluxo luminoso ou a distorção do arco.

Em [52] é apresentado um aparato automático, controlado por computador, que utiliza lentes e fotodiodos para a detecção da ressonância acústica. Este equipamento faz a varredura das frequências de operação, dentro de limites pré-ajustados, mantendo a potência nominal da lâmpada. Quando a ressonância acústica é detectada, a potência da lâmpada é reduzida para se verificar a possibilidade de extinção do fenômeno. Verifica-se que em alguns casos a ressonância acústica não se manifesta em potências de operação inferiores à nominal. Este resultado é muito interessante para este trabalho, já que se pretende operar as lâmpadas de forma dimerizada.

De uma forma geral, pode-se dizer que os métodos ópticos de detecção são muito bons para serem utilizados em laboratório, porém pouco práticos para serem utilizados em um reator comercial, já que a montagem do aparato óptico para a detecção da ressonância acústica faz com que o reator tenha suas dimensões bastante aumentadas.

### ***b) Métodos de detecção por parâmetros elétricos***

Estes métodos baseiam-se na medição da tensão, corrente, resistência ou potência da lâmpada, uma vez que estas sofrem alterações quando a ressonância acústica se manifesta [44].

De acordo com a teoria dos arcos de descarga, quando o plasma atinge o equilíbrio termodinâmico, a descarga se concentra no eixo do tubo de forma que a área interna do tubo ao redor do arco permanece escura. Admite-se que, em condição estável de operação, a parte central da descarga é um condutor uniforme com determinado raio e temperatura que conduz toda corrente e emite toda radiação [45]. Em condição estável, o arco tem perfil retilíneo, preenchendo, portanto o menor caminho entre os eletrodos. Quando a ressonância acústica ocorre, a flutuação na pressão do tubo de descarga leva a uma distribuição não uniforme das moléculas de gás, resultando na distorção do arco. Com o aumento do comprimento do arco observa-se um aumento da tensão da lâmpada, que vem acompanhado de um aumento da resistência equivalente e de uma diminuição da corrente

[48].

Uma das principais características de uma lâmpada HID é sua impedância, que varia desde um valor muito alto, quando a lâmpada está apagada, até um valor muito pequeno, quando em regime. Na presença de instabilidades esta grandeza varia de forma muito acentuada. A medição da impedância da lâmpada é obtida de forma indireta através da medição da tensão e da corrente da mesma.

Os métodos de detecção por parâmetros elétricos são os mais utilizados em detecção em tempo real. Ou seja, em reatores que se propõem a detectar a ocorrência da ressonância acústica e tomar alguma medida para que esta seja eliminada. Isto porque sensores de tensão e de corrente podem ser facilmente adaptados a reatores sem aumentar de forma considerável o tamanho dos equipamentos.

Muitos trabalhos publicados no meio científico afirmam que as faixas do espectro de frequência onde a ressonância acústica ocorre pode variar de acordo com o tempo de utilização da lâmpada [23] e [35]. Entretanto, nenhuma confirmação experimental é apresentada. Trabalhos mais recentes, vêm mostrar que isto não ocorre [44], [46] e [52]. Esta informação pôde ser confirmada neste trabalho através de ensaios com lâmpadas de vapor de mercúrio em alta pressão que serão apresentados mais adiante. O que ocorre na verdade, segundo [46], é que com o envelhecimento da lâmpada observa-se um aumento em sua tensão de regime, o que gera uma diminuição da corrente no arco (já que a potência deve permanecer constante). Com menos corrente para sustentar o arco, este fica mais instável, sobretudo nas zonas de ressonância.

### **3.6 Métodos para Evitar a Excitação da Ressonância Acústica**

Um reator eletrônico para lâmpada HID deve limitar a corrente que percorre a lâmpada, gerar os pulsos de tensão necessários para a sua ignição e ainda evitar a ocorrência do fenômeno da ressonância acústica.

Muitos trabalhos já foram publicados no meio científico visando evitar o aparecimento da ressonância acústica [23], [31], [33], [34], [35], [40] - [44], [45], [46], [48], [53] - [55]. As



diversas formas de se evitar o surgimento do fenômeno baseiam-se em três estratégias [23] e [53]:

**a) Evitar frequências nas quais a ressonância acústica ocorre**

- *Operação com corrente contínua*

Como a ressonância acústica acontece devido à oscilação da potência instantânea entregue à lâmpada, uma solução trivial é evitar esta oscilação através da alimentação da lâmpada com corrente contínua. A menos que a lâmpada seja projetada para trabalhar em corrente contínua, esta solução implica em uma degradação considerável no tempo de vida útil da lâmpada devido ao fenômeno da cataforese que provoca um desgaste desigual dos eletrodos devido à diferença de temperatura de operação dos mesmos [43].

- *Operação em frequências onde o fenômeno não é observado*

É uma solução bastante simples, mas requer o conhecimento das faixas de frequência livres de ressonância. Como discutido anteriormente, as frequências críticas podem variar muito de uma lâmpada para outra, já que dependem de características geométricas do tubo e da pressão, temperatura e composição do gás. Em alguns casos, lâmpadas de mesma potência de diferentes fabricantes apresentam frequências críticas distintas já que não existe uma padronização quanto à construção das lâmpadas. Vale lembrar que as faixas livres de ressonância acústica não variam com o desgaste da lâmpada, como levantado por vários trabalhos publicados no meio científico.

A utilização deste método pode ser inviável para lâmpadas de pequena potência, que possuem tubos de descarga pequenos, como as lâmpadas de multivapores metálicos de baixa potência, nas quais o fenômeno da ressonância acústica está presente em praticamente todo o espectro de frequências. Porém, lâmpadas de potência maior apresentam bandas de frequência crítica mais espaçadas.

Se for observado ainda que a operação dimerizada (com potência abaixo da nominal) pode fazer com que a lâmpada opere em frequências críticas sem excitar o fenômeno da ressonância acústica, este método mostra-se muito interessante, sobretudo para teste de lâmpadas de potências mais elevadas, em que se pretende verificar a funcionalidade da mesma, como é o caso deste trabalho.

- *Operação em frequências muito altas*

Apesar de teoricamente não existir um limite superior de frequência para a ocorrência da ressonância acústica, observa-se que quando a lâmpada é alimentada com frequências muito altas esta não acontece. Na literatura o valor desta frequência limite varia bastante desde 500kHz até 1MHz. A operação em frequências tão altas implica no surgimento de indutâncias e capacitâncias parasitas, além da impedância dos cabos e trilhas de circuito impresso que deixam de ser irrelevantes, o que implica na utilização de técnicas especiais de confecção de circuitos e ainda no aumento das perdas por chaveamento. Apesar de existirem semicondutores projetados para operar estágios de potência na faixa dos gigahertz seus preços são muito maiores do que o dos componentes utilizados em frequências mais baixas, o que acaba inviabilizando projetos comerciais [43].

### **b) Uso de sistema de controle em tempo real**

Trata-se de circuitos inteligentes, normalmente microcontrolados, que trabalham monitorando constantemente parâmetros elétricos da lâmpada. Quando a ressonância acústica é detectada o circuito atua de alguma maneira (mudando o valor da frequência de chaveamento do inversor para um outro valor, por exemplo) de forma a estabilizar a operação.

Esta técnica vem sendo muito estudada e tem se tornado muito interessante, sobretudo com o barateamento dos microcontroladores. Uma limitação deste método é a sua aplicação em lâmpadas de multivapores metálicos de baixa potência, já que estas estão sujeitas a ressonância acústica em grande parte do espectro de frequências.

### **c) Espalhamento da potência pelo espectro de frequências**

- *Operação com onda quadrada de baixa frequência*

Esta estratégia promove o espalhamento do espectro de frequências da potência entregue à lâmpada com uma transição rápida da corrente evitando flutuações da potência. Este método permite a alimentação de lâmpadas de multivapores metálicos de baixa potência, as mais expostas ao fenômeno da ressonância acústica.

Por operar em baixas frequências, os circuitos necessitam de indutores pesados e grandes em diferentes estágios do reator, o que faz com que o tamanho final do

equipamento seja maior do que daqueles que operam em frequências mais altas.

- *Operação com onda quadrada de alta frequência*

Em alta frequência as lâmpadas HID comportam-se como uma resistência, portanto, a alimentação destas com onda quadrada de alta frequência implica em uma forma de onda da potência instantânea praticamente constante, ou seja, a potência instantânea é composta por diversas componentes de diferentes frequências de forma que a ressonância acústica não é excitada [42].

Entretanto, a utilização deste método implica em um alto nível de interferência eletromagnética (EMI), especialmente rádio frequência emitida pela própria descarga [53].

- *Injeção de harmônicos*

Outra maneira de se evitar a ressonância acústica através do espalhamento da potência pelo espectro de frequências é alimentar a lâmpada com onda senoidal de alta frequência que contenha algum conteúdo harmônico, como por exemplo, o terceiro harmônico [53], [55] - [57]. A forma de onda resultante é praticamente quadrada e não provoca os inconvenientes de interferência eletromagnética como a alimentação com onda quadrada de alta frequência.

Mais uma vez, a idéia é que se nenhum dos harmônicos da potência instantânea atingir o valor mínimo para a excitação da ressonância acústica, esta não se manifesta.

- *Modulação da frequência de chaveamento do inversor*

A modulação da frequência de operação do circuito inversor através de um degrau na frequência de chaveamento evita que o arco entre em ressonância. Este método é apresentado em [43]. É importante para isto conhecer as frequências críticas e trabalhar com degrau de frequência de tamanho adequado para que a frequência de chaveamento não saia da janela livre de ressonância.

Um inconveniente deste método é a existência de um ruído audível devido à modulação da frequência de chaveamento em baixa frequência.

Como discutido, a operação em faixa de frequências livre de ressonância acústica é um dos métodos mais simples para se evitar sua ocorrência. Contando com o fato de que a operação com potência reduzida leva a uma ampliação destas faixas, este método se torna

muito interessante para a aplicação proposta neste trabalho, já que se pretende realizar o teste de lâmpadas HID com potência reduzida. Assim, pode-se alcançar redução no consumo de energia e uma redução do ofuscamento imposto ao operador da bancada durante os testes, sem prejudicar os processos de ignição e aquecimento da lâmpada e permitindo a constatação de sua funcionalidade.

### 3.7 Conclusões Parciais

Neste capítulo foi realizada uma comparação entre os reatores eletromagnéticos e eletrônicos para lâmpadas HID, apresentando as características, vantagens e desvantagens de cada um. A ocorrência da ressonância acústica foi apontada como a grande desvantagem da utilização de reatores eletrônicos para lâmpadas HID, o que retarda a popularização destes equipamentos.

Foi realizada uma descrição minuciosa do fenômeno da ressonância acústica, apresentando como esta acontece. Foram apontadas suas consequências e abordados os fatores que levam à ocorrência deste fenômeno.

Além disso, foram discutidos de forma simplificada os modos de ocorrência das ressonâncias e o cálculo de frequência críticas através de parâmetros do tubo de descarga. Vale ressaltar que não é objetivo deste trabalho o cálculo das faixas onde a ressonância acústica ocorre para uma determinada lâmpada.

Por fim foram apresentados alguns métodos de detecção de ocorrência da ressonância acústica e algumas formas de alimentação das lâmpadas que evitam o aparecimento das instabilidades.

# Capítulo 4

## Reatores Eletrônicos para Lâmpadas HID

### 4.1 Introdução

Como discutido no Capítulo 2, toda lâmpada de descarga apresenta uma característica de resistência negativa, ou seja, à medida que a corrente que a circula cresce, a tensão em seus terminais tende a diminuir. Portanto, estas lâmpadas necessitam ser acopladas a um elemento externo, com impedância positiva, para que a corrente e a tensão se estabilizem. Este elemento é o reator.

Grande parte dos reatores utilizados atualmente na alimentação de lâmpadas HID são eletromagnéticos, como discutido na introdução do capítulo anterior. Os reatores eletrônicos apresentam muitas vantagens, contudo podem excitar o fenômeno da ressonância acústica. Este fato aliado ao baixo preço e à confiabilidade das unidades eletromagnéticas tem feito com que os reatores eletrônicos para HID não experimentem a mesma popularidade alcançada pelos reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes.

O objetivo deste trabalho, delimitado no primeiro capítulo, é o desenvolvimento de

um reator eletrônico para testes básicos de funcionalidade de lâmpadas HID. No caso, deseja-se realizar o teste de lâmpadas VSAP e VMAP utilizando o mesmo reator.

Reatores eletrônicos que podem alimentar lâmpadas HID de diferentes tecnologias e potências já foram motivo do depósito de diversas patentes, dentre elas [58] - [62].

Sempre há a preocupação de se evitar a ocorrência de instabilidades no arco de descarga, em reatores eletrônicos que operam em alta frequência. Como a geometria do tubo de descarga está relacionada tanto com a potência da lâmpada como com a faixa de frequências onde a ressonância acústica pode acontecer, o atendimento de lâmpadas HID com potências muito diferentes em alta frequência torna-se crítico. É muito importante que seja previamente realizada uma seleção da frequência de operação, analisando-se a gama de lâmpadas que devem ser atendidas. Deve-se escolher uma frequência na qual estas lâmpadas não apresentem instabilidades no arco de descarga [58].

Assim, os reatores universais para HID são normalmente dedicados a atender lâmpadas de diferentes tecnologias em uma dada faixa de potência. Muitos são dimerizáveis, no entanto sempre podem alimentar a lâmpada em sua potência nominal [58], [60], [61] e [63], o que difere o reator proposto neste trabalho dos demais. Além disso, a maioria dos trabalhos relacionados com reatores projetados para múltiplas potências está protegida por patentes internacionais, o que estimula a comunidade científica brasileira a buscar suas próprias soluções.

São também denominados reatores universais aqueles que podem ser alimentados com tensão alternada entre 90 e 250V eficazes e com frequências que podem variar de 50 a 60Hz [63].

Reatores eletrônicos são circuitos conversores que são utilizados para controlar a potência entregue à lâmpada, adequando a corrente e a tensão em seus terminais aos níveis desejados. Além disso, um reator deve gerar pulsos de tensão para a ignição da lâmpada. Estes equipamentos podem ainda incorporar diversas funções opcionais como por exemplo o monitoramento de características elétricas da lâmpada, detectando o seu envelhecimento e permitindo variações na alimentação a mesma de forma a gerenciar o fluxo luminoso emitido, o fator de potência e a distorção harmônica do conjunto.

O diagrama de blocos da Figura 4.1 mostra um reator eletrônico genérico.

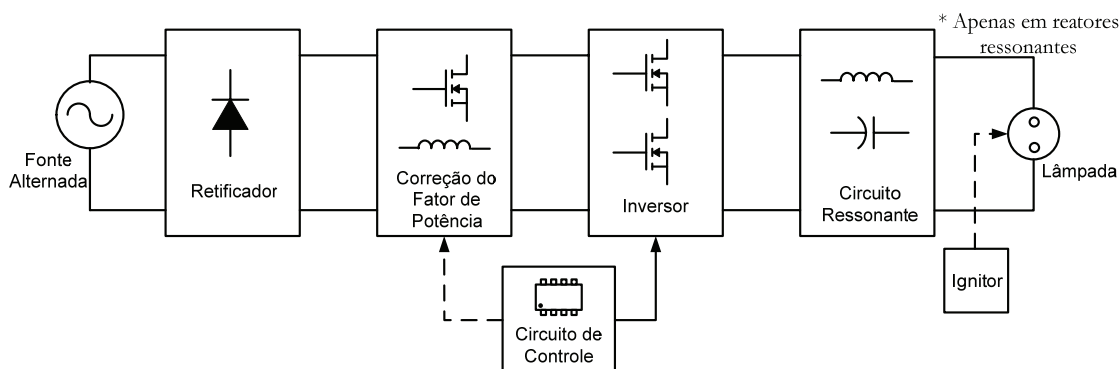


Figura 4.1 – Diagrama de blocos de um reator eletrônico genérico.

Cada uma das etapas, representadas no diagrama de blocos de forma genérica, pode apresentar diferentes topologias em um determinado reator. Um reator eletrônico para alimentação de lâmpadas fluorescente apresenta todos os blocos mostrados na Figura 4.1, com exceção do ignitor, a exemplo das lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão. As lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão e de multivapores metálicos necessitam do estágio ignitor. A função de cada uma das partes componentes de um reator eletrônico são descritas a seguir:

- **Retificador:** Tem a função de converter a tensão alternada senoidal da fonte de alimentação em uma tensão contínua, dando origem a um “barramento CC”. Utiliza-se uma ponte retificadora de onda completa, que é muito comum em equipamentos eletrônicos.
- **Circuito de Correção do Fator de Potência:** A retificação da tensão alternada da fonte de alimentação é responsável por uma diminuição do fator de potência do circuito como um todo. A correção do fator de potência pode ser ativa [64] e [65] ou passiva [66]. A correção do fator de potência utilizando circuitos ativos emprega conversores CC-CC, que devem ser conectados a um circuito de controle para gerar os pulsos de disparo da chave semicondutora que, por sua vez, é intrínseca a estes conversores. Por não possuir componentes semicondutores, os circuitos de correção de fator de potência passivos apresentam menor custo.
- **Inversor:** Esta etapa é responsável por converter a tensão contínua proveniente do barramento CC em uma tensão alternada de alta frequência. Podem ser utilizados inversores ponte completa (*full bridge*), meia ponte (*half bridge*), *flyback*, ou *push pull* [67]. O inversor em ponte completa possui quatro chaves semicondutoras enquanto

os demais utilizam apenas duas. Usualmente, o circuito inversor do reator apresenta configuração em ponte completa para potências acima de 300W [16]. O inversor meia ponte é muito utilizado em reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes [11] e [12]. Existem topologias de reator que empregam conversores CC-CC, integrando a etapa de correção do fator de potência com a etapa inversora, resultando na utilização de uma única chave [68] - [70].

- ***Circuito Ressonante:*** A função do circuito ressonante é transformar a tensão quadrada da saída do inversor em uma tensão praticamente senoidal para a alimentação da lâmpada. O circuito ressonante é composto por um arranjo de indutores e capacitores e tem a função de prover a tensão necessária para o funcionamento da lâmpada, limitar a corrente que a percorre, e em alguns casos pode prover alta tensão para a sua partida, eliminando a necessidade do emprego de ignitores. Um fato interessante da utilização de métodos de ignição através da ressonância é a limitação da tensão e da corrente nos componentes do reator. Isto porque a ignição acontece quando a tensão atinge o nível de tensão necessário, eliminando o esforço de sucessivos picos de tensão [56], [57] e [71]. Vale ressaltar que reatores que empregam inversores não ressonantes não possuem circuito ressonante.
- ***Ignitor:*** Etapa responsável por gerar os pulsos de alta tensão necessários para a ignição de alguns tipos de lâmpada. Esta função pode ser implementada por um circuito dedicado, que não interfere no funcionamento do reator após a ignição, ou ainda pode ser realizada por uma interação entre o circuito inversor e o circuito ressonante.
- ***Circuito de Controle:*** É o responsável por gerar o sinal de disparo para as chaves semicondutoras do circuito inversor e, nos casos de correção do fator de potência com circuito ativo, gera também o sinal de controle para o interruptor estático deste. O circuito de controle pode ser microprocessado, propiciando ao reator diversas funções como a dimerização ou a adequação da alimentação da lâmpada de acordo com a sua vida útil.

Os reatores eletrônicos costumam ser diferenciados de acordo com a presença ou não de um circuito ressonante entre o inversor e a lâmpada. Assim, são classificados em reatores eletrônicos não-ressonantes e reatores eletrônicos ressonantes [67]. A seguir serão



apresentadas algumas topologias destes dois tipos. Será dada maior atenção aos reatores eletrônicos ressonantes por ser o tipo utilizado neste trabalho.

## 4.2 Reatores Eletrônicos Não-Ressonantes

São baseados nos conversores CC-CC. Normalmente, retira-se o diodo de saída para que a lâmpada seja alimentada com forma de onda alternada [67].

Nestes reatores, a lâmpada é alimentada com corrente de forma de onda quadrada, ou praticamente quadrada. Esta característica torna-os interessantes para o acionamento de lâmpadas HID, pois potência não apresenta oscilações, eliminando a ocorrência da ressonância acústica. Contudo, o projeto deve ser muito cuidadoso, já que o ruído produzido pelo chaveamento pode provocar oscilações na potência instantânea provocando o aparecimento da instabilidades no arco de descarga.

A Figura 4.2 mostra alguns exemplos de circuitos inversores não ressoantes. Quando utilizados para a alimentação de lâmpadas VSAP ou MVMAP, todas estas topologias necessitam de um circuito ignitor dedicado, que não foi apresentado na Figura 4.2.

Normalmente, a corrente que circula pela lâmpada é monitorada através de sensores para que seja limitada. O sinal deste sensor é utilizado para controlar os interruptores estáticos.

Uma desvantagem destes reatores é que os interruptores estáticos são submetidos à elevados picos de tensão, resultando em elevadas perdas de comutação e baixo rendimento, sobretudo quando acionam cargas de elevada potência. Por isso, são utilizados semicondutores de potência que possuem custo elevado [67].

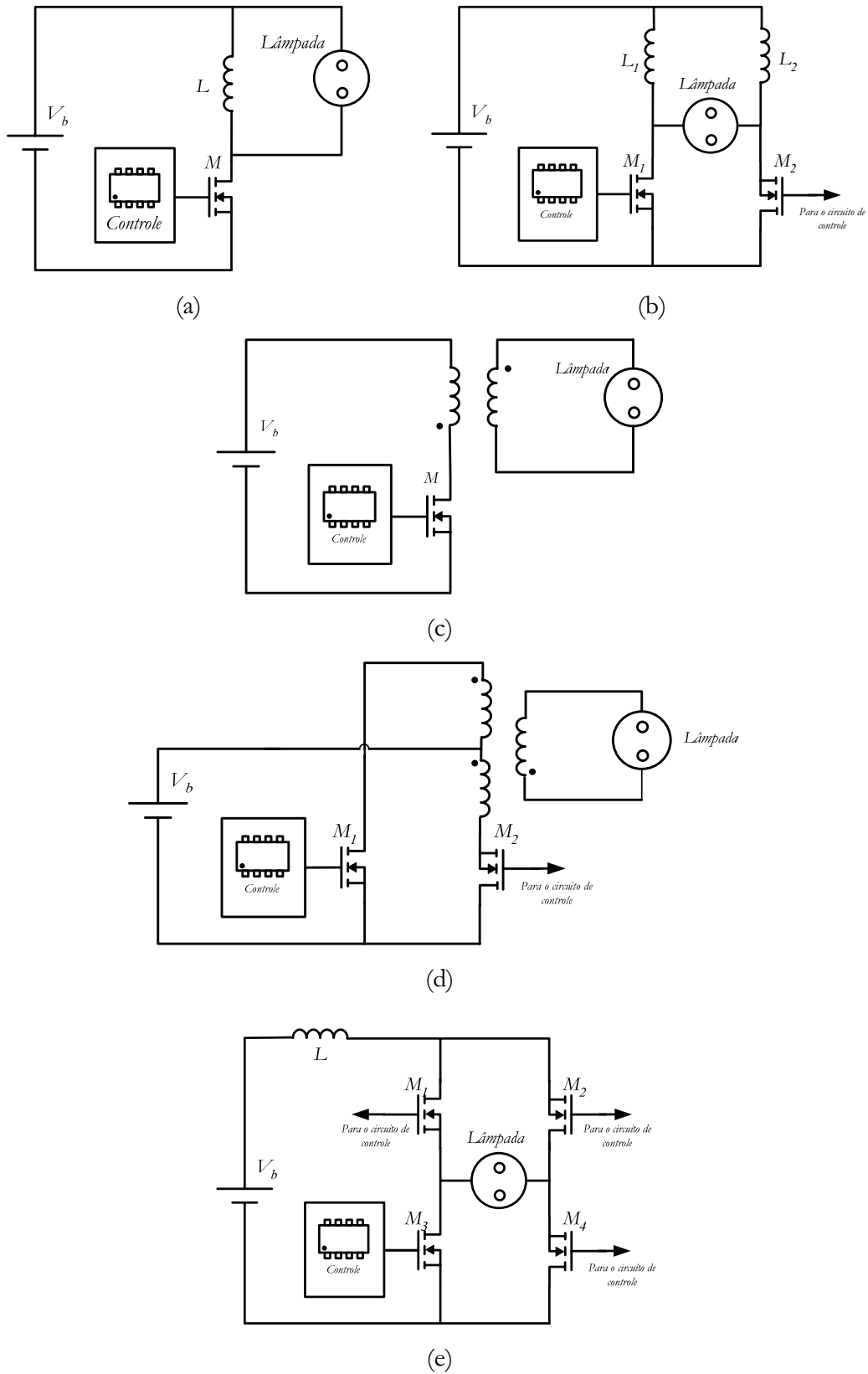


Figura 4.2 – Inversores não ressonantes: (a) Buck – boost. (b) Meia ponte alimentado em corrente. (c) Flyback. (d) Push-Pull. (e) Ponte completa alimentado em corrente.

### 4.3 Reatores Eletrônicos Ressonantes

Estes reatores possuem um circuito ressonante, composto por capacitores e indutores entre a lâmpada e o inversor. A função do circuito ressonante é transformar a onda quadrada da saída do circuito inversor em uma onda alternada aproximadamente senoidal. Além disso, os filtros ressonantes têm a função de fornecer tensão e corrente nominais para a lâmpada, e em alguns casos, gerar a sobretensão necessária para a ignição destas [43] e [67].

Em um reator eletrônico, o inversor ressonante pode ser alimentado em tensão ou em corrente. Neste trabalho serão apresentados apenas os inversores ressonantes alimentados em tensão, que são os mais utilizados em reatores eletrônicos comerciais. Mais detalhes do funcionamento de inversores ressonantes alimentados em corrente são encontrados em [67].

Os inversores ressonantes possibilitam que a comutação das chaves semicondutoras aconteça de forma suave (*Soft Switching*) com tensão nula (*ZVS – Zero Voltage Switching*) ou corrente nula (*ZCS – Zero Current Switching*), minimizando as perdas, o que os torna especialmente interessantes para aplicações em altas frequências, como é o caso dos reatores eletrônicos [16], [31] - [34], [43], [67] e [72].

Podem ser empregadas diversas topologias de circuito inversor, como o *push-pull*, o *flyback*, o inversor em meia ponte ou em ponte completa. Com relação ao filtro ressonante utilizado, existe grande variedade de topologias de filtro, conforme apresentado em [43]. A Figura 4.3 mostra os três principais circuitos ressonantes utilizados com inversores alimentados em tensão [16] e [73]. Nesta figura, a lâmpada foi substituída por um resistor, que modela o seu funcionamento em alta frequência.

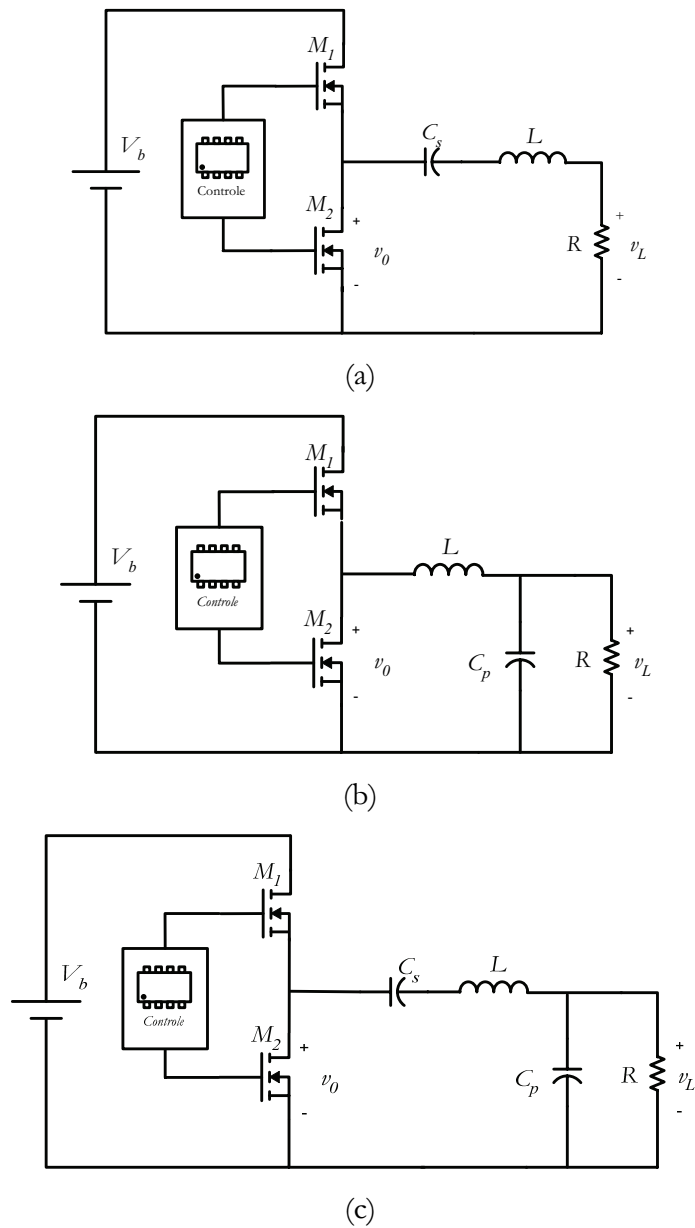


Figura 4.3 – Inversores ressonantes alimentados em tensão : (a) Série. (b) Paralelo. (c) Série-paralelo.

O inversor meia ponte tem a função de converter a tensão contínua do barramento CC ( $V_b$ ) em uma tensão pulsada de alta frequência. Neste circuito, os mosfets funcionam como interruptores que comutam entre o estado aberto e fechado de forma alternada ao longo do tempo. Portanto, considerando um período de chaveamento  $T$ , durante o intervalo de tempo que vai de  $t = 0$  até  $t = T/2$ , o mosfet  $M_1$  permanece aberto e  $M_2$  fechado. Entre  $t = T/2$  e  $t = T$ , o mosfet  $M_1$  fica fechado e  $M_2$  é aberto. Desta forma, a tensão de saída do inversor ( $v_0$  sobre o mosfet  $M_2$ ) varia ao longo do período de chaveamento conforme mostrado na Figura 4.4.

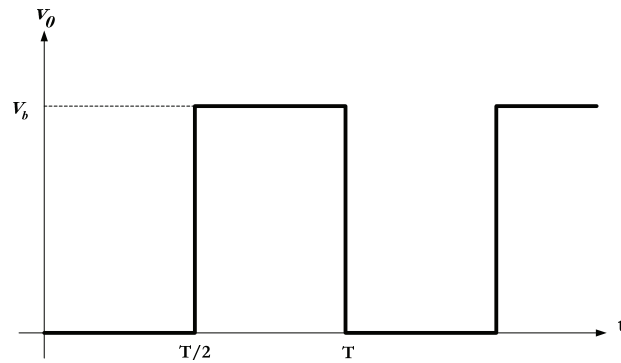


Figura 4.4 – Tensão de saída do inversor

Em certas regiões de operação os inversores ressonantes apresentam ganho de tensão dependente da carga [73]. Esta característica é diferente para cada uma das topologias apresentadas e pode ser estudada através da função de transferência de cada um destes inversores [16], [67] e [73].

As seções seguintes apresentam esta característica destes inversores.

### 4.3.1 Inversor Série-Ressonante

O inversor série-ressonante é mostrado na Figura 4.3(a), e sua função de transferência, que relaciona a tensão sobre a lâmpada ( $v_L$ ) com a tensão de saída do inversor ( $v_o$ ), é dada por:

$$\frac{v_L(j\omega)}{v_o(j\omega)} = \frac{R}{R + Z_1}, \quad (4.1)$$

em que:

$$Z_1 = j\omega L + \frac{1}{j\omega C_s} = \frac{1 - \omega^2 LC_s}{j\omega C_s}. \quad (4.2)$$

Substituindo (4.2) em (4.1), tem-se:

$$\frac{v_L(j\omega)}{v_0(j\omega)} = \frac{R}{R + \frac{1 - \omega^2 LC_s}{j\omega C_s}} = \frac{j\omega C_s R}{j\omega C_s R + 1 - \omega^2 LC_s} = \frac{1}{1 + j\left(\frac{\omega L}{R} - \frac{1}{\omega C_s R}\right)}. \quad (4.3)$$

Para uma melhor análise da função de transferência, dada em (4.3), é interessante fazer algumas definições:

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R}; \quad (4.4)$$

$$F = \frac{\omega_s}{\omega_0}; \quad (4.5)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_s}}. \quad (4.6)$$

em que:  $Q$  é o fator de qualidade da carga;  $\omega_0$  que é a frequência angular de ressonância do filtro e  $F$  é a relação entre as frequências angulares de chaveamento  $\omega_s$  e  $\omega_0$ .

Utilizando estas expressões, o módulo de (4.3) pode ser reescrito como:

$$G_1 = \left| \frac{v_L(j\omega)}{v_0(j\omega)} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(F - \frac{1}{F}\right)^2}}. \quad (4.7)$$

A Figura 4.5 mostra o ganho de tensão para o circuito série-ressonante para diferentes valores de  $Q$ .

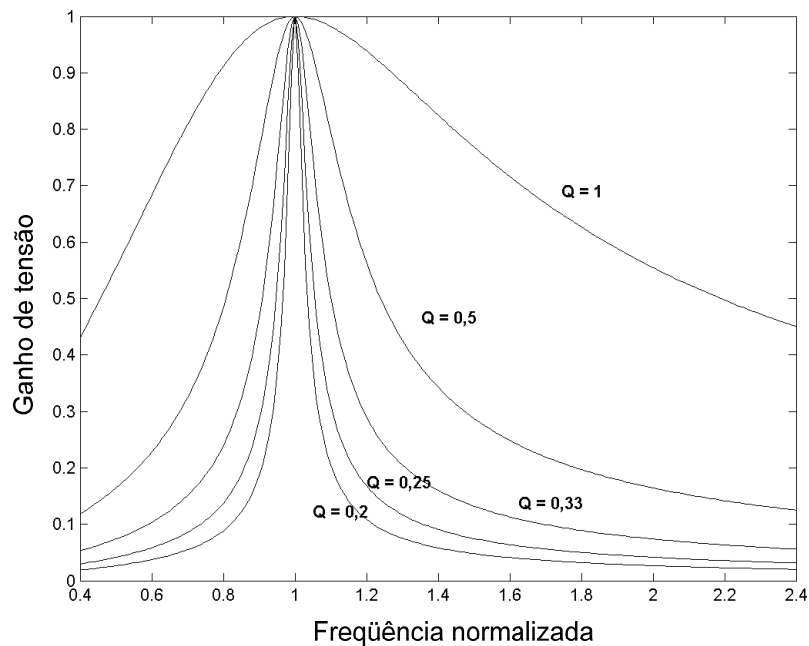


Figura 4.5 – Ganho de tensão para o inversor série ressonante.

Observa-se que o ganho de tensão é fortemente dependente da carga. A tensão sobre a lâmpada pode ser no máximo igual à tensão de saída do inversor. Isto implica que este circuito não pode gerar pulsos de tensão para a partida de lâmpadas HID. A grande vantagem desta topologia é que toda a corrente drenada pelo circuito ressonante circula pela lâmpada, conferindo maior eficiência ao inversor.

### 4.3.2 Inversor Paralelo-Ressonante

Este circuito é mostrado na Figura 4.3(b), sendo sua função de transferência dada por:

$$\frac{v_L(j\omega)}{v_0(j\omega)} = \frac{R}{j\omega L + Z_2}, \quad (4.8)$$

em que:

$$Z_2 = \frac{\frac{R}{j\omega C_p}}{R + \frac{1}{j\omega C_p}} = \frac{R}{1 + j\omega C_p R}, \quad (4.9)$$

$$\frac{v_L(j\omega)}{v_0(j\omega)} = \frac{R}{j\omega L + \frac{R}{1 + j\omega C_p R}} = \frac{R}{R - \omega^2 C_p L R + j\omega L} = \frac{1}{1 - \omega^2 C_p L + j \frac{\omega L}{R}}. \quad (4.10)$$

Definindo o fator de qualidade da carga e a frequência de ressonância como se segue:

$$Q = \frac{R}{\omega_0 L}, \quad (4.11)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_p}}. \quad (4.12)$$

Substituindo (4.5), (4.11) e (4.12) em (4.10) e calculando o módulo da expressão resultante tem-se:

$$G_2 = \left| \frac{v_L(j\omega)}{v_0(j\omega)} \right| = \frac{1}{\sqrt{(1 - F^2)^2 + \left(\frac{F}{Q}\right)^2}}. \quad (4.13)$$

A Figura 4.6 mostra o ganho de tensão  $G_2$  em função de  $F$  para diversos valores de  $Q$ .



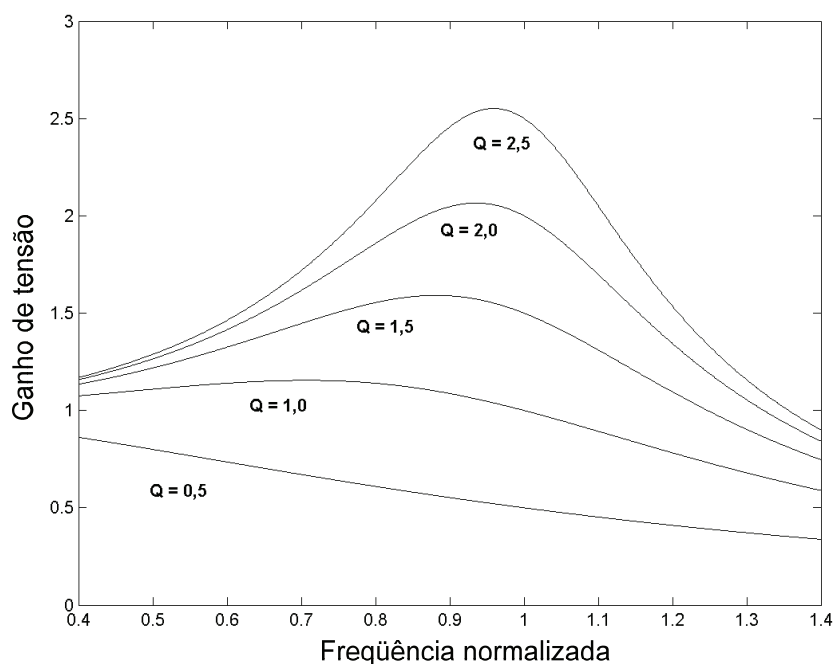


Figura 4.6 – Ganho de tensão do inversor paralelo.

Com o aumento do fator de qualidade a tensão sobre a lâmpada pode ser muito maior do que a tensão de saída do inversor, permitindo a ignição de lâmpadas HID sem a necessidade de um circuito ignitor [56] e [71]. É interessante observar que o fator de qualidade  $Q$  é diretamente proporcional ao valor da resistência equivalente da lâmpada. Como na partida esta resistência é muito alta, basta operar o circuito inversor em uma frequência próxima da frequência de ressonância para que altos valores de tensão apareçam nos terminais da lâmpada.

### 4.3.3 Inversor Série – Paralelo Ressonante

Apresentado na Figura 4.3 (c), o inversor série – paralelo foi o inversor utilizado para a construção do reator proposto neste trabalho, já que pode gerar a alta tensão necessária para a ignição das lâmpadas VSAP, como será discutido nesta seção, dispensando a necessidade de um circuito ignitor dedicado. No caso das lâmpadas VMAP, que não necessitam de alta tensão para a ignição, a tensão terminal gerada pelo inversor ressonante atingirá apenas o valor necessário para que o arco voltaico seja estabelecido.

Um dos motivos da utilização desta topologia é a sua grande utilização em reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes, o que torna os componentes utilizados muito difundidos e baratos [43] e [72]. Além disso, deve-se destacar também a experiência deste grupo de pesquisas na utilização deste circuito.

As quatro etapas do funcionamento do inversor em regime permanente são explicadas a seguir.

**Primeira etapa:**

Considera-se que a primeira etapa começa quando o mosfet  $M_1$  entra em condução, comandado pelo circuito de disparo. A corrente então segue o caminho mostrado na Figura 4.7, vindo da fonte e passando pelo mosfet  $M_1$ , pelo capacitor  $C_s$ , pelo indutor  $L$  e em seguida pelo capacitor  $C_p$  e também pela lâmpada, aqui representada pelo resistor  $R$ .

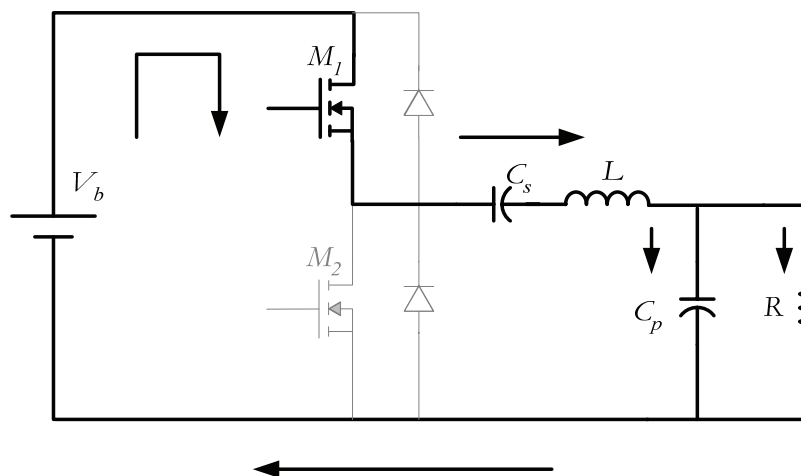


Figura 4.7 – Primeira etapa de funcionamento do inversor.

**Segunda etapa:**

A segunda etapa tem início quando o circuito de disparo dá o sinal para a abertura do mosfet  $M_1$ . Neste instante a corrente que circula pelo indutor  $L$  não é nula. Portanto, até que esta se anule, o seu sentido não pode ser invertido, com isso o diodo  $D_2$ , intrínseco ao mosfet  $M_2$  entra em condução, e a corrente percorre o caminho mostrado na Figura 4.8.

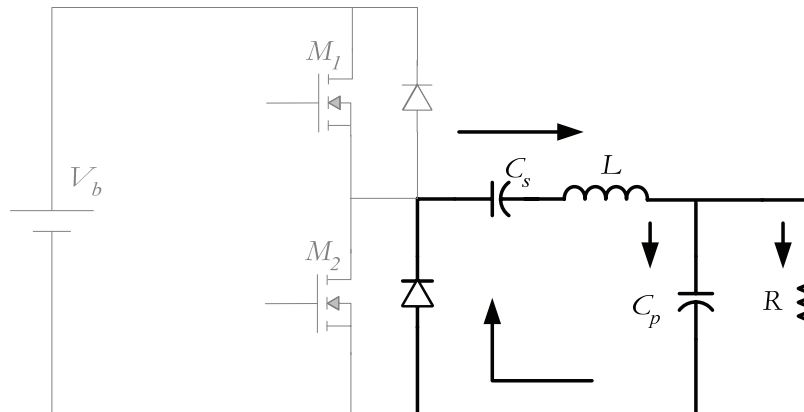


Figura 4.8 – Segunda etapa de funcionamento do inversor.

**Terceira etapa:**

Quando a corrente que passa pelo indutor, e conseqüentemente pela malha definida na Figura 4.8, se anula, o mosfet  $M_2$  passa a conduzir a energia armazenada no capacitor  $C_s$ . Assim a corrente passa a circular no sentido inverso, conforme mostrado na Figura 4.9.

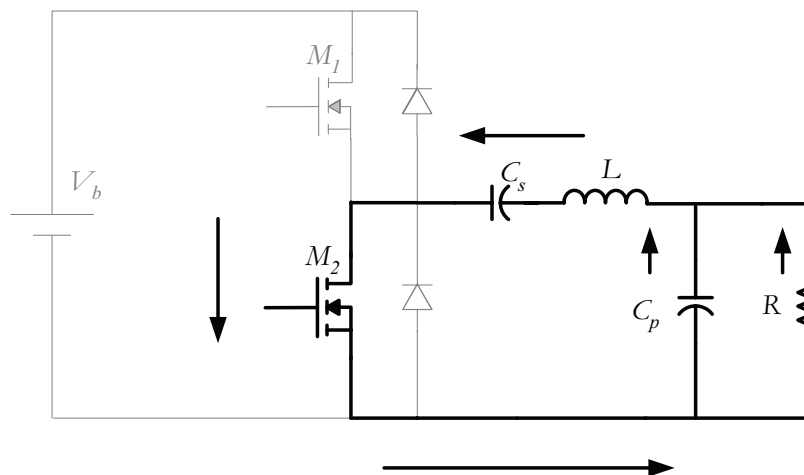


Figura 4.9 – Terceira etapa de funcionamento do inversor.

**Quarta etapa:**

De forma análoga à segunda etapa, na quarta etapa o mosfet  $M_2$  recebe o comando para abrir, entretanto, como a corrente pelo indutor não pode variar bruscamente, o diodo  $D_1$  intrínseco ao mosfet  $M_1$ , entra em condução e a corrente circula no sentido mostrado na Figura 4.10 até que se anule. Neste instante tem início a primeira etapa de funcionamento, fechando o ciclo de operação do inversor em regime permanente.

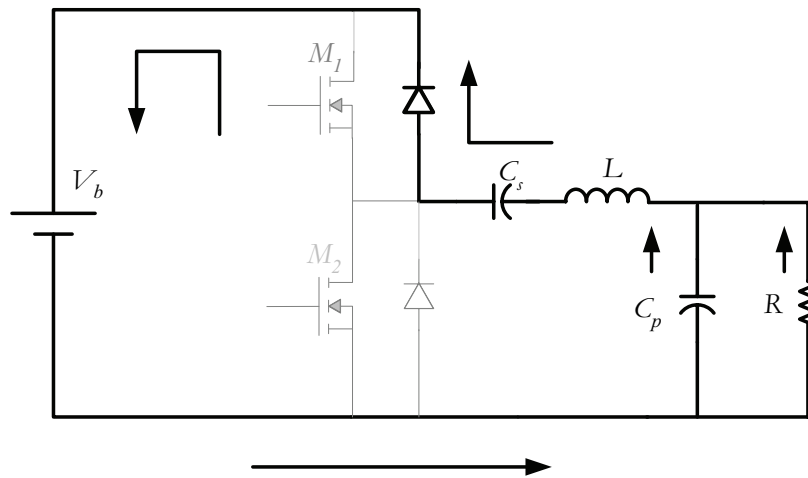


Figura 4.10 – Quarta etapa de funcionamento do inversor.

O sinal de disparo dos mosfets é gerado por um circuito dedicado. Este circuito deve guardar um tempo entre o sinal de abertura de uma chave e o de fechamento da outra para evitar que ocorra um curto-circuito na fonte de alimentação. Este tempo de atraso entre os sinais de disparo é conhecido como tempo morto (*dead time*). A Figura 4.11 mostra a forma de onda dos sinais de disparo dos mosfets com o tempo morto ( $t_d$ ).

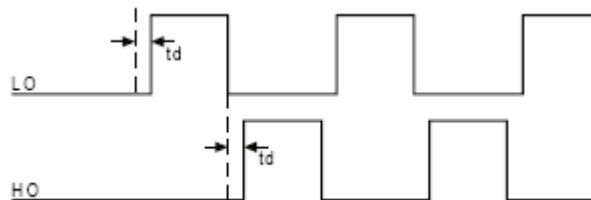


Figura 4.11 – Sinal de disparo dos mosfets [74].

Um problema intrínseco deste circuito são as perdas de potência que ocorrem durante o chaveamento, já que os interruptores estáticos trabalham com a corrente que passa pela carga e são normalmente submetidos a níveis elevados de tensão. As perdas no disparo e no desligamento das chaves podem ser parte significativa da perda total do circuito. Estas perdas aumentam linearmente com a frequência de chaveamento [16].

No entanto, como destacado anteriormente, os inversores ressonantes podem operar com comutação suave, o que pode reduzir significativamente as perdas do reator. De acordo com a relação entre a frequência de chaveamento do inversor ( $\omega_k$ ) e a frequência de oscilação natural do filtro ressonante ( $\omega_0$ ) têm-se modos de operação distintos [16] e [75].

Para o caso em que  $\omega_s$  é menor do que  $\omega_b$ , o conjunto lâmpada reator é enxergado pelo inversor como uma carga capacitiva. Neste caso a corrente pelo indutor encontra-se adiantada em relação à tensão de saída do inversor. Com isso, os mosfets entram em condução com corrente não-nula, caracterizando um chaveamento dissipativo. Por outro lado, o bloqueio acontece sob tensão nula.

Quando  $\omega_s$  é maior do que  $\omega_b$ , a lâmpada em conjunto com o reator representa para o inversor uma carga indutiva. Neste caso, a corrente no indutor fica atrasada em relação à tensão de saída do inversor. A entrada em condução dos mosfets acontece sob tensão nula, mas o bloqueio não é suave. Contudo, a utilização de capacitores entre o dreno e a fonte dos interruptores faz com que o bloqueio apresente perdas muito reduzidas. Estes capacitores funcionam como *snubbers*. No momento do bloqueio a corrente do dreno é desviada para este capacitor, reduzindo quase completamente as perdas de chaveamento [16], [75] e [76].

A função de transferência do inversor série – paralelo é desenvolvida a seguir:

$$\frac{v_L(j\omega)}{v_0(j\omega)} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (4.14)$$

As impedâncias equivalentes  $Z_1$  e  $Z_2$  são definidas nas equações (4.2) e (4.9) respectivamente. Utilizando estas definições:

$$\frac{v_L(j\omega)}{v_0(j\omega)} = \frac{\frac{1 - \omega^2 LC_s}{j\omega C_s}}{\frac{R}{1 + j\omega C_p R} + \frac{1 - \omega^2 LC_s}{j\omega C_s}} = \frac{1}{\frac{C_s + C_p}{C_s} - \omega^2 LC_p + j \left( \frac{\omega L}{R} - \frac{1}{\omega C_s R} \right)}. \quad (4.15)$$

Para uma melhor análise desta equação é importante definir uma relação entre os capacitores série e paralelo conforme mostrado a seguir:

$$\alpha = \frac{C_s + C_p}{C_s}. \quad (4.16)$$

Substituindo (4.16) em (4.14) e utilizando as definições das equações (4.5), (4.6) e

(4.11) em (4.15) e calculando o módulo da equação resultante, tem-se:

$$G_3 = \left| \frac{v_L(j\omega)}{v_0(j\omega)} \right| = \frac{1}{\sqrt{[a - F^2(a-1)]^2 + \left[ \frac{F}{Q} - \frac{1}{FQ} \right]^2}} \quad (4.17)$$

É interessante observar que a frequência natural de oscilação do circuito ressonante em regime permanente foi aproximada por (4.6), já que nesta condição a impedância da lâmpada é muito menor do que a impedância do capacitor  $C_p$ .

O ganho de tensão do inversor ressonante é fortemente dependente de  $Q$  e de  $\alpha$ , conforme mostrado na Figura 4.12.

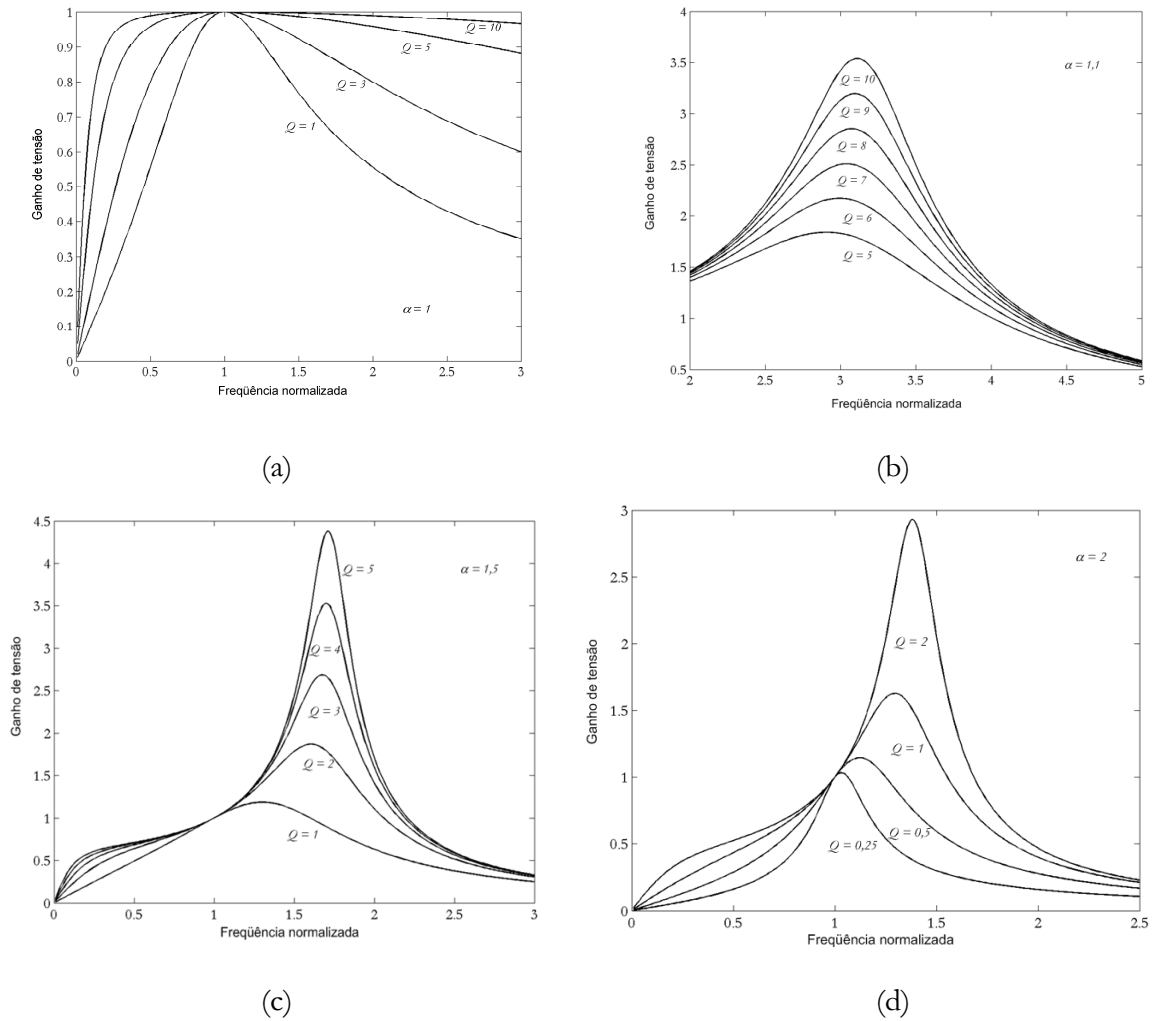


Figura 4.12 – Ganho de tensão do inversor série – paralelo com  $\alpha$  igua a: (a) 1. (b)1,1. (c) 1,5. (d) 2.

Observando (4.16) pode-se notar que o parâmetro  $\alpha$  não pode ser menor do que 1. Este parâmetro também não pode assumir um valor maior do que 2, já que o valor do capacitor  $C_p$  deve ser menor do que o do capacitor  $C_s$ , de acordo com as equações de projeto que serão apresentadas na próxima seção. Então, a Figura 4.12 mostra o ganho de tensão para alguns possíveis valores de  $\alpha$ .

O parâmetro  $\alpha$  é igual 1 quando  $C_p = 0$ , então, neste caso o circuito passa a se comportar como o inversor ressonante série, e o ganho não é maior do que a unidade. Quando  $\alpha = 2$ , teríamos o caso em que  $C_p = C_s$ , o que não acontece, como será discutido na próxima seção. Assim, na Figura 4.12 são mostrados os casos extremos.

Percebe-se que com a variação do valor de  $\alpha$ , o ganho de tensão pode atingir valores maiores com menores valores de  $Q$ . O parâmetro  $\alpha$  interfere ainda no valor de  $F$  que leva ao maior ganho de tensão.

Portanto, este circuito pode ser projetado para gerar alta tensão para a ignição das lâmpadas VSAP (ou ainda de lâmpadas MVMAP), dispensando a utilização de circuitos ignitores dedicados, desde que opere em uma frequência adequada de acordo com o valor de  $\alpha$ .

Outra característica interessante do inversor série – paralelo ressonante que deve ser analisada é a relação entre a potência de saída e a carga. Quando alimentadas em alta frequência as lâmpadas HID comportam-se como uma resistência dependente da potência. Portanto, como pretende-se alimentar lâmpadas de diferentes potências no mesmo reator, é interessante que se conheça a variação da potência de saída do mesmo com a variação da carga para que se possa conhecer o ponto de operação de cada lâmpada.

Para se observar esta característica, a tensão de saída do reator ( $v_L$ ) foi isolada em (4.17). Elevando esta tensão ao quadrado e dividindo-a pela resistência equivalente da lâmpada tem-se a potência de saída do reator, conforme mostrado a seguir:

$$P_L = \frac{\left( \frac{|v_0|}{\sqrt{[a - F^2(a-1)]^2 + \left[ \frac{F}{Q} - \frac{1}{FQ} \right]^2}} \right)^2}{R} \quad (4.18)$$

A Figura 4.13 mostra o gráfico da potência de saída do reator em função da resistência equivalente da lâmpada (carga ligada à saída do reator), para o caso em que  $F = 2,7$ . Observa-se a influencia do valor de  $\alpha$  na potência entregue à carga.

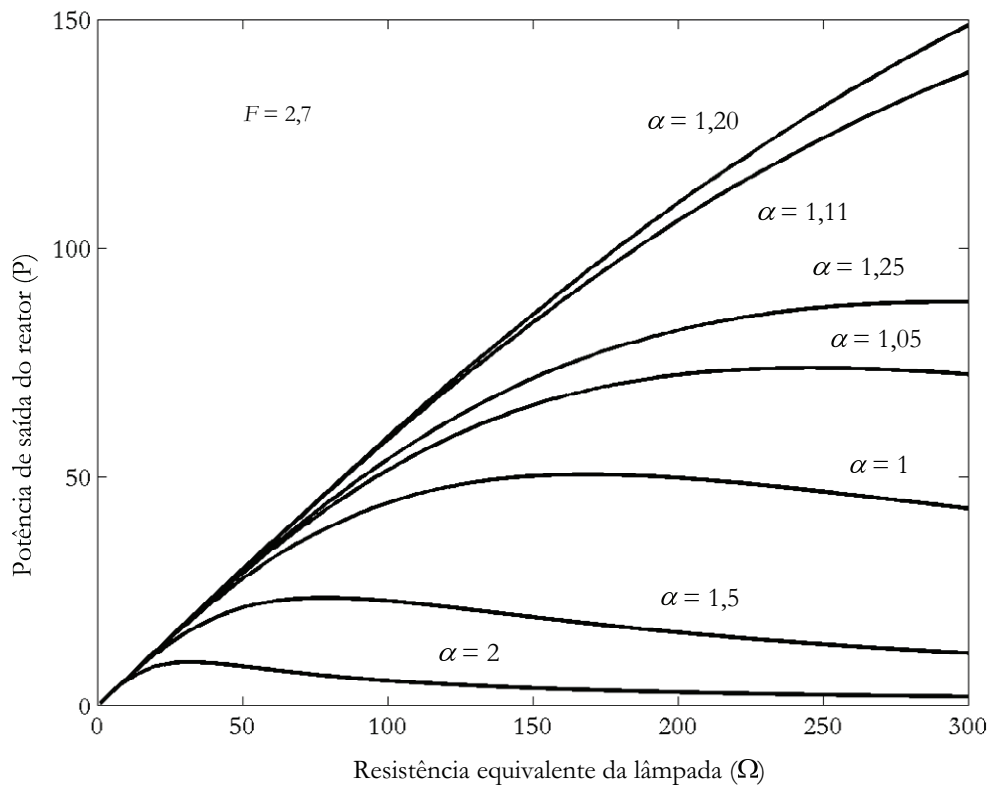


Figura 4.13 – Relação entre a resistência equivalente da lâmpada e a potência de saída do reator.

Conhecendo-se a característica de variação da resistência equivalente da lâmpada com a sua potência desenvolvida, pode-se determinar seu ponto de operação em um dado reator. Para isto basta plotar em um mesmo gráfico as características de variação da potência com a resistência equivalente do reator e da lâmpada. O ponto de intersecção das curvas determina o ponto de operação.

## 4.4 Projeto do Circuito Série – Paralelo Ressonante

O projeto do circuito ressonante consiste no dimensionamento dos componentes



reativos ( $L$ ,  $C_s$  e  $C_p$ ), de forma a limitar corrente que circula pela lâmpada em regime permanente e ainda gerar a sobretensão necessária para a ignição da mesma. Dado o número de variáveis livres do sistema, é necessário que algumas destas sejam pré-estabelecidas.

Existem diferentes métodos para o dimensionamento dos componentes do circuito ressonante [16], [43], [67] e [72]. A metodologia aqui utilizada é uma adaptação de [72].

A tensão de saída do inversor ( $v_0$ ) é assimétrica, pois durante a primeira metade do período é igual a  $V_b$  e durante a outra metade do período é igual a zero. Contudo, o capacitor  $C_s$  bloqueia a componente contínua, desta forma, pode-se efetuar a análise considerando a tensão  $v_0'$  (logo após o capacitor  $C_s$ ). Esta tensão simétrica é mostrada Figura 4.14.

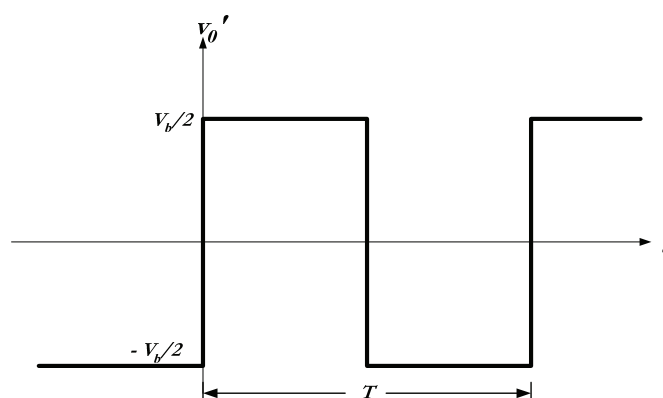


Figura 4.14 – Forma de onda da tensão  $v_0'$ .

A tensão  $v_0'$  pode ser escrita na forma de um somatório de senos e cossenos aplicando-se a decomposição em série trigonométrica de Fourier, conforme mostrado na expressão (4.19) [75]:

$$v_0(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \text{sen}(n\omega t)]. \quad (4.19)$$

Para funções ímpares, como é o caso de  $v_0'(t)$ , o coeficiente  $b_n$  é igual a zero. O coeficiente  $a_0$  é correspondente à componente contínua da tensão de entrada que é bloqueada pelo capacitor  $C_s$ . Portanto, basta calcular o valor de  $a_n$ , conforme apresentado

na equação (4.20).

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T v_0(t) \cos(n\omega t) dt. \quad (4.20)$$

em que T é o período de  $v_0(t)$

A modelagem de inversores ressonantes pode ser feita através do método da componente fundamental, pois as demais componentes harmônicas interferem pouco na análise matemática [73] e [77]. Assim, basta calcular o coeficiente  $a_1$ , que corresponde à amplitude do primeiro harmônico, conforme apresentado em (4.21), é dado por.

$$a_1 = \frac{2V_b}{\pi}, \quad (4.21)$$

cujo valor eficaz é:

$$a_{1rms} = \frac{\sqrt{2}V_b}{\pi} \quad (4.22)$$

A frequência de comutação do inversor é constante em todas as etapas de seu funcionamento. No entanto, para o cálculo dos componentes do circuito considera-se que, na partida, esta frequência ( $\omega$ ) é igual à frequência de ressonância do conjunto LCC que dada em (4.23) [72].

$$\omega_{0p} = \frac{1}{\sqrt{L \left( \frac{C_s C_p}{C_s + C_p} \right)}}. \quad (4.23)$$

Conforme discutido na seção anterior, em regime permanente, a frequência de ressonância do circuito LCC pode ser aproximada por (4.6). Substituindo (4.6) e (4.23) em (4.5), tem-se:

$$F = \frac{\frac{1}{\sqrt{L \left( \frac{C_s C_p}{C_s + C_p} \right)}}}{\frac{1}{\sqrt{L C_s}}} = \sqrt{\frac{C_s + C_p}{C_p}}. \quad (4.24)$$

Isolando-se  $C_p$ :

$$C_p = \frac{C_s}{F^2 - 1}. \quad (4.25)$$

Substituindo (4.25) em (4.23), considerando que  $\omega_s = \omega_{0p}$ , e isolado  $L$ , tem-se:

$$L = \frac{F^2}{C_s \omega_s^2}. \quad (4.26)$$

Tomando a equação do módulo do ganho de tensão do circuito ressonante (4.15), e substituindo (4.25) e (4.26):

$$\begin{aligned} \left| \frac{v_L(j\omega)}{v_0(j\omega)} \right| &= \frac{1}{\sqrt{\left[ \frac{\frac{C_s}{F^2 - 1} + C_s}{C_s} - \omega_s \left( \frac{F^2}{C_s \omega_s^2} \right) \left( \frac{C_s}{F^2 - 1} \right) \right]^2 + \left[ \omega_s \frac{F^2}{C_s \omega_s^2} - \frac{1}{\omega_s C_s R} \right]^2}} \quad (4.27) \\ \left| \frac{v_L(j\omega)}{v_0(j\omega)} \right| &= \frac{1}{\sqrt{\left[ \frac{F^2}{F^2 - 1} - \frac{F^2}{F^2 - 1} \right]^2 + \left[ \frac{F^2 - 1}{\omega_s C_s R} \right]^2}} = \frac{\omega_s^2 C_s R}{F^2 - 1} \end{aligned}$$

Isolando  $C_s$ :

$$C_s = \frac{F^2 - 1}{\omega_s R} \frac{V_L}{a_{1rms}}. \quad (4.28)$$

Assim, para o projeto, deve-se calcular primeiro o valor de  $C_s$  entrando com os seguintes valores:

- Frequência de chaveamento desejada do circuito inversor;
- Relação entre a frequência de chaveamento do inversor e a frequência de ressonância de regime permanente aproximada;
- Valor eficaz da tensão nominal de regime permanente da lâmpada ( $V_L$ ) tomada quando a lâmpada é alimentada com reator eletromagnético;
- Resistência equivalente da lâmpada, dada por  $R = \frac{V_L^2}{P_L}$ , onde  $P_L$  é a potência nominal da lâmpada;
- Valor eficaz da componente fundamental da tensão de saída do inversor.

De posse do valor de  $C_s$  pode-se calcular o valor do indutor  $L$  através de (4.26) e de  $C_p$  utilizando (4.25).

O parâmetro  $F$ , está intimamente associado à distorção harmônica da corrente que percorre a lâmpada, Quanto menor o seu valor, menor será esta distorção [67] e [72]. Em contra-partida, o aumento de  $F$  produz crescimento significativo do valor da capacitância do capacitor  $C_s$ , que por sua vez provoca a diminuição da indutância  $L$ . Isto é muito interessante para a redução do volume ocupado pelo circuito ressonante, uma vez que o tamanho do indutor é proporcional à sua indutância.

Como a frequência de chaveamento deve ser maior do que a frequência de ressonância do filtro LCC para que o inversor opere com perdas reduzidas, o valor de  $F$  é sempre maior do que 1. Isto implica que o capacitor  $C_p$  sempre terá um valor menor do que o capacitor  $C_s$  de acordo com (4.25). Assim, a relação  $\alpha$  nunca assumirá um valor maior do que 2, conforme discutido na seção anterior.

Por fim, o projeto do reator deve atender à necessidade de ignição da lâmpada VSAP e promover na saída uma tensão elevada o suficiente para fazer com que a mesma entre em funcionamento. Conforme apresentado em [78], o pulso de tensão necessário para garantir a ignição de lâmpadas VSAP de 70W deve estar entre 1,8 e 2,5kV (NBR IEC 662:1997). Entretanto, a ignição da lâmpada utilizando-se a ressonância do circuito LCC acontece em níveis de tensão inferiores a este. Isto é atribuído ao fato de que os pulsos de alta tensão acontecem repetidamente e com uma frequência mais alta do que se observa em outros métodos [33], [43], [76], [79] e [80].

Durante a partida, a lâmpada apresenta resistência muito elevada e por isso é

modelada como sendo um resistência infinita (circuito aberto). A Figura 4.15, mostra o circuito utilizado para o estudo do transitório de partida.

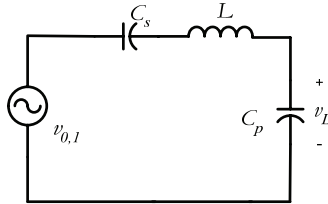


Figura 4.15 – Circuito para o transitório de partida.

Neste circuito, considera-se que a fonte de alimentação é senoidal (método da componente fundamental). A função de transferência deste circuito no domínio da frequência complexa ( $s$ ) é desenvolvida a seguir:

$$\frac{V_L(s)}{V_0(s)} = \frac{\frac{1}{sC_p}}{sL + \frac{1}{sC_s} + \frac{1}{sC_p}} = \frac{1}{s^2C_pL + 1 + \frac{C_p}{C_s}} \quad (4.18)$$

Utilizando o Simulink do Matlab, é possível observar a tensão sobre a lâmpada no domínio do tempo. Para isto basta entrar com a função de transferência no bloco “Transfer Fcn” e aplicar à entrada deste uma forma de onda senoidal com a amplitude e a frequência da componente fundamental da tensão de saída do inversor. A Figura 4.16 mostra o diagrama de blocos utilizado para a realização desta análise.

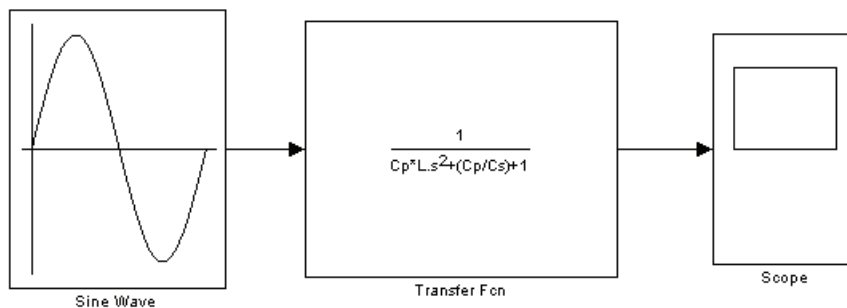


Figura 4.16 – Diagrama de blocos utilizado para verificar a tensão sobre a lâmpada.

Com este arranjo, o programa aplica a transformada inversa de Laplace à função de transferência e em seguida realiza a convolução no tempo entre a tensão de entrada e a função de transferência já no domínio do tempo. Assim, tem-se a forma de onda da tensão

sobre a lâmpada, conforme mostrada na Figura 4.17.

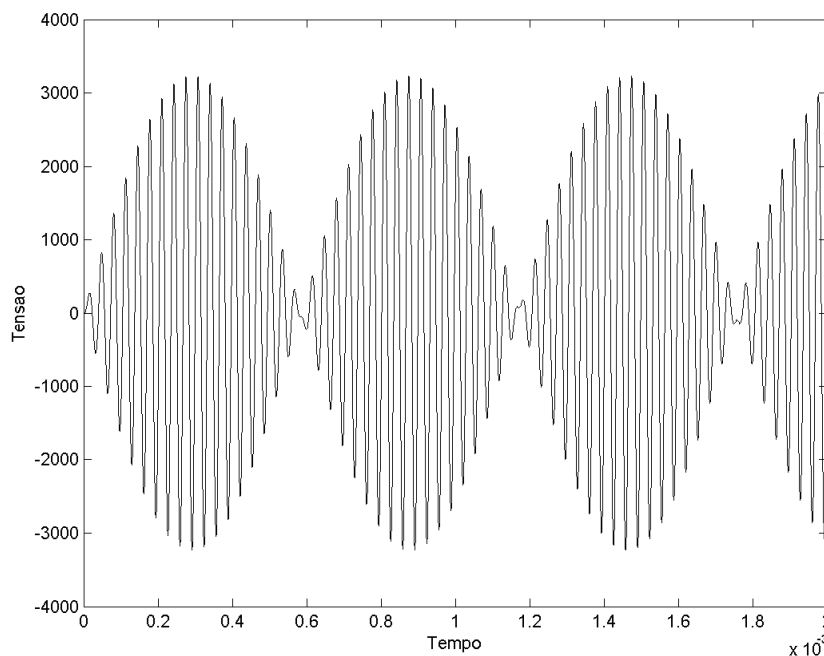


Figura 4.17 – Forma de onda da teórica da tensão de saída do inversor sem a lâmpada.

É importante ressaltar que devem ser introduzidos os valores de projeto do circuito ressonante LCC.

A tensão sobre a lâmpada apresenta um fenômeno chamado batimento. A relação entre a frequência de ressonância e a frequência de chaveamento controla o nível máximo de tensão que pode ser atingido.

As equações desenvolvidas neste capítulo serão adaptadas no capítulo seguinte para o projeto do reator 1, apresentado na Figura 1.9 do Capítulo 1, que deve atender lâmpadas VSAP de 70W e VMAP de 125W de forma dimerizada.

## 4.5 Conclusões Parciais

Primeiramente, apresentou-se neste capítulo, uma visão geral sobre reatores eletrônicos para lâmpada HID. Foi apresentado um diagrama de blocos de um reator genérico e as suas principais partes foram discutidas separadamente. Apontou-se que a topologia utilizada em reatores para lâmpadas HID pode ser a mesma de reatores utilizados

em lâmpadas fluorescentes. Foi também discutida a possibilidade de se partir uma lâmpada HID utilizando um circuito ressonante ao invés de um ignitor dedicado.

Foi discutido que o estudo de reatores eletrônicos para o acionamento lâmpadas HID de diferentes tecnologias, como é o foco deste trabalho, já foi motivo do depósito de várias patentes norte-americanas.

Para o estudo dos reatores eletrônicos, estes foram divididos em não-ressonantes e ressonantes. Os reatores não ressonantes foram discutidos de forma breve, apenas com a apresentação de algumas topologias utilizadas, já que o reator utilizado no desenvolvimento deste trabalho é do tipo ressonante.

Apresentou-se um estudo mais aprofundado dos reatores ressonantes com inversor meia-ponte. Estes foram divididos de acordo com o filtro ressonante utilizado na saída do inversor em: 1) inversor série ressonante; 2) inversor paralelo ressonante e inversor ressonante série – paralelo. Para todas estas topologias, desenvolveu-se a função de transferência que relaciona a tensão sobre a lâmpada e a tensão de saída do inversor. Foram apresentados gráficos do ganho de tensão em função da frequência normalizada de cada topologia mostrando que tanto o inversor paralelo como o inversor série-paralelo podem gerar pulsos de alta tensão capazes de provocar a ignição de lâmpadas HID. Estes circuitos apresentam ganho dependente da carga. Portanto, após a partida da lâmpada, a tensão em seus terminais cai para valores próximos aos nominais. No caso de lâmpadas que não necessitam de alta tensão para a ignição, como é o caso das lâmpada VM, a tensão de saída do circuito começa a elevar-se e a lâmpada entra em ignição antes que esta atinja valores muito altos.

Dado que o circuito inversor série-paralelo foi o selecionado para a implementação do reator proposto, foi apresentada uma sequência de projeto, baseada no método da componente fundamental. Este método considera apenas a componente fundamental da tensão de saída do inversor para os cálculos dos componentes. As demais componentes harmônicas da tensão de saída do inversor possuem amplitude reduzida e não interferem no projeto do circuito ressonante

A metodologia do projeto permite calcular o valor dos componentes do circuito LCC através da informação de alguns parâmetros. Estes parâmetros de entrada são: 1) a tensão e a resistência equivalente nominais da lâmpada; 2) o valor da eficaz do primeiro harmônico da tensão de saída do inversor, que pode ser calculado através do conhecimento

da amplitude da tensão do barramento CC; 3) a frequência de chaveamento do circuito inversor; 4) a relação entre a frequência de chaveamento e a frequência de ressonância do circuito LCC em regime permanente.

Por fim, foi realizada a modelagem matemática do circuito equivalente para o transitório de partida, na intenção de verificar a capacidade do circuito ressonante de prover a tensão necessária para a ignição da lâmpada.



# Capítulo 5

## Projeto do Reator e Resultados Experimentais

### 5.1 Introdução

Como mencionado anteriormente, o reator proposto deve alimentar lâmpadas VSAP 70W ou VMAP 125W com potência reduzida, sem que haja a necessidade de ajuste de nenhum parâmetro. O reator projetado deve, portanto, limitar a corrente nas lâmpadas e ainda gerar a sobretensão necessária para a ignição das VSAP, conforme discutido no Capítulo 4. Os processos de ignição e aquecimento das lâmpadas devem ocorrer de forma adequada para que estas entrem em regime permanente e nenhuma dúvida a respeito do seu funcionamento possa ser levantada.

Dadas as especificidades do reator a ser projetado, a simples utilização das equações desenvolvidas no capítulo anterior não é suficiente para atender a todos os objetivos propostos aqui (ignição, operação dimerizada em regime e versatilidade quanto à potência e tecnologia da lâmpada). Isto porque as equações descritas no Capítulo 4 apenas facilitam a determinação dos componentes que devem ser utilizados para que uma determinada lâmpada opere com potência nominal em uma frequência desejada.

Desta forma, desenvolveu-se uma metodologia especial para atender aos requisitos do projeto que será apresentada a seguir. As próximas seções deste capítulo fazem referência ao circuito de reator paralelo-ressonante, conforme representado de forma simplificada na Figura 5.1. Percebe-se que este reator emprega o circuito integrado dedicado IR 2153. A descrição detalhada e o dimensionamento dos componentes do circuito de disparo e do filtro capacitivo de entrada são apresentados no Apêndice 1.

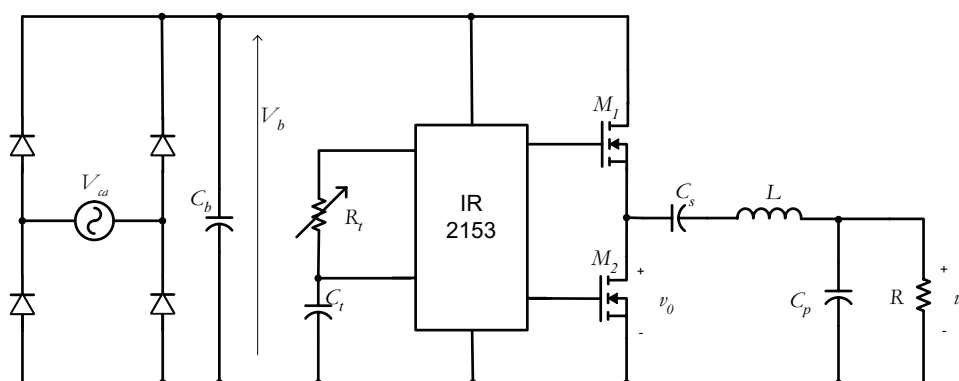


Figura 5.1 – Circuito simplificado do reator eletrônico ressonante.

## 5.2 Ensaio para a determinação da frequência de operação

A realização destes ensaios tem o objetivo de determinar faixas de frequências nas quais ambas as lâmpadas a serem testadas (VSAP 7W e VMAP 125W) não apresentem instabilidades no arco de descarga. Como comentado no Capítulo 3, a alimentação de lâmpadas HID em alta frequência pode levar à excitação da ressonância acústica. Neste trabalho, o método escolhido para evitar a ocorrência do fenômeno, foi a operação em uma faixa de frequências livre de instabilidades no arco de descarga.

Conforme descrito em [52], a operação de lâmpadas HID com potência reduzida pode fazer com que a ressonância acústica não se manifeste em frequências nas quais esta se manifestaria se a potência desenvolvida fosse a nominal. Desta forma, as janelas livres de ressonância acústica são ampliadas com a operação em potência reduzida, o que é muito interessante para a aplicação aqui descrita.

A frequência de chaveamento do circuito inversor é definida pelo par  $R_t$  e  $C_t$ . Por

simplicidade, a variação da frequência de chaveamento foi implementada através da variação da resistência  $R_r$ .

O aumento da frequência de chaveamento do inversor mantendo-se constante a tensão de barramento ( $V_b$ ) provoca a redução da potência entregue à lâmpada. Assim, os ensaios de varredura de frequências de alimentação, conforme foram realizados, podem mascarar a ocorrência da ressonância acústica em alguma frequência (dado que a potência da lâmpada vai diminuindo com o aumento da frequência). No entanto, o objetivo destes ensaios é o de detectar uma frequência na qual a lâmpada sob teste possa operar com potência reduzida sem que a ressonância acústica seja excitada. Desta maneira, estes ensaios se prestam para a determinação de uma frequência adequada para a operação do reator proposto.

A Figura 5.2, mostra o fluxograma da seqüência seguida durante o projeto de cada circuito ressonante.

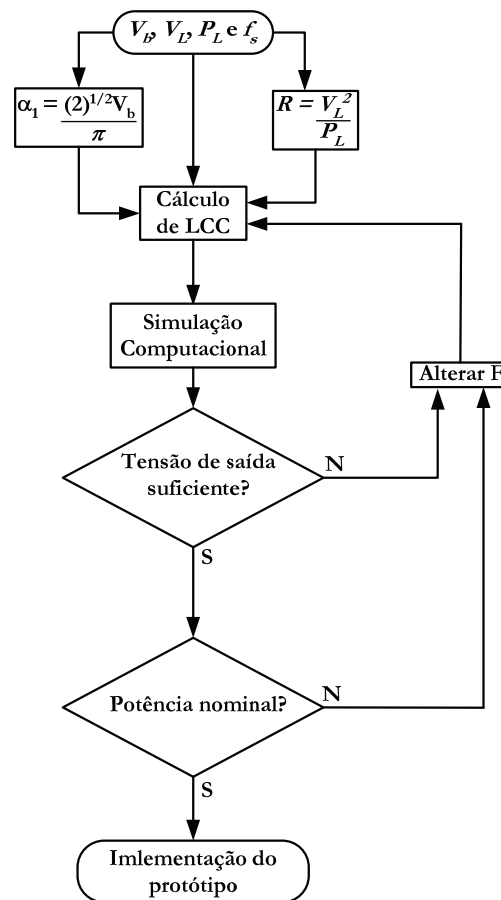


Figura 5.2 – Fluxograma do projeto do circuito ressonante.

Alguns detalhes dos procedimentos adotados serão apresentados na seqüência.

Primeiramente, foi projetado o circuito ressonante de um reator eletrônico, utilizando-se as equações desenvolvidas no Capítulo 4. Foram utilizados como dados de entrada a tensão de regime permanente da lâmpada quando acionada por um reator eletromagnético e sua potência nominal, com as quais pode-se calcular o valor da resistência equivalente da lâmpada ( $R = v_{L_{rms}}^2 / P_L$ )<sup>1</sup>, a tensão do barramento CC (com a qual se calcula o valor eficaz do primeiro harmônico da tensão de saída do inversor) e a frequência de chaveamento desejada. O valor da relação entre a frequência de chaveamento e a frequência natural de oscilação do circuito ressonante  $F$ , foi também arbitrado. Em uma primeira aproximação, optou-se por utilizar  $F = 3$ , conforme uma recomendação de [72].

Tendo sido projetado o circuito ressonante, verifica-se, através de simulação computacional, se a lâmpada opera em regime permanente com potência nominal e, no caso da lâmpada VSAP 70W, se a tensão de saída do reator é suficiente para promover a ignição. Caso uma destas condições não seja atendida, é realizado um novo cálculo dos componentes do circuito ressonante, alterando-se o valor de  $F$ . A prática mostrou que em pouquíssimos casos foi necessário realizar tal alteração.

O passo seguinte consiste na implementação do protótipo. Uma dificuldade encontrada durante a realização dos testes foi a necessidade de diferentes valores de indutância para atender a diferentes projetos do circuito LCC necessários nesta etapa. Para cada projeto, um novo indutor deveria ser calculado e confeccionado. Neste sentido, para agilizar a realização dos ensaios e também para atender a uma demanda do laboratório, foi desenvolvido, em nível de iniciação científica, uma década de indutâncias mostrado na Figura 5.3.



Figura 5.3 – Década de indutâncias.

<sup>1</sup> Como discutido anteriormente, em alta frequência a lâmpada pode ser modelada por uma resistência.

Este indutor é constituído de um enrolamento com vários “taps” permitindo a implementação de diferentes valores de indutância. Este equipamento conta também com outros três enrolamentos que podem ser associados para que maiores valores de indutância sejam alcançados. Maiores detalhes sobre este módulo podem ser encontrados em [83].

Após a implementação do projeto, passou-se para a realização dos ensaios propriamente ditos. A Figura 5.4 mostra um fluxograma com a seqüência das ações realizadas durante a realização dos ensaios.

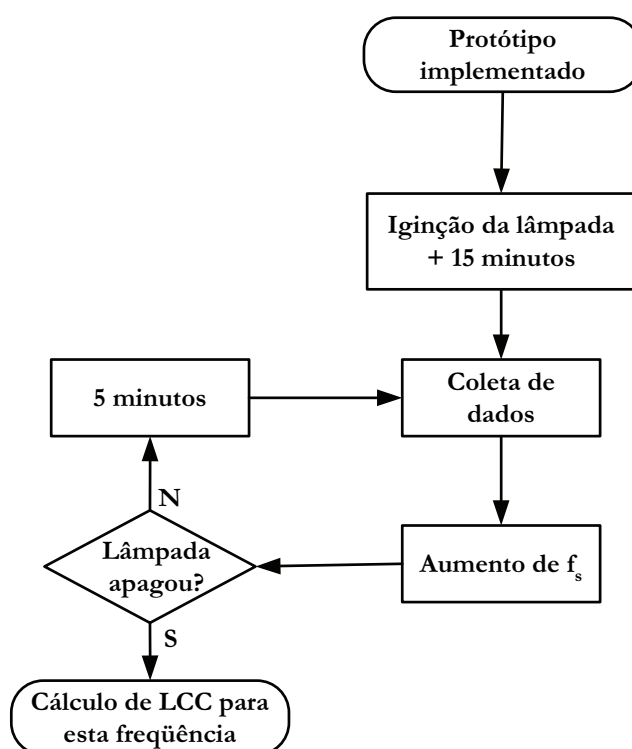


Figura 5.4 – Seqüência seguida durante a realização dos ensaios.

Ligando-se a lâmpada ao protótipo, foram aguardados 15 minutos para que a mesma passasse pelos processos de partida, aquecimento e entrasse em regime permanente [81], com tensão e corrente constantes.

Neste ponto, procedeu-se à coleta de dados. Primeiramente, utilizando um óculos especial (Figura 5.5), observou-se o comportamento do arco de descarga e a ocorrência ou não da ressonância acústica visível pôde ser verificada.



Figura 5.5 – Fotografia do óculos especial utilizado para a observação do arco de descarga.

Foram também anotados os valores de tensão, corrente, potência e frequência de operação da lâmpada. A Figura 5.6, mostra o esquema utilizado nas medições descritas. Como não se dispunha de uma sonda de corrente para medições em altas frequências, foi inserido, em série com a lâmpada, um resistor “*shunt*” de baixa resistência. Assim, para se obter o valor correto da corrente deve-se dividir o valor da tensão observada sobre o resistor pelo valor da sua resistência. Foi utilizado um resistor de composto de carbono de  $1,5\Omega/10W$ , que é mostrado na Figura 5.7. As formas de onda das tensões e correntes medidas foram observadas através do osciloscópio Tektronix TDS5034B, que permite que o valor da grandeza medida seja multiplicado por uma constante. Assim, nas medições, pôde-se observar o valor real da corrente sobre a lâmpada diretamente no equipamento.

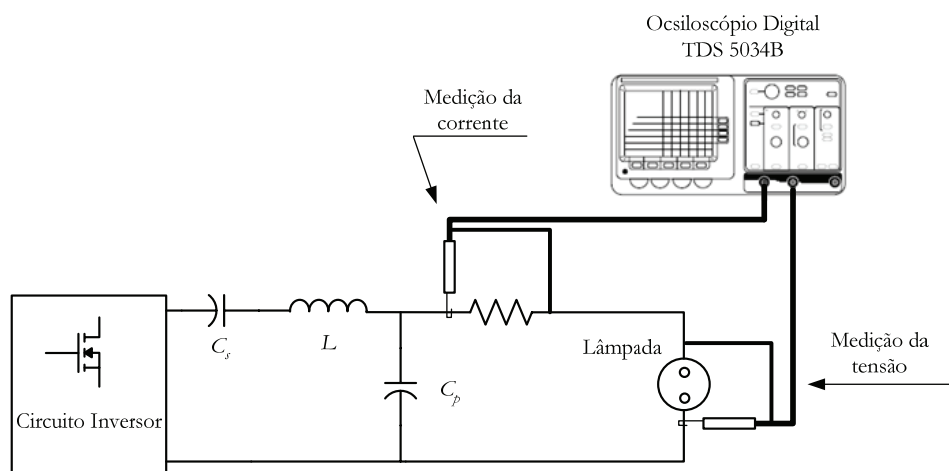


Figura 5.6 – Esquema de medição de tensão e corrente na lâmpada



Figura 5.7 – Resistor utilizado para a medição de corrente em alta frequência.

A Figura 5.8 mostra uma fotografia do aparato utilizado para as medições.

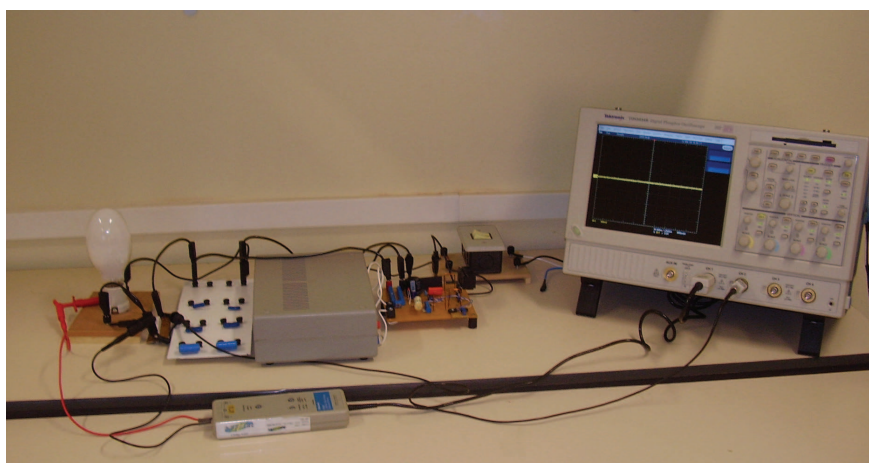


Figura 5.8 – Fotografia do esquema de medição.

Dando prosseguimento à realização dos ensaios para a determinação da frequência de operação do reator, a frequência de chaveamento circuito do inversor foi aumentada, através da diminuição da resistência  $R_f$  (foi utilizado um potenciômetro para uma rápida alteração deste valor) foram aguardados mais 5 minutos para que o arco de descarga se estabilizasse. Neste momento, realiza-se uma nova coleta de dados, observando-se o arco de descarga (com a utilização do óculos) e anotando-se os valores de tensão, corrente, potência e frequência de operação da lâmpada. Este procedimento foi repetido até que a lâmpada se apagasse. Com o aumento da frequência de chaveamento, a potência entregue à lâmpada é reduzida. Desta forma em algum momento, a potência entregue à lâmpada fica tão baixa que o arco de descarga não pode mais ser mantido, e a lâmpada se apaga. Em algumas situações, a lâmpada pode se apagar por estar operando em faixas de frequência onde a ressonância acústica é muito acentuada.

Neste ponto deve-se realizar um novo projeto do filtro ressonante que deve prover potência nominal à lâmpada na frequência em que esta se apagou.

Assim foram ensaiadas lâmpadas VSAP de 70W desde 30kHz até pouco mais de 100kHz. As lâmpadas VMAP de 125W foram ensaiadas desde 30kHz até cerca de 75kHz.

Os resultados destes ensaios são apresentados em forma de tabelas no Anexo 2.

A Tabela 5.1 mostra uma parte dos resultados obtidos com a lâmpada VSAP de referência e a Tabela 5.2 mostra uma parte dos resultados obtidos com a lâmpada VMAP de referência.

Tabela 5.1 – Resultados experimentais da lâmpada VSAP VIALOX NAV – E 70W da OSRAM.

<b>Frequência (kHz)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (mA)</b>	<b>Potência (W)</b>	<b>Resistência (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Comportamento do aro de descarga</b>
50,04	83,43	947	79,00	88,11	Arco estável
50,38	80,16	888	71,15	90,31	Arco estável
51,09	79,71	904	72,09	88,13	Arco estável
52,62	76,58	857	65,60	89,40	Arco estável
53,73	71,05	896	63,63	79,33	Arco estável
54,04	75,74	865	65,48	87,60	Arco estável
55,05	73,54	851	62,61	86,38	Arco estável
56,08	72,49	862	62,48	84,10	Arco estável
57,87	70,48	812	57,19	86,85	Arco estável
58,55	68,27	776	52,98	87,96	Arco estável
59,88	66,42	743	49,37	89,35	Arco estável
60,13	65,72	751	49,38	87,47	Arco estável
61,58	64,09	714	45,77	89,74	Arco estável
63,21	63,12	681	43,01	92,63	Arco estável
65,49	62,37	660	41,18	94,47	Arco estável
67,82	60,89	644	39,23	94,51	Arco estável
69,03	59,79	593	35,34	100,84	Arco estável
71,78	55,97	565	31,60	99,13	Arco estável
72,81	54,87	529	29,04	103,68	Arco estável
74,23	52,07	507	26,40	102,69	Arco estável
75,93	50,65	496	26,40	102,20	Arco estável



Tabela 5.2 – Resultados experimentais da lâmpada VMAP HPL – N 125W da PHILIPS.

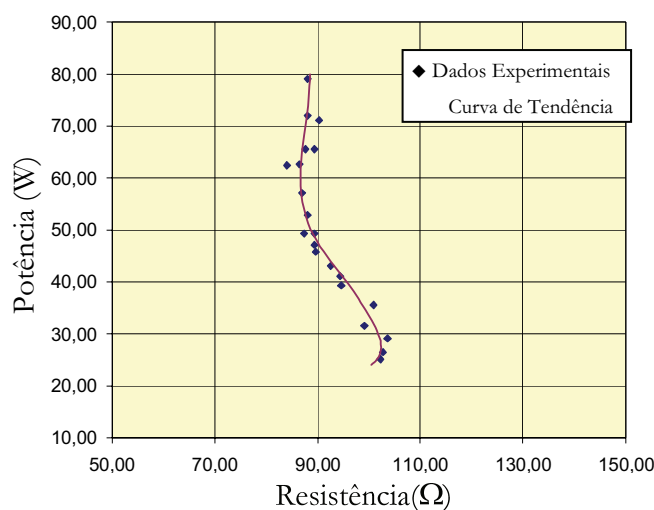
<b>Frequência (kHz)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (mA)</b>	<b>Potência (W)</b>	<b>Resistência (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Comportamento do aro de descarga</b>
39,94	133	0,903	120,05	147,34	Arco oscila
40,37	135	0,854	115,29	158,08	Arco oscila
41,36	139	0,883	122,76	157,38	Arco oscila
42,16	135	0,792	106,92	170,45	Arco oscila
42,52	138	0,846	116,75	163,12	Arco oscila
43,29	134	0,828	110,99	161,77	Arco oscila
43,99	134	0,920	123,33	145,60	Arco oscila
44,48	133	1,142	151,83	116,50	Arco oscila
45,13	134	1,265	169,58	105,89	Arco trêmulo
46,21	135	0,973	131,42	138,68	Arco com curvatura
46,55	136	1,035	140,81	131,35	Arco com curvatura
47,62	135	0,894	120,66	151,04	Arco oscila
48,17	134	0,920	123,33	145,60	Arco trêmulo
49,21	136	0,873	118,79	155,70	Arco trêmulo
50,76	142	0,701	99,53	202,60	Arco trêmulo
51,11	138	0,721	99,53	191,34	Arco trêmulo
52,08	127	0,719	91,26	176,74	Arco oscila (pouco)
52,91	123	0,656	80,66	187,57	Arco oscila (pouco)
53,42	115	0,657	75,51	175,13	Arco quase estável
54,23	119	0,583	69,40	204,05	Arco estável
55,07	115	0,564	64,83	204,00	Arco estável

As lâmpadas VSAP apresentaram um comportamento muito estável. Foram detectadas poucas faixas de frequência nas quais pode-se observar a ocorrência da ressonância acústica. Houve, inclusive, um modelo de lâmpada VSAP testada que não apresentou qualquer distorção visível do arco ao longo de toda a faixa de frequências de alimentação a que foi exposta (30kHz a 100kHz).

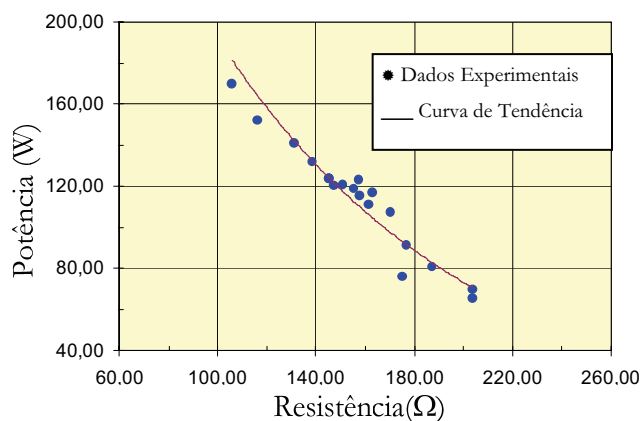
Já nas lâmpadas VMAP o arco de descarga se mostrou muito instável, e em poucas faixas de frequência o arco de descarga apresentou-se visivelmente estável.

Assim, pôde-se determinar algumas faixas de frequências nas quais ambas as lâmpadas não apresentaram instabilidades no arco (próximo aos 37kHz, próximo aos 55kHz e acima dos 70kHz). Escolheu-se então a frequência de 37kHz por ser a frequência mais baixa, e conseqüentemente, onde as perdas por chaveamento seriam menores.

Através destes ensaios pode-se também observar a característica de variação de resistência equivalente com a potência desenvolvida de lâmpadas VSAP e VMAP em alta frequência. A Figura 5.9 mostra este comportamento. Os dados apresentados nestes gráficos são os da Tabela 5.1 e da Tabela 5.2, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 5.9 – Variação da resistência equivalente com a potência desenvolvida em alta frequência. (a) Lâmpada VSAP (VIALOX NAV – E 70W da OSRAM) (b) Lâmpada VMAP (HPL – N 125W da PHILIPS).

Conforme já mencionado, estas lâmpadas (VSAP VIALOX NAV – E 70W da OSRAM e VMAP HPL –N 125W da PHILIPS) foram consideradas como lâmpadas de referência.

Pode-se observar que as lâmpadas apresentam comportamento bem distinto com a variação da potência. Enquanto as lâmpadas VMAP apresentam aumento da resistência equivalente com a diminuição da potência, as lâmpadas VSAP apresentam um valor de resistência equivalente praticamente constante para uma faixa de potências que vai desde a potência nominal até cerca de 50% deste valor [84].

Outra diferença observada na operação dimerizada das lâmpadas é que as VSAP apresentam redução da tensão de operação com a redução da potência e as VMAP trabalham com tensão praticamente constante em uma grande faixa de potências.

Como não existe uma padronização na fabricação das lâmpadas, os pontos de operação podem ser distintos para lâmpadas de diferentes fabricantes. No entanto, a característica de variação da resistência com a potência apresenta o mesmo perfil, para lâmpadas de mesma tecnologia.

Devido ao grande tempo gasto nos ensaios de varredura de frequências, optou-se por não realizar este procedimento para muitas lâmpadas. Como apresentado no Anexo 1, foram realizados ensaios com as seguintes lâmpadas:

- VSAP: PHILIPS SON PRO 70W e VIALOX NAV – E 70W (de 30kHz até 100kHz);
- VMAP: PHILIPS HPL – N 125W (de 30Hz até 75kHz).

Foram também realizados ensaios com lâmpadas VMAP de 125W de diferentes fabricantes e com tempos de utilização distintos em uma faixa de frequência mais estreita (desde 33kHz até 40kHz). Estes resultados também encontram-se apresentados no Anexo 2. A realização destes últimos ensaios pode levar à constatação de que para lâmpadas de mesmo fabricante, a faixa de frequência livre de ressonância acústica não se altera com o tempo de utilização da lâmpada. As lâmpadas ensaiadas nestas condições foram as seguintes: GE Deluxe White 125W, Philips HPL – N 125W e OSRAM HQL 125W.

Após a determinação da frequência de operação procedeu-se ao teste de outras lâmpadas. Nenhuma das lâmpadas testadas nesta frequência apresentou instabilidades no arco de descarga. Contudo, é importante salientar, mais uma vez, que todas elas foram acionadas com potência reduzida, o que pode ter mascarado a ocorrência de ressonância

acústica visível nesta frequência. Portanto, não se pode afirmar que a operação na frequência de 37kHz elimina a possibilidade da ocorrência da ressonância acústica para lâmpadas VSAP de 70W ou VMAP de 125W em potência nominal, sobretudo porque lâmpadas de diferentes fabricantes podem apresentar geometria do tubo de descarga distintas, o que faz com que as frequências críticas de operação não sejam as mesmas.

Entretanto, para a aplicação à qual o reator é destinado, os ensaios foram bastante satisfatórios. Como resultado, pôde-se determinar uma frequência segura para a operação dimerizada das lâmpadas e ainda foi possível observar as características de variação da resistência equivalente com a potência para as lâmpadas VSAP de 70W e VMAP de 125W. Estas últimas informações são muito importantes para o projeto do reator, como será descrito na próxima seção.

### **5.3 Projeto do reator para atender às lâmpadas VSAP 70W e VMAP 125W**

Tendo sido determinada a frequência de operação, o próximo passo é projetar o reator. Para que ambas as lâmpadas sejam atendidas pelo mesmo reator com potência reduzida, deve-se levar em consideração a característica de variação da potência de saída do reator em função da resistência equivalente da lâmpada, apresentadas no Capítulo 4. Plotando-se em um mesmo gráfico esta característica do reator e as relações de potência por resistência das lâmpadas (Figura 5.9) pode-se determinar o ponto de operação de cada uma das lâmpadas.

Para que as lâmpadas sejam atendidas com potência reduzida têm-se duas opções: a diminuição da tensão do barramento, ou o aumento da frequência de chaveamento do inversor [46], [77] e [85]. Por simplicidade escolheu-se a segunda opção.

Desta forma, para atender a ambas as lâmpadas com potência reduzida, deve-se projetar o reator para prover potência nominal a uma delas em uma frequência (que será denominada frequência de projeto  $f_p$ ) menor do que a frequência de chaveamento determinada pelos ensaios descritos anteriormente ( $f_i = 37\text{kHz}$ ). Assim, quando a lâmpada operar na frequência  $f_i$ , sua potência será inferior à nominal. Por outro lado, quanto maior

for a distância entre as frequências  $f_p$  e  $f_i$ , menor será o valor máximo da tensão que o reator pode gerar para a ignição da lâmpada. Como o reator deve também ser capaz de gerar a sobretensão necessária para a ignição das lâmpadas VSAP a frequência de projeto a ser utilizada deve ser cuidadosamente escolhida. Em resumo, a frequência de projeto deve ser próxima o bastante dos 37kHz para garantir a ignição das lâmpadas VSAP e distante o bastante para que as lâmpadas operem com uma redução de potência significativa.

Se um reator é projetado para alimentar uma lâmpada de 70W com potência reduzida, espera-se que uma lâmpada de 125W alimentada por este mesmo reator também venha a operar com potência abaixo da nominal. Isto será verificado mais adiante. Assim, foi escolhida como referência para o projeto do circuito ressonante a lâmpada VSAP de 70W.

Para a escolha da frequência de projeto mais adequada, foram realizados diversos projetos do circuito ressonante com frequência inferior a 37kHz. Para cada passo deste processo iterativo verificou-se se o reator poderia prover tensão de saída suficientemente elevada para ignição das lâmpadas VSAP e se ambas as lâmpadas poderiam operar em regime permanente com potência reduzida. Foi escolhido o projeto que melhor atendeu a estas exigências.

O circuito selecionado foi projetado para alimentar a lâmpada VSAP 70W com potência nominal na frequência de 31kHz. A Tabela 5.3 mostra os parâmetros utilizados no projeto selecionado.

Tabela 5.3 – Parâmetros utilizados no projeto do reator

Parâmetro	Valor
Frequência de projeto ( $f_p$ )	31 kHz
Frequência normalizada ( $F$ )	2,7
Tensão do barramento CC ( $V_b$ )	307 V
Potência nominal da lâmpada ( $P_L$ )	70 W
Tensão nominal da lâmpada ( $V_L$ )	71 V
Resistência equivalente (R) *	72 $\Omega$

\* Estimativa com operação em baixa frequência.

Apesar de o projeto dos valores dos componentes do circuito LCC terem sido

calculados para alimentação de uma lâmpada de 70W, os interruptores estáticos e o indutor utilizados foram projetados para potências superiores, desta forma o reator tem capacidade de alimentar lâmpadas com potência superior a 90W.

É interessante notar que a resistência equivalente adotada no projeto foi obtida através de dados de operação da lâmpada em baixa frequência. Este valor é inferior àquele observado em sua operação em alta frequência (próximo a  $85\Omega$ , vide Figura 5.9). No entanto, não há necessidade de se realizar um novo projeto com este valor de resistência, já que, mesmo nestas condições, a lâmpada deverá operar com potência inferior à nominal e o nível de redução da potência não foi pré-estabelecido.

Aplicando estes dados nas equações de projeto, tem-se:

$$C_s = \frac{2,7^2 - 1}{(2 \times \pi \times 31 \text{kHz}) \times \left( \frac{71V^2}{70W} \right)} \times \frac{71V}{\frac{\sqrt{2} \times 307V}{\pi}} = 230,38nF, \quad (1.1)$$

$$C_p = \frac{230,38nF}{2,7^2 - 1} = 36,6nF \quad (1.2)$$

e

$$L = \frac{2,7^2}{230,38nF \times (2 \times \pi \times 31 \text{kHz})^2} = 834,06\mu H. \quad (1.3)$$

O valor comercial mais próximo para o capacitor  $C_s$  é de 270nF. Este aumento no valor de  $C_s$  implica em um aumento do capacitor  $C_p$ . No entanto, para que a frequência de ressonância na partida não tenha seu valor muito deslocado, deve-se arredondar o valor de  $C_p$  para baixo. Como este capacitor é submetido a alta tensão de saída, chegou-se à capacitância  $C_p$  através da associação de capacitores. A Figura 5.10 mostra o arranjo utilizado.

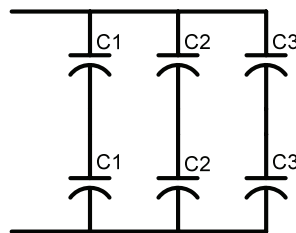


Figura 5.10 – Associação de capacitores utilizada para o capacitor  $C_p$ .

Os capacitores C1, C2 e C3, possuem, respectivamente as seguintes especificações:

- 47nF/1600V;
- 10nF/1600V;
- 1,8nF/1600V.

Desta forma, pôde-se obter um capacitor de 29,4nF para 3200V.

O indutor utilizado foi de 840μH.

Assim, o circuito ressonante utilizado tem os seguintes componentes:

- $C_s = 270\text{nF}$ ;
- $C_p = 29,4\text{nF}$ ;
- $L = 840\mu\text{H}$ .

Para verificar se a tensão de saída do inversor pode atingir um nível suficientemente alto para provocar a ignição da lâmpada VSAP na frequência de 37kHz, a tensão de saída teórica do inversor foi plotada, conforme mencionado no Capítulo 4. Este gráfico é apresentado na Figura 5.11. Vale lembrar que para a obtenção desta curva foi considerado apenas a componente fundamental da tensão de entrada.

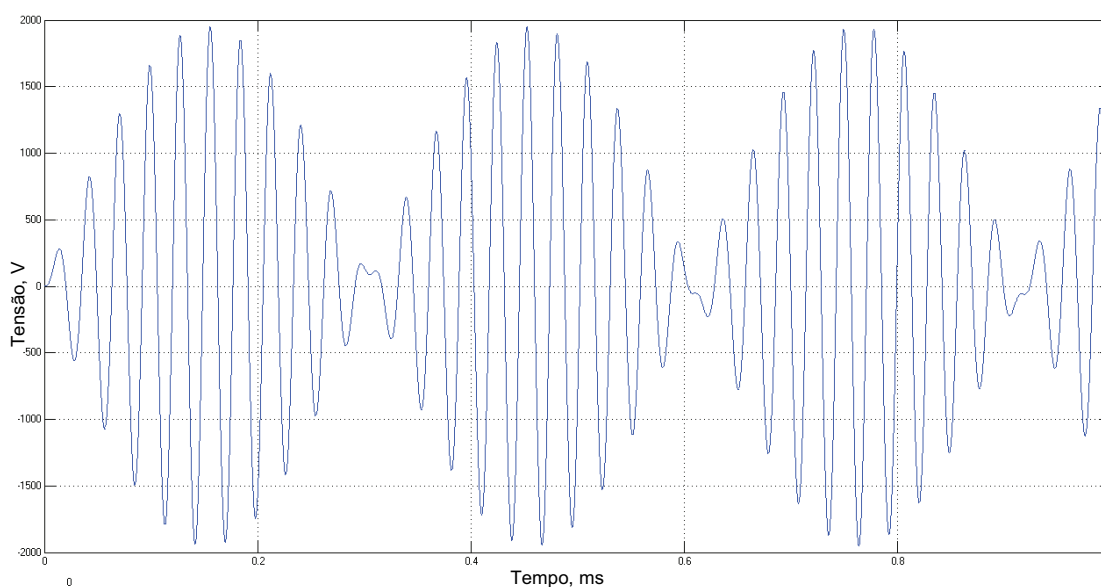


Figura 5.11 – Tensão de saída teórica do circuito ressonante sem a lâmpada na frequência de 37kHz.

Pode-se observar que o valor teórico da tensão de saída do circuito ressonante é de

cerca de 1900V. Como o pulso de tensão necessário para garantir a ignição de lâmpadas VSAP de 70W deve estar entre 1,8 e 2,5kV, este nível de tensão foi considerado suficiente. Contudo, a ignição da lâmpada utilizando-se a ressonância do circuito LCC acontece em níveis mais baixos como comentado no capítulo anterior (Seção 4.4).

O ponto de operação das lâmpadas é determinado através da intersecção entre as curvas de resistência por potência do reator e das lâmpadas, conforme mostrado na. Neste projeto o valor de  $\alpha$  encontrado foi 1,11. A definição do parâmetro  $\alpha$  foi realizada na seção 4.3.3 do Capítulo 4.

Na Figura 5.12, foi utilizada uma aproximação exponencial do tipo  $A \times e^{-B \times R}$  para a curva da lâmpada VMAP, onde  $A = 413,09$  e  $B = -0,009$ .

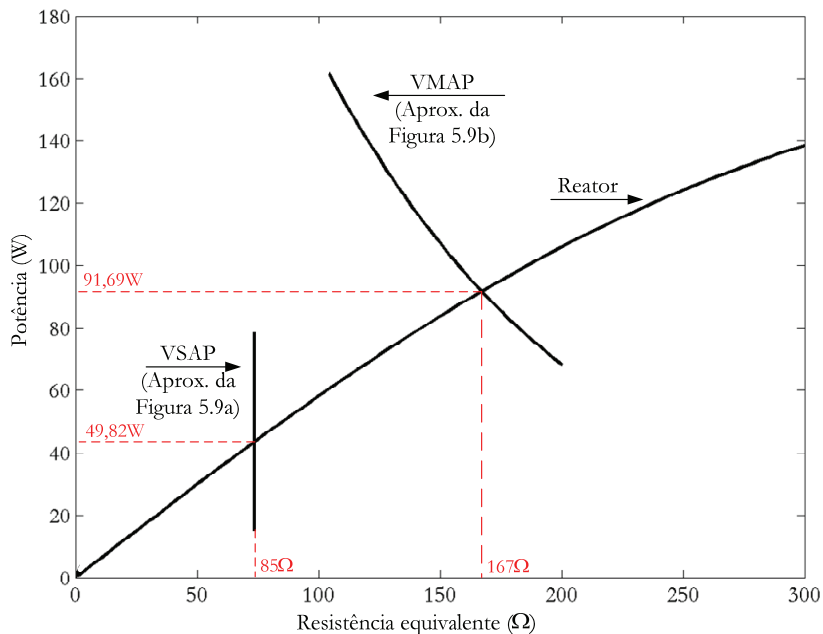


Figura 5.12 – Determinação do ponto de operação das lâmpadas.

A Figura 5.13 mostra o resultado obtido através de simulação computacional do circuito operando com 37kHz para a tensão de saída do reator sem a lâmpada. Nesta situação o resistor que simula o comportamento da lâmpada teve seu valor ajustado para 47kΩ. Esta simulação mostra o comportamento da tensão de saída do reator no caso do teste de uma lâmpada que não tenha sofrido ignição (ausência da lâmpada ou lâmpada defeituosa). Aqui a tensão de entrada não foi aproximada pela sua componente fundamental.



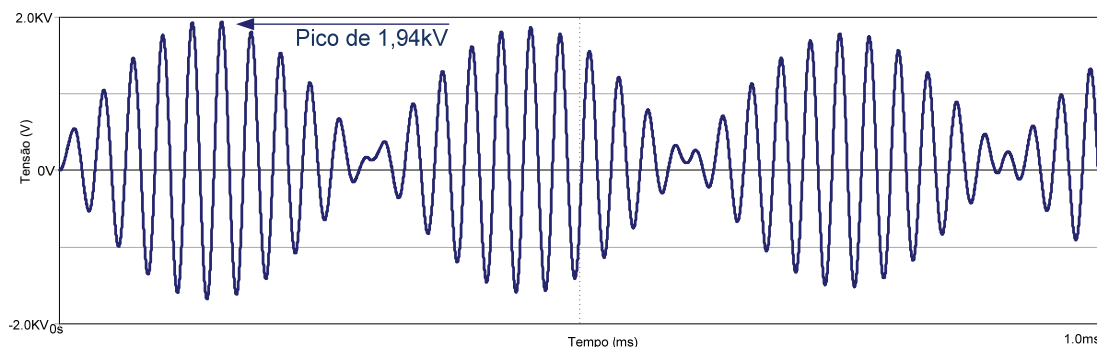


Figura 5.13 – Simulação computacional da tensão de saída do reator sem a lâmpada (reator operando com 37kHz).

O resultado obtido na simulação computacional corrobora o resultado teórico mostrando um pico de tensão de 1,94kV na saída do inversor.

As formas de onda da tensão e da corrente sobre a lâmpada VSAP de 70W em regime permanente operando com frequência e 37kHz obtidas através de simulação computacional são mostradas na Figura 5.14. Utilizou-se uma resistência de  $85\Omega$ , que é a resistência equivalente da lâmpada de referência (VIALOX NAV – E 70W).

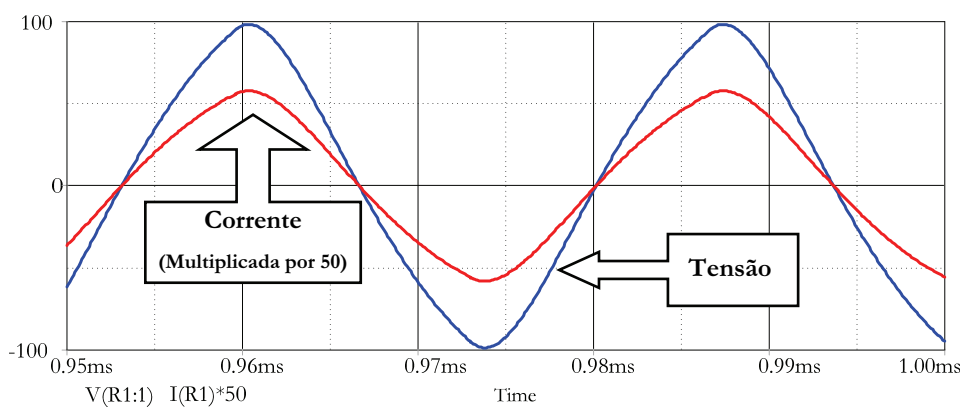


Figura 5.14 – Simulação computacional da tensão (azul) e corrente (multiplicada por 50 vermelho) da lâmpada VSAP VIALOX NAV – E 70W da OSRAM em regime permanente operando com frequência de 37kHz.

Os valores rms da tensão e da corrente na simulação foram 65,2V e 0,76A respectivamente. Assim, na simulação, a potência desenvolvida pela lâmpada foi de 49,6W.

De acordo com a Figura 5.12 a lâmpada VSAP 125W deve operar com uma

resistência equivalente de aproximadamente  $167\Omega$ . A Figura 5.15 mostra os resultados da simulação computacional para esta lâmpada.

Nesta simulação o valor eficaz da tensão foi de 124,4V e o da corrente foi de 0,74A. Com isso, a potência desenvolvida pela lâmpada foi de 92,06W.

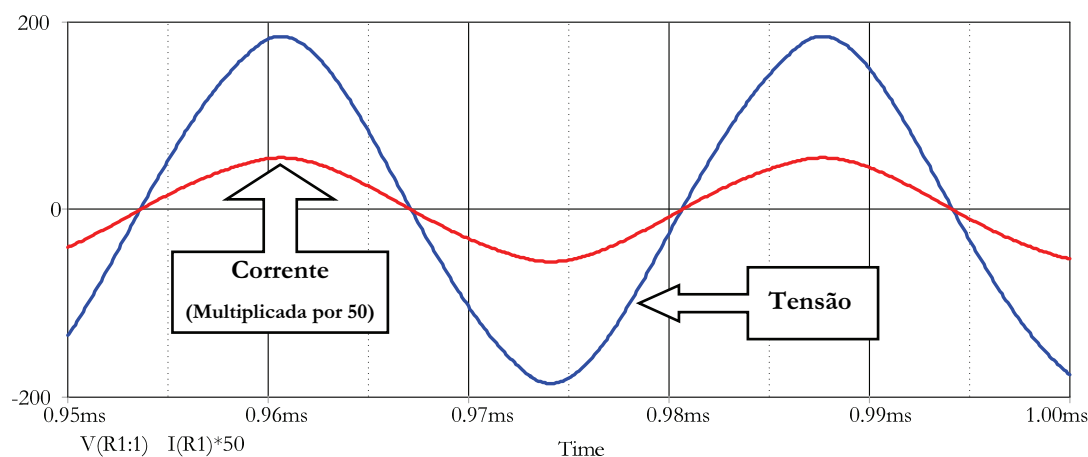


Figura 5.15 – Simulação computacional da tensão (azul) e corrente (multiplicada por 50 vermelho) da lâmpada VMAP HPL – N 125W da PHILIPS em regime permanente operando com frequência de 37kHz.

A ignição de lâmpadas VMAP acontece com nível de tensão bem inferior, conforme já discutido no Capítulo 4, portanto o seu funcionamento não é prejudicado. Desta forma, a operação da lâmpada VMAP de 125W neste reator projetado para lâmpada VSAP de 70W acontece de forma satisfatória para a realização dos testes de funcionalidade.

## 5.4 Resultados Experimentais

O próximo passo foi a implementação prática do reator e a realização de testes. A Figura 5.16 mostra uma fotografia do protótipo montado em laboratório. Se fosse projetado com critérios comerciais de compactação, este reator poderia ocupar um volume inferior a  $600\text{ cm}^3$  e pesar menos de 300g, bem menor e mais leve do que um reator eletromagnético equivalente.



Figura 5.16 – Fotografia do protótipo montado em laboratório.

Para verificar o funcionamento do circuito de controle e dos mosfets, é interessante observar a tensão de saída do inversor, mostrada na Figura 5.17.

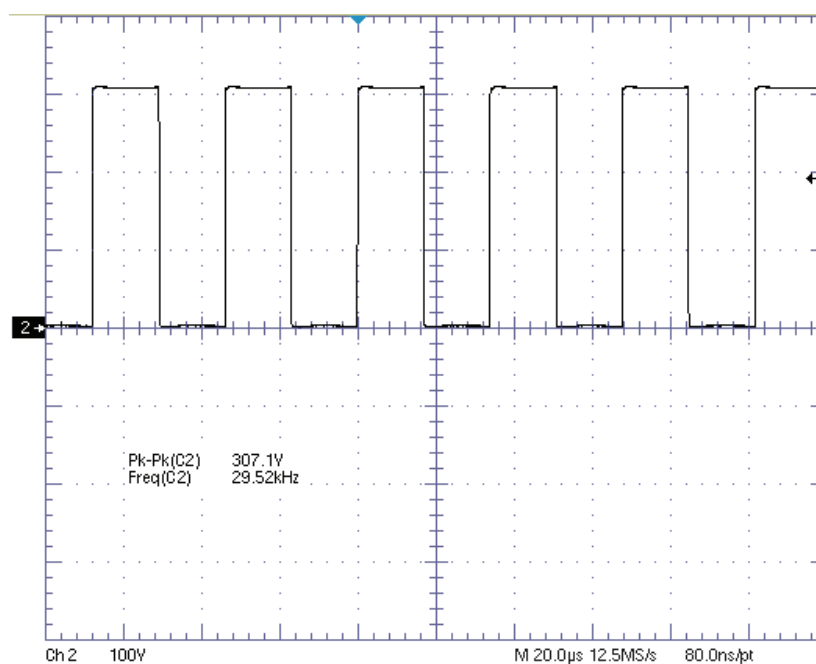


Figura 5.17 – Tensão de saída do inversor (escala vertical:100V/div, escala horizontal: 20µs/div).

O perfil retangular com tensão variando entre 0V e 307V com razão cíclica de 50% mostra o bom funcionamento do circuito de controle e das chaves semicondutoras.

Foram então realizados testes de funcionalidade de lâmpadas VSAP e VMAP novas e usadas de diferentes fabricantes. As lâmpadas novas foram testadas sem ser sazoadas, pois a verificação de unidades recém adquiridas é uma das aplicações da bancada de testes de componentes de iluminação pública. As lâmpadas devem ser testadas quando adquiridas pela concessionária para que se tenha certeza que estas podem ser levadas para a utilização

em campo. A rotina de testes de lâmpadas novas prevê o teste de algumas lâmpadas de um lote, selecionadas aleatoriamente.

As lâmpadas usadas utilizadas nos testes são lâmpadas cedidas pela concessionária e que já foram utilizadas em campo por algum tempo. Ou seja, não há como saber o tempo de utilização das mesmas.

A Figura 5.18 mostra o oscilograma da tensão de ignição da lâmpada VIALOX NAV – E 70W da OSRAM. Esta é uma lâmpada VSAP que nunca foi utilizada. Pode-se observar que o valor máximo nos terminais da lâmpada antes da ignição é de 1,15kV.

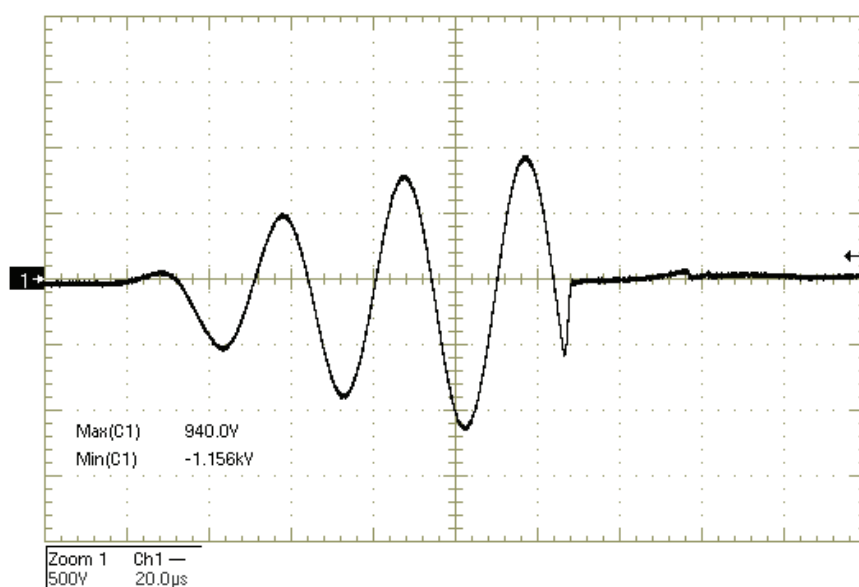


Figura 5.18 – Tensão de ignição de uma lâmpada VSAP nova, modelo VIALOX NAV – E 70W da OSRAM (escala vertical: 500V/div, escala horizontal: 20µs/div).

Após 15 minutos, esta lâmpada já passou pelos processos de ignição e aquecimento e opera em regime permanente com potência reduzida. A Figura 5.19 mostra as formas de onda da tensão e da corrente desta lâmpada nestas condições.

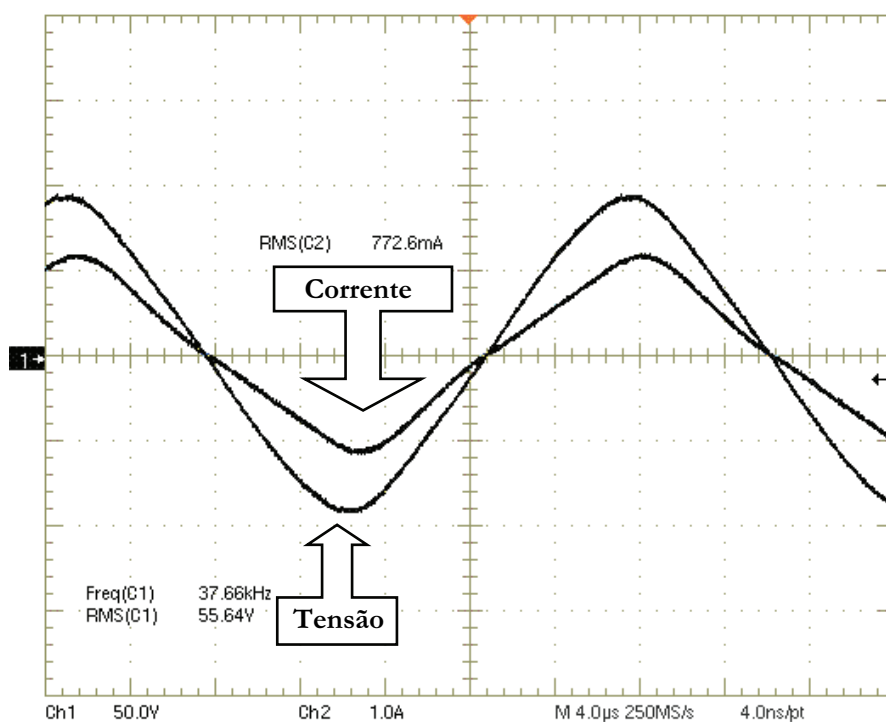


Figura 5.19 – Tensão (canal 1: 50V/div) e corrente (canal 2: 1A/div) de uma lâmpada VSAP nova, modelo VIALOX NAV – E 70W da OSRAM operando em regime permanente com potência reduzida (escala horizontal: 4µs/div).

Observa-se que as formas de onda de tensão e corrente apresentam um perfil muito próximo ao de uma senóide. O valor rms da tensão é de 55,64V e o da corrente é de 772,6mA. Com isso, a potência desenvolvida pela mesma é de 42,98W. O valor da potência desenvolvida pela lâmpada foi um pouco menor do que aquele previsto teoricamente e por meio de simulação computacional devido às perdas e não idealidades do circuito implementado. Uma grande fonte de incerteza é o valor do indutor, que foi estimado utilizando uma ponte de impedâncias digital que mede o valor do componente injetando um nível muito baixo de corrente no mesmo. Além disso, a utilização do resistor para a medição da corrente provoca uma alteração da impedância do ramo da lâmpada que acaba alterando o ponto de operação do reator. A lâmpada é alimentada com 61,40% da sua potência nominal, reduzindo significativamente o fluxo luminoso e a possibilidade de ofuscamento do operador.

Na Figura 5.20, são mostradas as formas de onda da tensão e corrente de entrada do reator medidas no teste desta mesma lâmpada. Para a medição da tensão e da corrente de entrada foi utilizado o mesmo osciloscópio digital. No entanto, a corrente foi medida

com uma sonda de corrente (A622) própria para medições em frequências de até 20kHz.

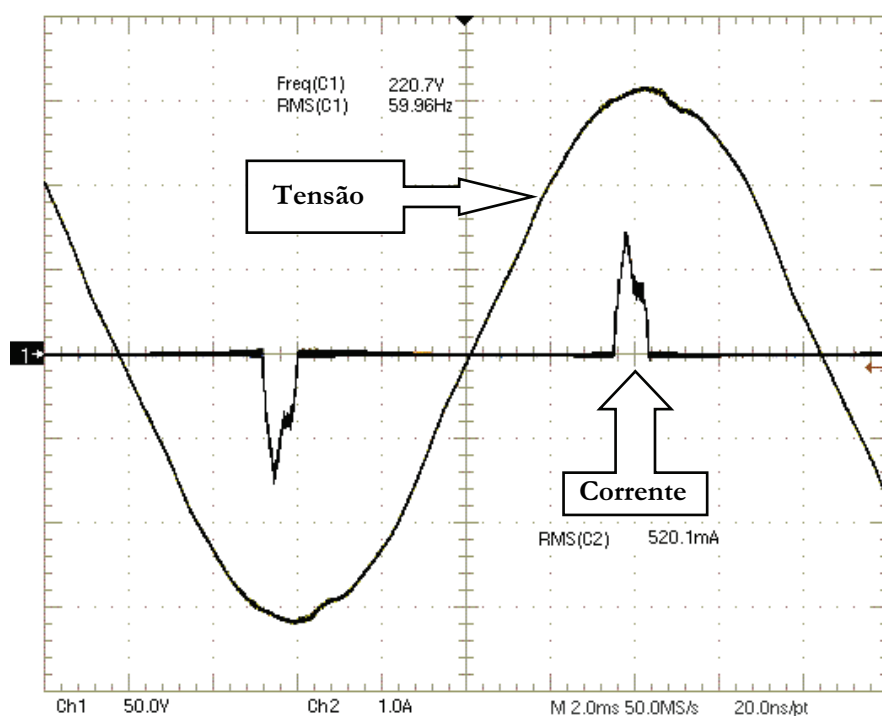


Figura 5.20 – Tensão (canal 1: 100V/div) e corrente (canal 2: 2A/div) de entrada para o teste de uma lâmpada VSAP nova, modelo VIALOX NAV – E 70W da OSRAM operando em regime permanente com potência reduzida (escala horizontal: 4,0ms/div).

A potência consumida pelo conjunto reator lâmpada é de 50,85W, o que confere ao reator um rendimento 84,52%. Se for levado em consideração (de acordo com a norma NBR 13593) que reatores eletromagnéticos para lâmpadas VSAP de 70W devem operar com um rendimento mínimo de 82% [86], se a lâmpada estiver consumindo 70W a potência máxima na entrada do reator será de 87,5W. Assim, o teste descrito na Figura 5.20 é realizado com uma redução de consumo de 36,65W, equivalente a 41,89%.

As formas de onda de tensão e corrente de uma lâmpada VMAP 125W, modelo HPL – N 125W da PHILIPS operando em regime permanente com potência reduzida são mostradas na Figura 5.21. Esta é uma lâmpada que já fora usada em campo.

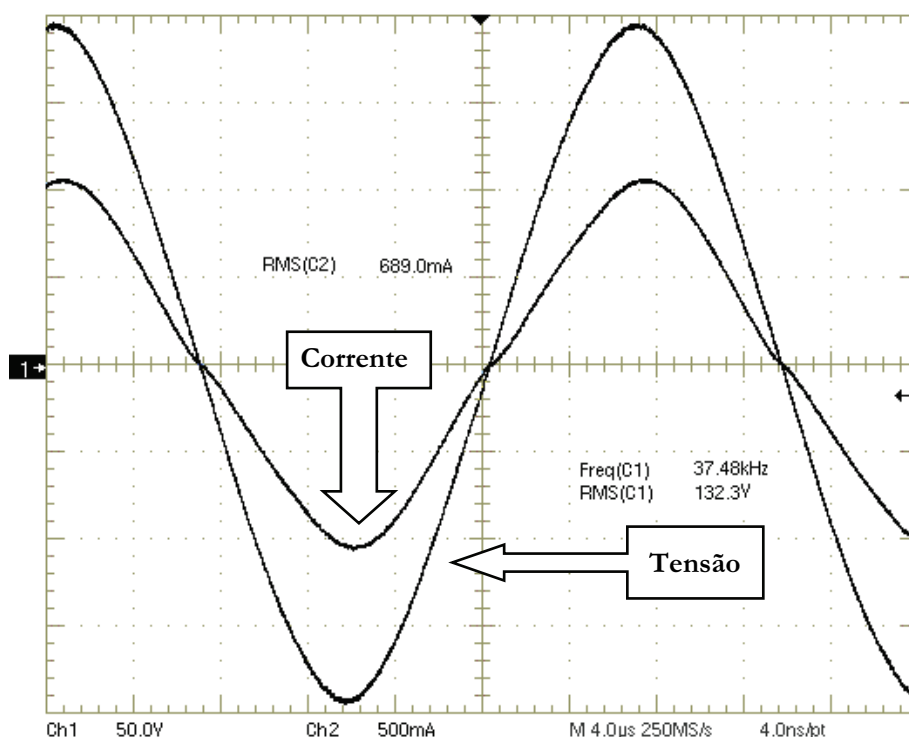


Figura 5.21 –Tensão (canal 1: 50V/div) e corrente (canal 2: 1A/div) de uma lâmpada VMAP usada, modelo HPL – N da PHILIPS operando em regime permanente com potência reduzida (escala horizontal: 4 $\mu$ s/div).

A lâmpada opera com tensão RMS de 132,3V e potência de 90,85W. Novamente a potência desenvolvida pela lâmpada tem valor um pouco inferior ao teórico e ao simulado. É interessante notar que a lâmpada opera com uma tensão de 129,9V, maior do que a tensão nominal da mesma. Isto é comum em lâmpadas HID, a medida que a lâmpada vai envelhecendo a sua tensão de regime vai crescendo. Como esta é uma lâmpada de refugo, já utilizada por um tempo indeterminado, era de se esperar que a mesma operasse com uma tensão maior do que a nominal. A lâmpada opera com 72,68% de sua potência nominal, reduzindo significativamente o fluxo luminoso emitido.

A medição das grandezas de entrada do reator para este teste são apresentadas na Figura 5.22.

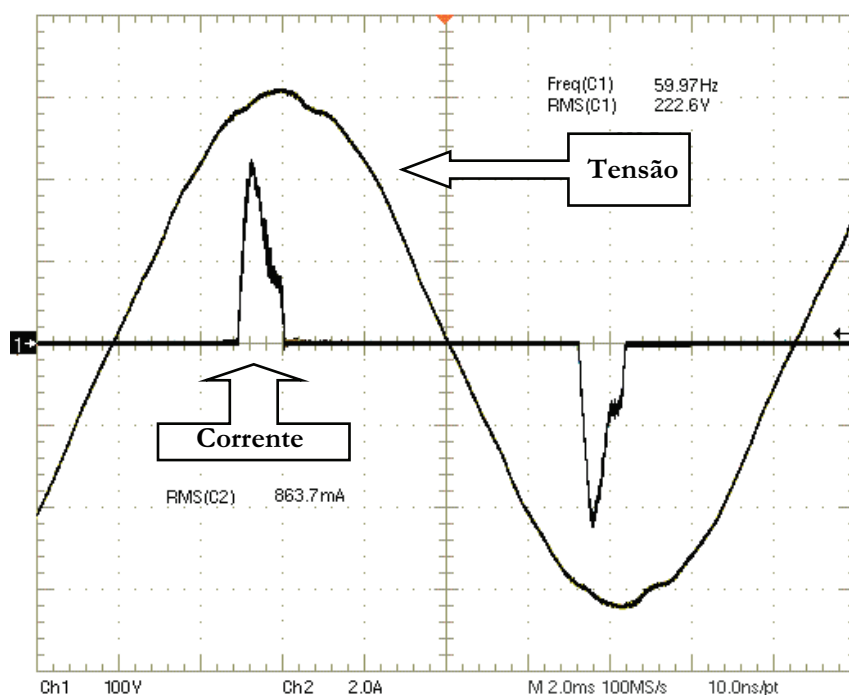


Figura 5.22 – Tensão (canal 1: 100V/div) e corrente (canal 2: 2A/div) de entrada para o teste de uma lâmpada VMAP usada, modelo HPL – N 125W da PHILIPS operando em regime permanente com potência reduzida (escala horizontal: 4,0ms/div).

O rendimento do reator neste caso é de 96,86%. De acordo com a NBR 5125, reatores eletromagnéticos para lâmpadas VMAP de 125W podem operar com rendimento mínimo de 89%. Neste caso, se a lâmpada estiver operando com potência nominal, o reator consome 140,44W. Nestas condições, o reator proposto trabalha com uma redução de 33,21% no consumo de energia elétrica.

Na Tabela 5.4 os resultados obtidos nos testes das lâmpadas de referência são apresentados.

Tabela 5.4 – Resultados obtidos com as lâmpadas de referência.

Lâmpada	VSAP 70W	VMAP 125W
Potência de entrada	50,85W	93,80W
Potência na lâmpada	42,98W	90,85W
Rendimento	84,52%	96,86%
Máxima redução no consumo	41,89%	33,21%

O estudo do rendimento ótimo do reator não é conclusivo neste trabalho, já que



foi utilizado um sistema simplificado para a realização dos ensaios preliminares e ajuste final dos parâmetros para a alimentação e ignição das lâmpadas VSAP de 70W e VMAP de 125W. Os valores de rendimento apresentados foram incluídos apenas a título de complementação e comparação entre si.

A Figura 5.23 mostra a tensão de saída do reator para o caso de uma lâmpada que não funciona. O reator pode prover uma tensão de saída de 2,0kV.

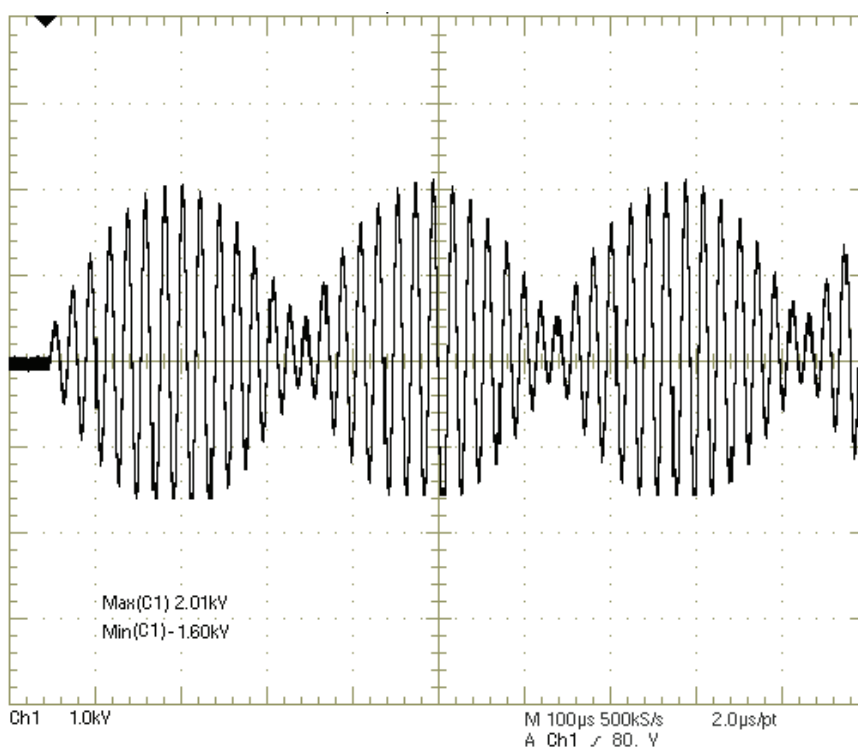


Figura 5.23 – Tensão de saída do reator sem a lâmpada.

Na Tabela 5.5 são mostrados os resultados obtidos com as lâmpadas testadas. É importante ressaltar que foram realizados testes com várias lâmpadas do mesmo modelo, na Tabela 5.5 é apresentado apenas um caso de cada fabricante e tempo de utilização. Os demais resultados foram muito similares aos apresentados e todas as lâmpadas que foram levadas a teste puderam operar com potência reduzida sem apresentarem instabilidades no arco de descarga.

Tabela 5.5 – Resultados experimentais.

<b>Lâmpada</b>	<b>Estado</b>	<b>Tensão de ignição</b>	<b>Tensão de Regime</b>	<b>Potência</b>
VIALOX NAV – E 70W (OSRAM)	Nova	1,15kV	55,64V	42,98W
VIALOX NAV – E 70W (OSRAM)	Usada	1,15kV	50,12V	45,43W
SON 70W (PHILIPS)	Nova	1,53kV	64,10V	46,65W
SON 70W (PHILIPS)	Usada	1,15kV	69,32V	48,89W
Gold Ligth 70W (SYLVANIA)	Nova	1,50kV	56,1V	40,97W
HQL 125W (OSRAM)	Nova	---	122,1V	80,70W
HQL 125W (OSRAM)	Usada	---	125,0V	82,35W
HPL – N 125W (PHILIPS)	Nova	---	120,8V	86,04W
HPL – N 125W (PHILIPS)	Usada	---	132,3V	90,85W
Deluxe White 125W (GE)	Usada	---	122,9V	80,27W

Pode-se notar que todas as lâmpadas puderam operar em regime permanente com potência reduzida. É interessante observar que o nível de tensão mais elevado necessário para a ignição das lâmpadas VSAP foi de 1,53kV para a lâmpada SON 70W da PHILIPS nova.

## 5.5 Conclusões Parciais

Neste capítulo foi apresentada uma metodologia desenvolvida para a determinação da frequência de operação do reator. Foram realizados ensaios de varredura de frequências de operação para lâmpadas VSAP e VMAP. Algumas faixas de frequência livres de ressonância acústica com potência reduzida comuns às duas lâmpadas foram encontradas. Selecionou-se a frequência de 37kHz para a operação do reator.

Não se pode afirmar que esta frequência é livre de ressonância acústica para todos os casos, já que as lâmpadas foram testadas sob potência reduzida, o que pode vir a mascarar a ocorrência do fenômeno da ressonância acústica. No entanto, para a operação em potência reduzida não se observou instabilidades significativas no arco de nenhuma das lâmpadas levadas a teste.

Através destes ensaios pode-se observar que as lâmpadas VMAP e VSAP apresentam diferentes características de variação da resistência equivalente com a potência. Enquanto as VMAP apresentam uma resistência que cresce à medida que a potência desenvolvida diminui, as VSAP apresentam resistência equivalente praticamente constante para potências acima de 50% do seu valor nominal. Estas características são provenientes do fato que as lâmpadas VMAP trabalham com tensão praticamente constante quando dimerizadas e as VSAP apresentam redução da tensão de regime permanente com a redução da potência.

Foi apresentado, na seqüência, o exemplo de um projeto do filtro ressonante baseado na metodologia apresentada no Capítulo 4. Para que o reator pudesse operar a lâmpada com potência reduzida, decidiu-se projetar o reator para prover potência nominal em uma frequência inferior à frequência de operação. Através de um processo iterativo, chegou-se em um circuito ressonante capaz de operar as lâmpadas com potência reduzida na frequência de 37kHz e ainda gerar os pulsos de tensão necessários para a ignição da lâmpada. Apresentou-se resultados teóricos e de simulação da tensão de saída máxima gerada pelo reator. Além disso, pôde-se fazer uma previsão da potência de operação de duas lâmpadas consideradas como referência (VSAP VIALOX NAV – E 70W da OSRAM e HPL – N 125W da PHILIPS). Foram utilizadas lâmpadas de referência para poder comprovar o estudo teórico, já que não existe uma padronização quanto à fabricação das lâmpadas HID.

Os resultados dos testes realizados com lâmpadas de diferentes fabricantes e tempos de utilização mostraram a viabilidade da realização de testes de funcionalidade de lâmpadas utilizando o reator proposto. Destaca-se a redução no consumo de energia alcançado na realização dos testes. Vale ressaltar que o estudo conclusivo sobre o rendimento do reator não foi realizado, uma vez que foi implementado um sistema simplificado para a realização dos testes.

Como fato interessante, que confirma muitos estudos apresentados na literatura, pôde-se observar que a ignição das lâmpadas VSAP utilizando a ressonância do circuito LCC ocorre com níveis de tensão inferiores àquele necessários com reatores eletromagnéticos (em baixa frequência). Nos resultados apresentados, a lâmpada que precisou de maior tensão para a ignição foi a SON 70W da PHILIPS quando nova. Para a ignição desta lâmpada a tensão chegou a 1,53kV.

# Capítulo 6

## Conclusões Finais

Este trabalho propôs uma topologia de reatores eletrônicos para testes de lâmpadas de descarga em alta pressão de vapor de sódio e de vapor de mercúrio. A motivação do estudo deste reator eletrônico é a diminuição do volume e do peso de uma bancada de testes de componentes de iluminação pública, uma vez que o reator proposto deve substituir um conjunto de oito reatores eletromagnéticos volumosos e pesados.

O circuito proposto é composto de um retificador central com estágio de correção de fator de potência que alimenta três unidades de reator eletrônico, cada uma dedicada ao teste de funcionalidade de um grupo de lâmpadas. O presente estudo focou-se no projeto, execução e testes do reator destinado a atender às lâmpadas VSAP de 70W e VMAP de 125W. Tal reator deve alimentar as lâmpadas sob teste com potência reduzida e não deve provocar o aparecimento do fenômeno da ressonância acústica.

A topologia do reator proposto emprega um inversor “*half-bridge*” com filtro série - paralelo ressonante (LCC). As lâmpadas são alimentadas com onda praticamente senoidal de alta frequência. Para que a ressonância acústica não seja excitada, optou-se por operar o circuito inversor em uma frequência em que a mesma não se manifestasse de forma visível. Este método foi escolhido por sua simplicidade e pelo fato de que a operação em potência reduzida possui a particularidade de ampliar as faixas livres de ressonância acústica.

O projeto do reator também foi idealizado de forma a garantir a tensão necessária para a ignição das lâmpadas VSAP, aproveitando-se das características da ressonância do

circuito LCC e dispensando a necessidade de um circuito dedicado à ignição.

Para a determinação da frequência de operação, foram realizados testes de varredura de frequências de operação. Como resultados destes testes, pôde-se encontrar algumas faixas de frequência nas quais tanto as lâmpadas VSAP de 70W quanto as VMAP de 125W testadas não apresentaram ressonância acústica visível. Selecionou-se a frequência de 37kHz para a operação do circuito inversor.

Tendo sido determinada a frequência de chaveamento do circuito inversor, foi projetado o circuito série-paralelo ressonante de um reator para operar a lâmpada VSAP de 70W com potência nominal na frequência de 31kHz. Assim, quando o circuito inversor é comutado na frequência de 37kHz, a lâmpada é alimentada com potência reduzida (dimerizada). A frequência de projeto, ou seja, 31 kHz, foi escolhida a fim de que o reator apresentasse na saída uma tensão elevada o suficiente para a ignição das lâmpadas VSAP, já que o distanciamento entre as frequências de projeto e de operação leva à diminuição desta tensão.

O mesmo reator, operando também em 37kHz pôde alimentar a lâmpada VMAP de 125W com potência reduzida. O ponto de operação da lâmpada VMAP de 125W pôde ser determinado plotando-se a característica de variação da potência de saída do reator em função da resistência conectada aos seus terminais no mesmo gráfico da característica de resistência versus potência da lâmpada.

Foram realizados testes com lâmpadas de diferentes fabricantes encontradas no mercado brasileiro e com tempos de uso distintos. Todas as lâmpadas levadas a teste puderam operar em regime permanente de forma dimerizada, sem a detecção de instabilidades visíveis no arco de descarga.

No Capítulo 1 foi apresentado um breve histórico sobre a iluminação pública e a atual situação do sistema de iluminação pública nacional, destacando a utilização de reatores eletromagnéticos. Ainda neste capítulo foi discutida a importância da manutenção dos sistemas de iluminação pública. Por fim, foi apresentada a proposta do trabalho, que é motivada pela redução do volume e do peso de uma bancada de testes de componentes de iluminação pública desenvolvida na Universidade Federal de Juiz de Fora como um dos frutos de uma parceria da mesma com a Companhia Força e Luz Cataguases Leopoldina (atual Energisa).

Descreveu-se, no Capítulo 2, o funcionamento de lâmpadas HID com maior

enfoque para as lâmpadas VSAP e VMAP que são alvo do trabalho.

O fenômeno da ressonância acústica, que é apontado como um dos principais fatores para o retardo da popularização de reatores eletrônicos para lâmpadas HID, foi discutido no Capítulo 3. Discutiram-se as conseqüências e os fatores que levam a ocorrência das instabilidades no arco de descarga. Foram apresentados métodos de detecção e métodos de alimentação da lâmpada que evitam a excitação da ressonância acústica.

O Capítulo 4 destinou-se ao estudo de reatores eletrônicos para lâmpadas HID. Estes reatores foram divididos em reatores não-ressonantes e ressonantes. Os reatores ressonantes foram abordados de forma mais aprofundada. O reator escolhido no projeto foi o ressonante série-paralelo, já que sua topologia viabiliza obter a sobretensão necessária para a ignição das lâmpadas VSAP. Para esta topologia foi apresentada a metodologia de projeto que permite o cálculo dos componentes do circuito ressonante de forma a garantir a operação em regime permanente e ainda promover a sua ignição.

Os resultados experimentais e os testes realizados em laboratório compuseram o conteúdo do Capítulo 5. Nesta seção também foi descrito o desenvolvimento dos testes que levaram à escolha da frequência de chaveamento do reator e a metodologia desenvolvida para o projeto do circuito série-paralelo ressonante de modo a acionar lâmpadas de diferentes potências de forma dimerizada.

A realização deste estudo levou a muitas reflexões e a proposição de trabalhos futuros com temas relacionados que não puderam ser aqui discutidos, a saber:

- Implementação completa do sistema eletrônico de reatores da Figura 1.9, que se propõe a substituir o conjunto de oito reatores eletromagnéticos atualmente utilizados na bancada de testes de componentes de iluminação pública. A metodologia apresentada neste trabalho deve facilitar bastante o projeto das demais unidades de reator eletrônico a serem utilizadas.
- Estudo do rendimento ótimo do reator apresentado, como uma etapa preliminar à implementação do sistema eletrônico de reatores proposto.
- Implementação de proteções e do circuito de correção do fator de potência do reator proposto.
- Estudo da utilização de topologias não ressonantes na realização de testes de funcionalidade de lâmpadas com potência reduzida.

- Implementação de um reator universal para lâmpadas HID que possa acionar lâmpadas de diferentes potências, tecnologias, modelos e fabricantes, com mínimo de ajustes de parâmetros.

A seguir é listada a produção científica resultante deste trabalho:

1. V. S. Lacerda, C. R. B. S. Rodrigues, D. P. Pinto, P. G. Barbosa, H. A. C. Braga, “Proposta de um Sistema de Reatores Eletrônicos Integrante de uma Bancada de Testes de Lâmpadas HID.” *XVII Congresso Brasileiro de Automática (XVII CBA)*, Juiz de Fora, MG, setembro de 2008. (Artigo publicado).
2. C. R. B. S. Rodrigues, V. S. Lacerda, L. F. A. Guedes, H. A. C. Braga. “Design of an Electronic Ballast for two High-Pressure Mercury Lamps, 125W and 250W, in Dimmed Operation.” *VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais (VIII INDUSCON)*, Poços de Caldas, MG, agosto de 2008. (Artigo publicado).
3. C. R. B. S. Rodrigues, L. F. A. Guedes, M. C. B. P. Rodrigues, H. A. C. Braga. “Single Electronic Ballast for HPS and HPMV Lamp Testing.” *X Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (X COBEP)*, Bonito, MS, Brasil, 2009. (Artigo aprovado).
4. C. R. B. S. Rodrigues, H. A. C. Braga. “Reator Eletrônico para o Teste Eficiente de Lâmpadas de Vapor de Sódio e Mercúrio em Alta Pressão.” *III Congresso Brasileiro de Eficiência Energética (III CBEE)*. Belém, PA, 2009. (Artigo submetido).
5. C. R. B. S. Rodrigues, H. A. C. Braga. “Reator Eletrônico Eletrônico Ressonante Orientado ao Teste Dimerizado de Lâmpadas de Vapor de Mercúrio e de Vapor de Sódio em Alta Pressão.” *Revista Sobreap*. (Artigo em fase de execução).



# Referências Bibliográficas

- [1] V. R. Vidal, *Curiosidades (como se aprende, distraindo-se)*, 1º Volume, 8ª Edição. Rio de Janeiro: Conquista, 1962.
- [2] [br.geocities.com/andreapons\\_pbi/site3.html](http://br.geocities.com/andreapons_pbi/site3.html) (acessado em 01/12/2008).
- [3] Illuminating Engineering Society of North America (IESNA). The IESNA Lighting Handbook [CD-ROM].
- [4] <http://www.mlahanas.de/greeks/lamps.htm> (acessado em 01/12/2008).
- [5] <http://inventors.about.com/od/1startinventions/a/lighting.htm> (02/12/2008).
- [6] <http://www.dec.ufcg.edu.br/biografias/AimeArgan.html> (10/12/2008).
- [7] [http://commons.wikimedia.org/wiki/Oil\\_lamps](http://commons.wikimedia.org/wiki/Oil_lamps) (10/12/2008).
- [8] <http://geocities.com/jcc5001/museuvaladejablochhoff.htm> (10/12/2008).
- [9] G. J. C. Costa, *Iluminação Econômica – Cálculo e Avaliação*. 4ª Edição. Porto Alegre: EIDPUCRS – Coleção Engenharia, 2006.
- [10] V. A. Moreira, *Iluminação Elétrica*. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1999.
- [11] R. N. Marques, *Reatores de Baixo Custo e Baixa Potencia*. Monografia de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, Brasil, 2001.
- [12] R. N. Marques, *Reatores de Baixo Custo e Baixa Potencia*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, Brasil, 2003.
- [13] L. L. F. Silva, *Iluminação Pública no Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais*. Dissertação de M. P. E., Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- [14] Revista Juiz de Fora – Jornal do Brasil. Ano 1 – 27 de julho de 1997.
- [15] R. Barbosa, J. G. P. Almeida, I. M. T. Araújo, A. L. N. La Rovere, *Manual de Iluminação Pública Eficiente*. Rio de Janeiro: PROCEL/Eletrobrás, 1998.
- [16] A. R. Seidel, M. Polonskii, *Reatores Eletrônicos para Iluminação Fluorescente*. Ijuí: Editora UNIJUI, 2008.

- [17] J. C. Ragone, S. R. Abreu, M. C. B. Rodrigues, M. V. Ribeiro, D. P. Pinto, H. A. C. Braga, “Uma Proposta de Redução de Custos no Gerenciamento e na Manutenção de Redes de Iluminação Pública.” *IV Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (IV CITENEL)*, Araxá, novembro, 2007.
- [18] G. A. Soares, “Contribuições à Resolução Normativa – Audiência Pública 021/2005”, ANEEL – Eletrobrás, 2005.
- [19] Catálogo de Lâmpadas de Descarga de Alta Intensidade (HID) HPL-N (Vapor de Mercúrio). PHILIPS. Agosto de 2007.  
Disponível em: <http://www.luz.philips.com/archives/HPLNAgost2008.pdf> (Acessado em 18/03/2009).
- [20] Catálogo de Lâmpadas de Descarga de Alta Intensidade (HID) SON-H Pró (Vapor de Sódio). PHILIPS. Agosto de 2007.  
Disponível em: <http://www.luz.philips.com/archives/SONPRO2008.pdf> (Acessado em: 18/03/2009).
- [21] Catálogo de Lâmpadas de Descarga em Alta Pressão. OSRAM. Disponível em: [http://www.osram.com.br/osram\\_br/Ferramentas\\_%26\\_Downloads/pdf/Arquivos/Illuminacao\\_Geral/Catalogo\\_Geral\\_2008-2009/OSRAM\\_catalogo0809\\_descarga.pdf](http://www.osram.com.br/osram_br/Ferramentas_%26_Downloads/pdf/Arquivos/Illuminacao_Geral/Catalogo_Geral_2008-2009/OSRAM_catalogo0809_descarga.pdf) (Acessado em 18/03/2009).
- [22] Programa Nacional de Iluminação Pública Eficiente – Reluz. Elaborado pela Eletrobrás através do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica PROCEL, PROCEL/Eletrobrás, 2004.
- [23] F. L. Tomm, *Projeto de Reatores Eletrônicos para HID Baseado no Conversor Chopper AC*. Dissertação de Mestrado., Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil, 2007.
- [24] G. Casa, F. Veroni, “A New Way To Manage Public Lighting.” *IEEE Meeting and Tariffs for Energy Supply*, No. 462, pp, 91 – 95, maio, 1999.
- [25] U. C. F. Filho, A. N. Gomes, “Metodologia para Redução de Perdas Comerciais em Iluminação Pública.” *XIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (XIII SENDI)*, São Paulo, 1997.

- [26] J. H. Peterson, "The Development of a Street Light Fault Monitoring Device." *IEEE Colloquium on Motorway Widening Opportunities for New Communications and Lighting*, pp. 8/1 – 8/3. 1991,
- [27] D. P. Pinto, H. A. C. Braga, J. C. Ragone, "Desenvolvimento de uma Metodologia Integrada de Gestão para Avaliação do Desempenho Operacional das Redes de Iluminação Pública Baseado na Qualidade e na Vida Útil dos Materiais." *Projeto P&D ANEEL*, ciclo 2004/2005.
- [28] V. S. Lacerda, C. R. B. S. Rodrigues, D. P. Pinto, P. G. Barbosa, H. A. C. Braga, "Proposta de um Sistema de Reatores Eletrônicos Integrante de uma Bancada de Testes de Lâmpadas HID." *XVII Congresso Brasileiro de Automática (XVII CBA)*, Juiz de Fora, MG, setembro de 2008.
- [29] F. R. C. Filho., *Sistema de Auto-Teste de Reatores Eletromagnéticos, Integrante de uma Bancada de Avaliação Funcional de Componentes Usados na Iluminação Pública*. Monografia de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, Brasil, 2008.
- [30] J. R. Coaton, A. M. Marsden, *Lamps and Lighting*, 4ª Edição. Londres: Arnold, 1997.
- [31] F. S. Cavalcanti. *Reatores Eletrônicos para Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão de 70W*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, Brasil, 2001.
- [32] S. A. Wuerges, *Reator Eletrônico para Lâmpada de Vapor de Sódio de Alta Pressão de 250W sem Estágio de Correção de Fator de Potência*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, Brasil, 2004.
- [33] A. S. André, *Sistema Eletrônico para Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, Brasil, 2004.
- [34] A. L. Batschauer, *Projeto de Reatores Eletrônicos para Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão de 250W e 400W*. Dissertação de M. E. E., Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, Brasil, 2002.

- [35] J. G. García, *Balatos Eletrônicos no Resonantes para Lâmparas de Alta Intensidad de Descarga: Aportaciones en el Circuito de Arranque y en las Etapas de Calentamiento e Régimen Permanente*. Tese de Doutorado, Universidad de Oviedo, Gijón, Astúrias, Espanha, 2003.
- [36] G. Zissis, J. J. Damelinourt, T. Bezanahy, “Modeling Discharge Lamps for Electronic Circuits Designers: A Review of the Existing Methods.”
- [37] H. H. Cardoso, R. N. Marques, P. G. Barbosa, H. A. C. Braga. “Modelos de Lâmpadas Fluorescentes Visando simulação no Pspice.” *XIV Congresso Brasileiro de Automática (XIV CBA)*, Natal, RN, Brasil, vol. 1, pp. 15-21, 2002.
- [38] H. H. Cardoso, R. N. Marques, H. A. C. Braga. “A new Pspice Fluorescent Lamp Model Based on the Exponential Functions.” *VII Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (VII COBEP)*, Florianópolis, SC, Brasil, 2003.
- [39] D. Smith, H. Zhu. “Properties of High Intensity Discharge Lamps Operating on Reduced Power Lighting Systems.” *Journal of the IES*. Vol. 22, No. 2, pp. 27 – 39, 1992.
- [40] <http://www.lamptech.co.uk> (acessado em 02/12/2008),
- [41] C. R. B. S. Rodrigues, V. S. Lacerda, L. F. A. Guedes, H. A. C. Braga. “Design of na Electronic Ballast for two High-Pressure Mercury Lamps, 125W and 250W, in Dimmed Operation.” *VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais (VIII INDUSCON)*, Poços de Caldas, MG, agosto de 2008.
- [42] J. G. García, J. Cardesín, J. Ribas, A. J. Calleja, M. Rico-Secades, J. M. Alonso. “Using High Frequency Current Square Waveforms to Avoid Acoustic Resonances in Low Wattage Metal Halide Lamps.” *35<sup>TH</sup> Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, 2004.
- [43] M. Toss, *Estudo e Desenvolvimento de um Reator Eletrônico para Lâmpada de Alta Pressão de Vapor Metálico com Sistema de Eliminação da Ressonância Acústica*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS). Porto Alegre, RS, 2004.
- [44] M. A. Dalla Costa, *Compensación de Resonancias Acústicas en Lámparas de Descarga em Halogenuros Metálicos por Medio de Onda Cuadrada de Baja Frecuencia: Caracterización de Lámparas y Propouesta de Nuevas Topologías de Alimentación*. Tese de Doutorado, Universidad de Oviedo, Gijón, Astúrias, Espanha, 2008.

- [45] J. Zhou, L. Ma, Z. Qian, "A Novel Method for Testing Acoustic Resonance of HID Lamps." *14<sup>th</sup> Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1999 (APEC'99)*. Dallas, TX, USA, vol. 1, pp. 480-485, 1999
- [46] W. Yan, S. Y. R. Hui. "Experimental Study on Acoustic Resonance Phenomena in Ageing High-Intensity Discharge Lamps" *Science, Measurement and Technology IEE Proceedings*, vol. 153, no. 5, September 2006.
- [47] H. L. Witting. "Acoustic Resonances in Cylindrical High-Pressure Arc Discharges." *Journal of Applications in Physics*, vol. 49, no. 5, pp. 2680 – 2683, may 1978.
- [48] W. Yan, S. Y. R. Hui. "An Improved High-Intensity Discharge Lamp Model Including Acoustic Resonance Effect on the Lamp Arc Resistance" *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 6, November 2004.
- [49] S. Bhosle, J. B. Rouffet, D. Buso, M. Aubès, G. Zissis. "Modeling of Acoustic Resonance in HID Lamps – Coupling Between Standing Waves and Arc Bending." *42<sup>nd</sup> Industry Applications Conference, 2007 (IAS '07), Annual Meeting*. New Orleans, Los Angeles, USA. pp. 478, 2007
- [50] J. W. Denneman. "Acoustic Resonances in High Frequency Operated Low Wattage Metal Halide Lamps." *Philips Journal of Research*, vol. 38, no. 4 – 5, 1983.
- [51] J. Oslen, W. P. MOSKOWITZ. "Optical Measurement of Acoustic Resonance Frequencies in HID Lamps." *IEEE Industrial Applications Society. Annual Meeting*. New Orleans Louisiana, October, 5-9, 1997.
- [52] J. C. A. Antón, C. Blanco, F. J. Ferrero, J. C. Viera, N. Bordel, A. Martín, G. Zissis. "An Acoustic Resonance Band Detection Workbench for HID Lamps" *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no.5, September/October 2007.
- [53] L. M. F. Morais, P. F. Donoso-Garcia, S. I. Seleme, P. C. Cortizo. "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.
- [54] M. A. Dalla Costa, J. M. Alonso, J. Ribas, J. Cardesín, J. G. García. "Acoustic-Resonance Characterization of Low-Wattage Metal-Halide Lamps" *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 35, no. 1, February 2007.

- [55] J. G. García, J. Cardesín, J. Ribas, A. J. Calleja, M. Rico-Secades, J. M. Alonso, E. L. COROMINAS. “Minimization of Acoustic Resonance in HID Lamps: Analysis and Comparison of Power Harmonics Content in High Frequency Non-Resonant Inverters” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 6, November 2005.
- [56] L. M. F. Morais, P. F. Donoso-Garcia, S. I. Seleme Jr., P. C. Cortizo, M. A. S. Mendes. “Reator Eletrônico para Lâmpada de Vapor de Sódio de Alta Pressão com Alto Fator de Potência Utilizando Formas de Onda de Tensão Sintetizadas Via PWM.” *Revista Eletrônica de Potência*. (Florianópolis), v. 13, p. 5-23, 2008.
- [57] L. M. F. Morais, P. F. Donoso-Garcia, S. I. Seleme Jr., P. C. Cortizo. “Electronic Ballast for High Pressure Sodium Lamps Without Acoustic Resonance via Controlled Harmonic Injection Synthesized Via PWM.” *Power Electronics Specialists Conference 2005 (PESC'05)*. Recife, PE, Brasil, 2005.
- [58] P. Caldeira, L. Bourdillon, A. H. Holtslag, J. Qian. “Controller for a Gas Discharge Lamp with Variable Inverter Frequency and with Lamp Power and Bus Voltage Control.” *United States Patent*. Publication Number: 5,623,187. Publication Date: Apr. 22, 1997.
- [59] G. H. Van Eerden. “Electronic Power Circuit for Gas Discharge Lamps.” *United States Patent*. Publication Number: US 7,180,251 B2. Publication Date: Feb. 20, 2007.
- [60] R. Barak. “Electronic Ballast for High-Intensity Discharge Lamps.” *United States Patent*. Publication Number: US2002/0101196 A1. Publication Date: Aug. 1, 2002.
- [61] V. Vorperian, I. Pogodayev, R. Flores. “Electronic Light Ballast With Multiple Outputs to Drive Electric Discharge Lamps of Different Wattages.” *United States Patent*. Publication Number: US2007/0194721 A1. Publication Date: Aug. 23, 2007.
- [62] T. Mayer, G. Garbowicz. “HID Ballast and Lamp Tester.” *United States Patent*. Publication Number: US 7,282,869 B1. Publication Date: Oct. 16, 2007.
- [63] A. Bogdan. “Universal Ballast Control Circuit.” *United States Patent*. Publication Number: 6,137,240. Publication Date: Oct. 24, 2000.
- [64] A. S. André. *Reator Eletrônico para Duas Lâmpadas Fluorescentes de 110W com Controle de Luminosidade e Alto Fator de Potência..* Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, Brasil, 1997.

- [65] R. H. Roseback. *Conversor Boost no Modo Descontínuo Aplicado a Reatores Eletrônicos com Alto Fator de Potência*. Monografia de Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil, 2001
- [66] Y. S. Youn, G. Chae, G. H. Cho. “A Unity Power Factor Electronic Ballast for Fluorescent Lamp Having Improved Valley Fill and Valley Boost Converter”. *In: Power Electronics Specialists Conference, Proceedings...* : [s.n.], 197. p. 53 – 59, 1997.
- [67] M. M. S. D. Perdigão. *Estudos sobre Balastros Eletrônicos*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2004.
- [68] R. O. Brioschi, M. M. Lamengo, J. L. F. Vieira. “Reator Eletrônico de Baixo Custo e Alto Fator de Potência”, *SBA Controle e Automação*, v. 9, n. 3, Set/Out/Nov/Dez 1998.
- [69] A. S. André, M. V. A. Araújo, A. J. Perin, I. Barbi, I. “Reator Eletrônico Auto-Oscilante para Lâmpadas Fluorescentes com Alto Fator de Potência Utilizando Buck Boost Integrado.”, *In: XII Congresso Brasileiro de Automática (XIII CBA)*, Florianópolis, SC, 2000.
- [70] C. Rodrigues, J. A. Pomilho. “A. Electronic Ballast for Fluorescent Lamps Using Current Bidirecional Chuk Converter in Continuous Conduction Mode.” *In: V Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (V COBEP)*, pp. 474 – 479, Foz do Iguaçu, PR, 1999.
- [71] L. M. F. Morais, P. F. Donoso-Garcia, S. I. Seleme Jr., P. C. Cortizo. “ Forced Oscillation in LC Circuit Used for the Ignition of Discharge Lamps.” *IET Power Electronics*. vol. 1, no. 1, pp. 93 – 99, 2008.
- [72] M. V. A. Araújo. *Inversor Auto-Oscilante com Pré-Regulador Buck-Boost Integrado Aplicado em Reatores para Lâmpadas Fluorescentes*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Santa Catarina, Florianópolis, SC, dezembro de 1999.
- [73] M. C. Cosby Jr., R. M. Nelms. “A resonant inverter for electronic ballast applications.” *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Volume 41, Issue 4, pp. 418 – 125.
- [74] Folha de dados do circuito integrado IR2153.  
Disponível em: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2153.pdf>
- [75] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins. *Power Electronics: converters, applications and design*. John Willey & Sons, 2<sup>nd</sup> Edition, Nova Iorque, Estados Unidos, 1995.

- [76] G. C. R. Sincero, A. S. Franciosi, A. J. Perin. “A 250W High Pressure Sodium Lamp High Power Factor Electronic Ballast Using a AC Chopper.” *European Conference of Power Electronics and Applications, 2005 (EPE '05)*. Dresden, Axonia, Alemanha, pp. -P.10, 2005
- [77] W. Yan, S. Y. R. Hui. “An Analysis into the Dimming Control and Characteristics of Discharge Lamps.” *IEEE Transactions o Power Electronics*, Volume.: 20, Issue: 6, pp. 1432 – 1440. 2005.
- [78] R. E. Costa, J. F. Silveira, T. B. Marchesan, A. Campos, R. N. Do Prado. “Industrial Electronic Ballast to Supply 70W HPS Lamp.” *VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais (VIII INDUSCON)*, Poços de Caldas, MG, agosto de 2008.
- [79] A. S. André, A. J. Perin, I. Barbi. “Ignitors of Electronic Ballasts for HID Lamps” *VI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (VI COBEP)*. Florianópolis, SC. v. 2, pp 644 – 649, 2001.
- [80] S. Ben-Yaakov, M. Gulko, M. “Design and Performance of an Electronic Ballast for High Pressure Sodium (HPS) Lamps.” *IEEE Transaction Industrial Electronics*, August 1997, Volume: 44, Issue: 4, pp. 486-491, 1997.
- [81] M. A. Dalla Costa, M. S. Perdigão, H. A. C. Braga, J. M. Alonso. “Projeto e Implementação de um Reator Eletrônico Microcontrolado, de Elevado Fator de Potência, Orientado a Lâmpadas de Vapor Metálico.” *XVII Congresso Brasileiro de Automática (XVII CBA)*, Juiz de Fora, MG, setembro de 2008.
- [82] V. S. Lacerda. *Reator Eletrônico para Lâmpda de Vapor de Mercúrio de 125W*. Monografia de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, Brasil, janeiro de 2007.
- [83] L. F. A. Guedes, H. A. C. Braga. “Sistema de Reatores Eletrônicos Integrantes de uma Bancada de Testes de Componentes Empregados em Iluminação Pública.” *Trabalho Submetido à Revista Principia – UFJF*.
- [84] F. J. Ferrero, C. Blanco, M. A. Pérez, M. G. Vega, M. Rico Secades “A Pspice Model for HPS Lamps Operated at High Frequency.” *Industry Applications Conference*. vol. 5, pp 3423 – 3427, Rome, Italy, 2000.



- [85] X. Cao, W. Yan, S. Y. R. Hui, H. S. H. Chung. “Dimming Control and Characteristics of High-Frequency Operated Metal Halid Lamps.” *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol 19, no 3, maio de 2004.
- [86] C. H. M. A. Filho. *Metodologia para Determinação de Perdas de Energia Elétrica em Reatores Utilizados em Iluminação Pública*. Monografia de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, Brasil, fevereiro de 2007.

# Apêndice 1

## Cálculo dos Componentes do Circuito de Disparo e do Filtro Capacitivo

Neste apêndice serão apresentados os cálculos do filtro capacitivo e dos componentes do circuito de disparo.

A Figura A.1 mostra o diagrama esquemático completo do reator que foi desenvolvido neste trabalho.

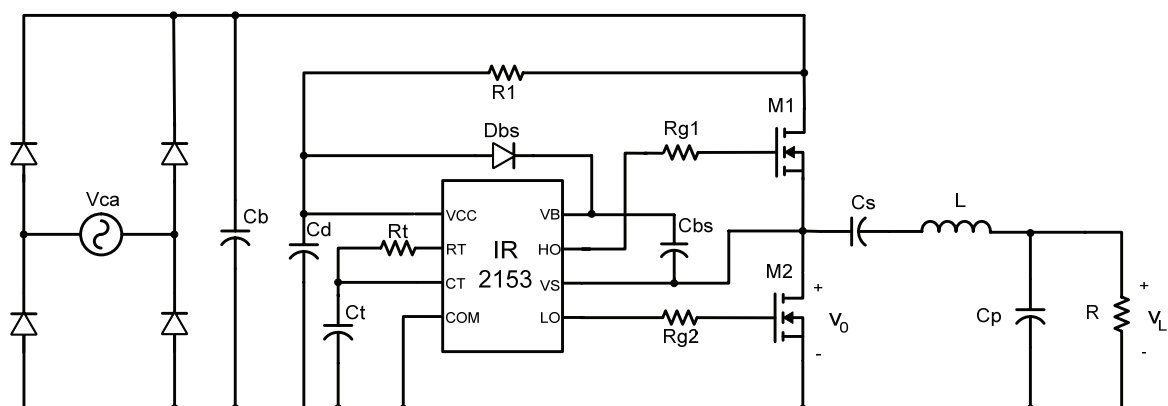


Figura A.1 – Circuito do completo do reator eletrônico ressonante.

O circuito deve ser alimentado em uma fonte alternada de 220Vrms/60Hz. A

primeira etapa do reator conta de um retificador em ponte de diodos com filtro capacitivo que gera um barramento de corrente contínua. Este barramento, entrega tensão contínua para a alimentação do circuito inversor. A alimentação do circuito de controle é realizada com nível de tensão bem inferior ao do barramento, portanto, utiliza-se uma derivação do barramento através do resistor  $R_I$  que é calculado para disponibilizar o nível de tensão adequado. O circuito de controle é responsável por gerar o sinal de disparo para os mosfets. Estes, por sua vez, encontram-se em configuração meia ponte, e alternam-se entre os estados aberto e fechado alimentando o circuito ressonante de saída com uma tensão quadrada (conforme apresentado no capítulo anterior). O circuito ressonante é dimensionado para entregar à lâmpada uma onda de tensão praticamente senoidal.

O dimensionamento do circuito retificador a diodos e filtro capacitivo já foi assunto de diversas publicações no meio científico [16] e [81]. Por este motivo esta etapa não será discutida com detalhes. O dimensionamento do capacitor  $C_b$  é feito através da seguinte equação.

$$C_b \geq \frac{P}{f_{ca} (V_{\max}^2 - V_{\min}^2)} \quad (1.1)$$

em que  $P$  é a potência de entrada,  $f_{ca}$  é a frequência da rede de alimentação e  $V_{\max}$  e  $V_{\min}$  os valores máximos e mínimos admitidos no barramento CC.

Desprezando-se as perdas do circuito a potência  $P$  passa a ser a potência da lâmpada (70W) e considerando que uma ondulação de +/- 10V entorno do valor médio da tensão do barramento (300V), pode-se calcular o capacitor  $C_b$ :

$$C_b \geq \frac{70W}{60Hz [(290V)^2 - (310V)^2]} = 97,222\mu F \quad (1.2)$$

Para a implementação prática foi adotado um capacitor de 100 $\mu$ F. O circuito retificador a diodos foi implementado com uma ponte retificadora (SKB B 40).

Os mosfets utilizados devem suportar esforços de tensão impostos pelo chaveamento da tensão do barramento CC e ainda suportar a corrente de regime permanente e de ignição das lâmpadas. Foi então selecionado o mosfet IRF840 que suporta tensão de até 500V, corrente em regime permanente de até 8A e corrente de pico de 32A.

Estas especificações fazem com que o IFR840 atenda com folga as necessidades do reator.

O projeto do circuito de disparo dos mosfets será discutido a seguir.

Como peça principal do circuito de disparo dos mosfets foi utilizado o circuito integrado IR2153. Este circuito integrado, com encapsulamento de oito pinos, é um driver do tipo bootstrap utilizado para gerar os pulsos de disparo para o acionamento dos mosfets.

O IR2153 possui um regulador interno de 15,6V que possibilita que ele possa ser alimentado através de uma derivação do barramento CC. Para o funcionamento adequado do circuito de controle são necessários diversos componentes, conforme apresentado na Figura A.1.

A função e o dimensionamento de cada um destes componentes será apresentado na sequência. Todos os resultados apresentados foram calculados considerando que a frequência de chaveamento do inversor é de 31kHz.

#### **Dimensionamento de $R_t$ e $C_t$ :**

Estes componentes são responsáveis pela determinação da frequência de chaveamento do oscilador interno do IR2153. É necessário que se fixe o valor de um dos dois componentes para que o outro seja calculado em função da frequência de chaveamento desejada. A expressão (1.3) é utilizada para se determinar o valor do resistor  $R_t$ :

$$R_t = \frac{1}{1,4 f_s C_t} - R_i \quad (1.3)$$

em que  $f_s$  é a frequência de chaveamento do inversor,  $R_i$  é a impedância do pino  $R_t$ , que de acordo como o “*datasheet*” do fabricante [69] vale  $75\Omega$ , e  $C_t$  deve ser fixado. Fixando  $C_t = 1,2\mu\text{F}$ .

$$R_t = \frac{1}{1,4 \times 31\text{kHz} \times 1,2\mu\text{F}} - 75\Omega = 19,77\text{k}\Omega \quad (1.4)$$

Conforme discutido no capítulo anterior, o circuito de controle de inversores meia ponte deve guardar um tempo morto ( $t_d$ ) entre o comando para fechar um mosfet e o comando para abrir o outro. O IR2153 trabalha com tempo morto de  $1,2\mu\text{s}$ , que é suficiente para evitar um curto circuito na fonte de alimentação do inversor.

**Dimensionamento de R1:**

O resistor R1 é responsável pela alimentação do circuito de controle através de uma derivação do barramento CC. A corrente que circulará por R1 é total necessária para o funcionamento do circuito de controle. A Tabela 0.1 apresenta as diversas componentes desta corrente.

Tabela 0.1 – Componentes da corrente que circula por R1.

<b>Corrente quiescente do próprio CI (<math>I_{0CC}</math>)</b>	500 $\mu$ A
<b>Corrente necessária para alimentar o gate dos mosfets (<math>I_G</math>)</b>	4,077mA
<b>Corrente que circula por Rt (<math>I_{Rt}</math>)</b>	210 $\mu$ A
<b>Correntes internas de chaveamento (<math>I_{AVE}</math>)</b>	180 $\mu$ A
<b>Corrente que circula pelo zenner interno (<math>I_{CLAMP}</math>)</b>	500 $\mu$ A
<b>TOTAL (<math>I_{R1}</math>)</b>	5,467mA

Maiores detalhas a cerca dos valores de corrente apresentados na Tabela 0.1 podem ser encontrados em [81].

A corrente  $I_G$  depende do mosfet utilizado. No caso o mosfet utilizado foi o IRF840.

A corrente  $I_{Rt}$  depende do valor do resistor  $Rt$ , portanto, depende da frequência de chaveamento. No entanto, a variação que pode ocorrer não chega a alterar significativamente o valor da corrente total. Assim o valor de  $R1$  calculado não inviabiliza a variação da frequência de chaveamento do inversor.

O valor de  $R1$  é determinado por:

$$R1 = \frac{V_{CC} - V_{CCtrip}}{I_{R1}} = \frac{307V - 15,6V}{5,467mA} = 53,3k\Omega \quad (1.5)$$

em que  $V_{CC}$  é a tensão do barramento CC (valor medido 307V) e  $V_{CCtrip}$  é a tensão típica no pino 1 do IR2153 (dado de catálogo 15,6V). Foi utilizado um potenciômetro para ajustar corretamente o valor da resistência que leva à frequência de chaveamento desejada.

**Dimensionamento dos componentes Dbs e Cbs:**

O capacitor  $Cbs$  e o diodo  $Dbs$  formam o circuito de bootstrap O diodo  $Dbs$  deve

ter rápida recuperação (no máximo 100ns de acordo com o manual do IR2153). Por isso utilizou-se o diodo MUR 160, que possui tempo de recuperação de 75ns. O capacitor  $C_{bs}$  é calculado utilizando-se dados de tensão sobre o mosfet inferior do inversor, da tensão direta sobre  $D_{bs}$  e a carga do circuito de bootstrap. Estes dados são apresentados detalhadamente em [81].

O valor utilizado para  $C_{bs}$  foi de 330nF.

### **Dimensionamento de $R_{g1}$ e $R_{g2}$ :**

Para fazer a ligação dos pinos que geram os sinais de disparo para os mosfets ao gate de cada um deles, são utilizados resistores. O valor dos resistores utilizados dependem de características dos mosfets utilizados:

$$R_{g1} = R_{g2} = \frac{t_r}{2,2 \times C_{iss}} \quad (1.6)$$

onde  $t_r$  é o tempo de subida da tensão do mosfet e  $C_{iss}$  é a sua capacitância de entrada. Para o IRF840 temos  $t_r = 23\text{ns}$ ,  $C_{iss} = 1300\text{pF}$  e ainda  $t_f = 20\text{ns}$  (que é o tempo de queda da tensão). Como o tempo morto gerado pelo próprio circuito integrado é de 1,2ms, pode-se utilizar tempo de subida maior. Utilizando  $t_r = 60\text{ns}$  pode-se adotar o valor comercial de  $22\Omega$  para  $R_{g1}$  e  $R_{g2}$ .

### **Dimensionamento de $C_d$ :**

O valor do capacitor de desacoplamento a ser utilizado é recomendado pelo manual do IR2153,  $47\mu\text{F}$ .

## **Apêndice 2**

# **Resultados dos Ensaios para a Determinação da Frequência de Chaveamento do Inversor**

Neste apêndice serão apresentados em forma de tabelas os resultados dos ensaios realizados para a determinação da frequência de chaveamento do inversor.

Tabela 1 - Lâmpada VSAP 70W (OSRAM VIALOX NAV - E70W)

<b>Frequência (kHz)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Potência (W)</b>	<b>Resistência (W)</b>	<b>Comportamento do Arco de Descarga</b>
30,00	83,00	0,938	77,86	88,48	Arco estável
30,27	80,71	0,938	75,71	86,04	Arco distorcido
31,00	76,76	0,886	68,00	86,65	Arco distorcido
31,17	75,21	0,864	64,96	87,08	Arco distorcido
32,37	69,16	0,800	55,30	86,49	Arco estável
33,23	67,57	0,787	53,17	85,88	Arco estável
34,32	67,59	0,786	53,16	85,94	Arco estável
35,67	64,75	0,754	48,80	85,92	Arco estável
36,29	63,21	0,710	44,91	88,97	Arco estável
37,31	61,93	0,679	42,04	91,24	Arco estável
38,54	60,98	0,642	39,14	95,02	Arco estável
39,38	60,66	0,621	37,69	97,63	Arco estável
40,66	58,59	0,594	34,81	98,61	Arco estável
41,44	56,77	0,570	32,37	99,55	Arco estável
43,22	53,05	0,523	27,76	101,40	Arco estável
44,33	51,28	0,488	25,03	105,05	Arco estável
45,35	49,18	0,458	22,51	107,47	Arco estável
47,06	43,92	0,475	20,85	92,51	Arco estável
48,47	40,24	0,454	18,26	88,67	Arco estável
49,90	35,4	0,431	15,24	82,21	Arco estável
50,36	33,23	0,443	14,71	75,07	Arco estável
53,45	26,56	0,408	10,83	65,16	Arco estável
57,02	22,66	0,397	8,99	57,09	Arco estável
60,63	18,28	0,396	7,24	46,15	Arco estável
64,77	16,92	0,353	5,98	47,91	Arco estável
69,44	18,37	0,246	4,52	74,67	Arco estável

$C_s = 874\text{nF}$   
 $C_p = 47\text{nF}$   
 $L = 774\mu\text{H}$



50,04	83,43	0,947	79,00	88,11	Arco estável	Cs = 470nF Cp = 25nF L = 480µH
50,38	80,16	0,888	71,15	90,31	Arco estável	
51,09	79,71	0,904	72,09	88,13	Arco estável	
52,62	76,58	0,857	65,60	89,40	Arco estável	
53,73	71,05	0,896	63,63	79,33	Arco estável	
54,04	75,74	0,865	65,48	87,60	Arco estável	
55,55	73,54	0,851	62,61	86,38	Arco estável	
56,08	72,49	0,862	62,48	84,10	Arco estável	
57,87	70,48	0,812	57,19	86,85	Arco estável	
58,55	68,27	0,776	52,98	87,96	Arco estável	
59,88	66,42	0,743	49,37	89,35	Arco estável	
60,13	65,72	0,751	49,38	87,47	Arco estável	
61,13	64,98	0,727	47,21	89,44	Arco estável	
61,58	64,09	0,714	45,77	89,74	Arco estável	
63,21	63,12	0,681	43,01	92,63	Arco estável	
65,49	62,37	0,660	41,18	94,47	Arco estável	
67,82	60,89	0,644	39,23	94,51	Arco estável	
69,03	59,79	0,593	35,45	100,84	Arco estável	
71,78	55,97	0,565	31,60	99,13	Arco estável	
72,81	54,87	0,529	29,04	103,68	Arco estável	
74,23	52,07	0,507	26,40	102,69	Arco estável	
75,93	50,65	0,496	25,10	102,20	Arco estável	Cs = 150nF Cp = 19,1nF L = 358µH
70,16	81,13	0,969	78,62	83,72	Arco estável	
72,59	80,17	0,900	72,15	89,08	Arco estável	
75,58	76,23	0,825	62,92	92,36	Arco estável	
78,47	71,24	0,768	54,68	92,81	Arco estável	
79,37	67,14	0,801	53,79	83,80	Arco distorcido	
81,54	66,38	0,734	48,70	90,48	Arco distorcido	
82,95	64,46	0,742	47,83	86,88	Arco distorcido	
85,16	62,49	0,710	44,37	88,00	Arco estável	
85,91	62,26	0,693	43,12	89,90	Arco estável	

87,85	61,58	0,666	41,01	92,47	Arco estável
91,19	59,54	0,609	36,26	97,76	Arco estável
92,55	58,79	0,592	34,80	99,33	Arco estável
93,42	58,33	0,578	33,69	100,98	Arco estável
98,35	55,35	0,513	28,40	107,87	Arco estável
100,90	51,47	0,508	26,15	101,31	Arco estável
103,90	47,4	0,492	23,31	96,40	Arco estável
105,50	45,73	0,475	21,71	96,32	Arco estável
111,40	35,56	0,464	16,48	76,71	Arco estável

Tabela 2 - Lâmpada VSAP 70W (PHILIPS SON 70W)

<b>Frequência (kHz)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Potência (W)</b>	<b>Resistência (W)</b>	<b>Comportamento do Arco de Descarga</b>
30,18	84,91	0,937	79,57	90,60	Arco estável
31,20	78,14	0,903	70,53	86,57	Arco estável
32,67	72,45	0,816	59,09	88,82	Arco estável
33,47	70,14	0,787	55,23	89,07	Arco estável
34,21	69,53	0,771	53,59	90,22	Arco estável
35,33	67,31	0,774	52,13	86,92	Arco estável
36,68	63,4	0,721	45,73	87,89	Arco estável
37,69	61,94	0,667	41,34	92,82	Arco estável
39,15	60,63	0,644	39,03	94,19	Arco estável
40,40	59,26	0,601	35,61	98,61	Arco estável
41,82	55,81	0,567	31,65	98,42	Arco estável
43,24	52,72	0,529	27,88	99,69	Arco estável
44,74	50,45	0,494	24,92	102,15	Arco estável
46,81	44,35	0,466	20,66	95,19	Arco estável
48,47	39,9	0,445	17,74	89,74	Arco estável
51,02	33,34	0,421	14,04	79,16	Arco estável
53,08	29,26	0,403	11,80	72,52	Arco estável

Cs = 874nF  
Cp = 47nF  
L = 774μH

53,99	27,21	0,413	11,24	65,90	Arco estável
55,37	26,21	0,396	10,37	66,21	Arco estável
57,94	23,33	0,368	8,59	63,37	Arco estável
60,90	19,26	0,372	7,17	51,77	Arco estável
63,34	18,31	0,339	6,20	54,06	Arco estável
65,16	19,81	0,291	5,77	68,06	Arco estável
50,56	62,46	0,898	56,10	69,54	Arco estável
52,18	59,46	0,906	53,88	65,62	Arco estável
53,58	59,47	0,855	50,84	69,57	Arco estável
54,44	58,89	0,853	50,24	69,03	Arco estável
55,79	58,12	0,818	47,52	71,08	Arco estável
56,96	57,26	0,795	45,50	72,05	Arco estável
58,12	56,34	0,753	42,43	74,81	Arco estável
59,61	55,77	0,775	43,23	71,94	Arco estável
60,83	55,8	0,722	40,29	77,27	Arco estável
61,93	54,53	0,710	38,70	76,83	Arco estável
62,78	53,75	0,710	38,15	75,73	Arco estável
63,49	54,52	0,690	37,63	78,98	Arco estável
64,85	52,85	0,669	35,36	79,00	Arco estável
65,85	51,76	0,661	34,22	78,30	Arco estável
68,45	48,63	0,604	29,39	80,46	Arco estável
69,33	48,32	0,589	28,48	81,98	Arco estável
71,26	45,74	0,577	26,39	79,27	Arco estável
72,92	45,56	0,556	25,32	81,98	Arco estável
73,69	41,18	0,558	23,00	73,75	Arco estável
74,71	38,95	0,558	21,72	69,86	Arco estável
75,67	37,93	0,542	20,54	70,03	Arco estável
76,25	36,59	0,541	19,78	67,67	Arco estável
80,62	32,65	0,483	15,78	67,57	Arco estável
71,02	88,53	0,924	81,79	95,82	Arco estável
72,46	89,00	0,919	81,83	96,79	Arco estável

$C_s = 470\text{nF}$      $C_p = 25\text{nF}$      $L = 480\mu\text{H}$

73,40	88,59	0,868	76,92	102,02	Arco estável	Cs = 150nF Cp = 19,1nF L = 358µH
74,01	87,78	0,897	78,77	97,82	Arco estável	
78,22	73,10	0,786	57,48	92,97	Arco estável	
79,54	69,27	0,763	52,86	90,77	Arco estável	
81,30	66,71	0,741	49,44	90,02	Arco estável	
82,97	64,26	0,712	45,77	90,23	Arco estável	
84,43	62,96	0,721	45,36	87,38	Arco estável	
87,72	62,33	0,668	41,65	93,28	Arco estável	
88,46	61,62	0,667	41,12	92,35	Arco estável	
89,81	61,34	0,657	40,32	93,33	Arco estável	
94,57	59,04	0,578	34,10	102,23	Arco estável	
96,38	56,37	0,536	30,20	105,23	Arco estável	
97,82	54,62	0,512	27,96	106,71	Arco estável	
100,40	51,83	0,501	25,97	103,46	Arco estável	
102,80	49,14	0,489	24,01	100,56	Arco estável	

Tabela 3 - Lâmpada VMAP 125W (PHILIPS HPL – N125W).

<b>Frequência (kHz)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Potência (W)</b>	<b>Resistência (W)</b>	<b>Comportamento do Arco de Descarga</b>	Cs = 560nF Cp = 33nF L = 800µH
31,00	122	0,865	105,59	140,96	Arco oscila	
31,81	122	0,859	104,83	141,98	Arco oscila	
32,22	121	0,852	103,12	141,98	Arco oscila	
33,13	123	0,821	101,01	149,77	Arco oscila	
33,85	124	0,734	90,97	169,02	Arco oscila	
34,13	125	0,781	97,68	159,97	Arco trêmulo	
34,48	125	0,762	95,24	164,05	Arco trêmulo	
35,50	124	0,725	89,87	171,09	Arco trêmulo	
36,18	125	0,719	89,82	173,95	Arco trêmulo	
36,63	129	0,692	89,27	186,41	Arco quase estável	

37,04	127	0,642	81,48	197,94	Arco estável	Cs = 220nF Cp = 33nF L = 570µH
37,62	128	0,612	78,39	209,02	Arco estável	
38,17	132	0,568	74,99	232,34	Arco oscila	
38,49	128	0,568	72,72	225,30	Arco oscila	
39,09	124	0,538	66,72	230,46	Arco oscila	
39,62	121	0,515	62,32	234,93	Arco oscila	
40,13	107	0,541	57,86	197,89	Arco oscila	
40,65	111	0,495	54,91	224,38	Arco oscila	
40,65	108	0,487	52,57	221,89	Arco trêmulo	
41,70	106	0,462	48,97	229,46	Arco trêmulo	
42,16	103	0,458	47,12	225,13	Arco estável	
42,59	103	0,433	44,57	238,02	Arco estável	
43,29	104	0,390	40,59	266,49	Arco trêmulo	
39,94	133	0,903	120,05	147,34	Arco oscila	
40,37	135	0,854	115,29	158,08	Arco oscila	
41,36	139	0,883	122,76	157,38	Arco oscila	
42,16	135	0,792	106,92	170,45	Arco oscila	
42,52	138	0,846	116,75	163,12	Arco oscila	
43,29	134	0,828	110,99	161,77	Arco oscila	
43,99	134	0,920	123,33	145,60	Arco oscila	
44,48	133	1,142	151,83	116,50	Arco oscila	
45,13	134	1,265	169,58	105,89	Arco trêmulo	
46,21	135	0,973	131,42	138,68	Arco torto	
46,55	136	1,035	140,81	131,35	Arco torto	
47,62	135	0,894	120,66	151,04	Arco oscila	
48,17	134	0,920	123,33	145,60	Arco trêmulo	
49,21	136	0,873	118,79	155,70	Arco trêmulo	
50,76	142	0,701	99,53	202,60	Arco trêmulo	
51,11	138	0,721	99,53	191,34	Arco torto	
52,08	127	0,719	91,26	176,74	Arco oscila	
52,91	123	0,656	80,66	187,57	Arco oscila	

53,42	115	0,657	75,51	175,13	Arco estável	$C_s = 150\text{nF}$ $C_p = 22\text{nF}$ $L = 491\mu\text{H}$
54,23	119	0,583	69,40	204,05	Arco estável	
55,07	115	0,564	64,83	204,00	Arco estável	
51,23	130	0,747	97,10	174,05	Arco trêmulo	
52,85	135	0,697	94,14	193,59	Arco trêmulo	
53,02	132	0,688	90,76	191,97	Arco trêmulo	
54,56	132	0,687	90,65	192,22	Arco trêmulo	
55,01	134	0,577	77,32	232,24	Arco trêmulo	
56,37	126	0,500	63,00	252,00	Arco estável	
57,21	122	0,485	59,16	251,57	Arco estável	
58,41	120	0,507	60,85	236,65	Arco estável	
59,10	112	0,404	45,30	276,94	Arco estável	
59,95	129	1,168	150,69	110,43	Arco trêmulo	$C_s = 330\text{nF}$ $C_p = 33\text{nF}$ $L = 345\mu\text{H}$
60,61	131	1,115	146,07	117,48	Arco trêmulo	
61,27	130	1,009	131,15	128,86	Arco trêmulo	
62,07	133	0,864	114,87	153,99	Arco trêmulo	
62,77	135	0,865	116,72	156,14	Arco oscila	
63,45	137	0,793	108,63	172,78	Arco oscila	
64,02	136	0,702	95,44	193,80	Arco oscila	
64,23	134	0,809	108,39	165,67	Arco oscila	$C_s = 150\text{nF}$ $C_p = 27\text{nF}$ $L = 345\mu\text{H}$
65,08	134	0,775	103,88	172,85	Arco trêmulo	
66,40	136	0,792	107,72	171,71	Arco trêmulo	
67,39	137	0,706	96,75	194,00	Arco trêmulo	
67,61	133	0,628	83,57	211,68	Arco torto	
68,17	131	0,605	79,30	216,42	Arco torto	
68,87	130	0,675	87,78	192,53	Arco torto	
69,25	126	0,563	70,92	223,87	Arco torto	
70,27	130	0,794	103,19	163,77	Arco torto	$C_s = 82\text{nF}$ $C_p = 18\text{nF}$ $L = 345\mu\text{H}$
70,77	132	0,769	101,51	171,65	Arco estável	
71,07	130	0,700	91,00	185,71	Arco estável	
71,33	123	0,573	70,53	214,49	Arco estável	

72,31	122	0,529	64,56	230,54	Arco estável
73,31	119	0,875	104,15	135,97	Arco estável
74,07	121	0,861	104,19	140,52	Arco estável
74,91	122	0,815	99,44	149,69	Arco estável
75,30	125	0,759	94,91	164,63	Arco estável
75,76	124	0,787	97,55	157,62	Arco estável

Tabela 4 – Resultados obtidos com lâmpadas VMAP diversas.

$C_s = 560\text{nF}$ ,  $C_p = 33\text{nF}$  e  $L = 800\mu\text{H}$ .

<b>Frequência de operação 33,3kHz</b>					
<b>Fabricante</b>	<b>Tensão</b>	<b>Corrente</b>	<b>Potência</b>	<b>Ressonância</b>	<b>Resistência</b>
PHILIPS	117V	915 mA	104.5 W	Sim / Pequena	127,87 $\Omega$
PHILIPS	125V	750 mA	92 W	Sim / Pequena	166,67 $\Omega$
GE	123 V	650 mA	78 W	Sim / Arco distorcido	189,23 $\Omega$
OSRAM	122V	800 mA	94 W	Não	152,5 $\Omega$
OSRAM	118V	845mA	94.5 W	Não	139,64 $\Omega$
SILVANIA	120V	790 mA	88.5 W	Não	151,89 $\Omega$
PHILIPS	117V	915 mA	104.5 W	Sim / Pequena	127,87 $\Omega$
PHILIPS	125V	750 mA	92 W	Sim / Pequena	166,67 $\Omega$
GE	123 V	650 mA	78 W	Sim / Arco distorcido	189,23 $\Omega$
<b>Frequência de operação 35kHz</b>					
<b>Fabricante</b>	<b>Tensão</b>	<b>Corrente</b>	<b>Potência</b>	<b>Ressonância</b>	<b>Resistência</b>
PHILIPS	118V	710 mA	81.5 W	Sim / Pulsos	166,20 $\Omega$
PHILIPS	128V	615 mA	77 W	Sim / Pequena	208,13 $\Omega$

GE	114 V	715 mA	79 W	Não	159,44 $\Omega$
OSRAM	102V	820 mA	82 W	Não	124,39 $\Omega$
OSRAM	108 V	765 mA	80 W	Não	141,18 $\Omega$
SILVANIA	116V	750 mA	84.5 W	Não	154,67 $\Omega$
PHILIPS	118V	710 mA	81.5 W	Sim	166,20 $\Omega$
PHILIPS	128V	615 mA	77 W	Sim / Pequena	208,13 $\Omega$
GE	114 V	715 mA	79 W	Não	159,44 $\Omega$
<b>Frequência de operação 37kHz</b>					
<b>Fabricante</b>	<b>Tensão</b>	<b>Corrente</b>	<b>Potência</b>	<b>Ressonância</b>	<b>Resistência</b>
PHILIPS	125V	620 mA	75.5 W	Não	201,61 $\Omega$
PHILIPS	125V	550 mA	68 W	Não	227,27 $\Omega$
GE	111 V	720 mA	77.5 W	Não	154,17 $\Omega$
OSRAM	121V	585 mA	69.5 W	Não	206,83 $\Omega$
OSRAM	116V	700 mA	79.5 W	Não	165,71 $\Omega$
SILVANIA	121V	655 mA	78 W	Não	184,73 $\Omega$
<b>Frequência de operação 40kHz</b>					
<b>Fabricante</b>	<b>Tensão</b>	<b>Corrente</b>	<b>Potência</b>	<b>Ressonância</b>	<b>Resistência</b>
PHILIPS	126V	545 mA	69.5 W	Sim / Muita	231,19 $\Omega$
PHILIPS	125V	530 mA	67 W	Sim / Muita	235,85 $\Omega$
GE	105V	690 mA	73.5 W	Não	152,17 $\Omega$
OSRAM	117V	605 mA	72 W	Sim/ Pequena	193,39 $\Omega$
OSRAM	109V	610 mA	67.5 W	Sim	178,69 $\Omega$
SILVANIA	113V	625 mA	72 W	Sim	180,80 $\Omega$