

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 785

**ESTUDO DE MODELOS PARA LÂMPADA DE VAPOR SÓDIO DE ALTA
PRESSÃO COM INJEÇÃO DE TERCEIRA HARMÔNICA APLICADO AO
CONTROLE DE CORRENTE**

Tiago de Sá Ferreira

DATA DA DEFESA: 19/07/2013

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**ESTUDO DE MODELOS PARA LÂMPADA DE VAPOR SÓDIO DE
ALTA PRESSÃO COM INJEÇÃO DE TERCEIRA HARMÔNICA
APLICADO AO CONTROLE DE CORRENTE**

Tiago de Sá Ferreira

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Lenin Martins Ferreira Morais

Co-Orientador: Prof. Seleme Isaac Seleme Júnior

Belo Horizonte - MG

Julho de 2013

F383e

Ferreira, Tiago de Sá.

Estudo de modelos para lâmpada de vapor sódio de alta pressão com injeção de terceira harmônica aplicado ao controle de corrente [manuscrito] / Tiago de Sá Ferreira. - 2013.
xvii, 74 f., enc.: il.

Orientador: Lenin Martins Ferreira Morais.

Coorientador: Seleme Isaac Seleme Júnior.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 72-74.

Bibliografia: f. 66-71.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Modelos e construção de modelos - Teses. 3. Iluminação - Teses. I. Morais, Lenin Martins Ferreira. II. Seleme Júnior, Seleme Isaac. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)

"Estudo de Modelos para Lâmpada de Vapor Sódio de Alta Pressão com Injeção de Terceira Harmônica Aplicado ao Controle de Corrente"

Tiago de Sá Ferreira

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 19 de julho de 2013.

Por:



Prof. Dr. Lenin Martins Ferreira Moraes
DELT (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Seleme Isaac Seleme Júnior
DELT (UFMG) - Co-Orientador



Prof. Dr. Pedro Francisco Donoso Garcia
DELT (UFMG)



Prof. Dr. Porfírio Cabaleiro Cortizo
DELT (UFMG)

*À minha família e
aos meus amigos.*

*“Concisão no estilo, precisão no
pensamento, decisão na vida.”*

Victor Hugo

Agradecimentos

Agradeço

a Deus por iluminar meu caminho.

aos meus pais, pelo amor e dedicação incondicionais.

ao meu irmão, pela amizade e pelo exemplo.

a Bê, pelo carinho e atenção.

ao professor Lenin Martins Ferreira Morais por sua dedicação, amizade e orientação. Por compartilhar comigo seu conhecimento e constantemente me incentivar e motivar.

ao professor Seleme Isaac Seleme Júnior por toda ajuda e conselhos prestados.

aos professores do GEP, Pedro Francisco Donoso-García, Porfírio Cabaleiro Cortizo, Marcos Antônio Severo Mendes e Paulo Fernando Seixas, pelo suporte, auxílio e disposição de me ensinar e auxiliar.

aos colegas do GEP, pelo companheirismo e por toda colaboração prestada. Especialmente para Thiago Ribeiro de Oliveira, que sempre teve paciência e disposição para me ajudar.

aos colegas do CPH, pela camaradagem.

aos meus amigos pelas risadas, companhia e camaradagem. Especialmente ao Coxa e a Iara, que sempre estiveram próximos.

por fim, ao PPGEE/UFMG e a CAPES, respectivamente, pelo apoio logístico e financeiro ao meu trabalho.

Resumo

Lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão são um tipo de lâmpada de alta intensidade de descarga. Suas características as tornam adequadas para uso em sistemas de iluminação de ambientes externos e industriais. No entanto, essas lâmpadas são dispositivos complexos, principalmente devido a seu comportamento de impedância incremental negativa. Sendo assim, modelos altamente fidedignos desses dispositivos possuem uma grande quantidade de variáveis e parâmetros a serem determinados.

Neste trabalho é apresentado um estudo comparativo de modelos no domínio do tempo para uma lâmpada de vapor sódio de alta pressão de 70W. Quatro circuitos equivalentes de diferentes complexidades de obtenção e construção têm suas performances comparadas para operação com injeção de terceira harmônica para evitar o fenômeno da ressonância acústica. Esses modelos são a lâmpada como uma resistência linear pura, um modelo empírico que é se constitui em uma equação derivada de um conjunto de medições de correntes e tensões eficazes para diversas potências de saída (Ferrero), um fundamentado na ideia de que uma descarga no gás se comporta aproximadamente como um resistor de coeficiente negativo de temperatura (Mader-Horn) e um que se baseia nas equações de balanço de energia do sistema e inclui a queda de tensão dinâmica sobre o eletrodo e os efeitos de histerese das características V-I da lâmpada (Yan). Para validação e qualificação desses modelos, são utilizados dados experimentais da lâmpada operando em regime permanente com e sem a injeção de harmônicas.

O reator eletrônico utilizado para levantar dados experimentais de corrente e tensão na lâmpada é composto por vários elementos. O filtro de entrada atua para corrigir a distorção da corrente na rede, suprimir interferência de rádio frequência e remover picos na alimentação. O retificador, combinado com o filtro capacitivo, converte a tensão de alimentação alternada em uma tensão contínua. O inversor ressonante converte a tensão contínua em uma tensão de alta frequência e proporciona a ignição da lâmpada, além de eliminar o efeito estroboscópio de

baixa frequência e o flicker. Um conversor tipo Boost é colocado como estágio intermediário entre o retificador e o inversor ressonante para correção do fator de potência. O controle do índice de modulação, realizado com o auxílio de um microprocessador, permite o uso de um pequeno indutor elevador (o equipamento fica com menores dimensões e peso).

Após devidamente escrutinados, o modelo considerado de melhor performance considerando o comportamento da lâmpada tanto em baixas quanto em altas frequências foi o modelo Yan. A partir desse circuito equivalente é levantado um modelo da lâmpada no domínio da frequência. Por sua vez, a partir dessa função de transferência final, é proposta uma estratégia de controle de corrente circulante em regime permanente na lâmpada composta por uma malha de potência para fornecimento da referência de corrente e uma malha de controle de corrente. O sistema em malha fechada é, então, simulado em diferentes pontos de operação para averiguação de seu desempenho e verificação do efetivo controle de corrente desejado. Uma estratégia de controle de tensão durante a fase de aquecimento da lâmpada também é proposta.

Palavras chave: *lâmpadas HPS, injeção de harmônicas, ressonância acústica, modelagem, controle*

Abstract

High pressure sodium lamps are a type of high intensity discharge lamp. Its qualities make them adequate to be used in external and industrial lighting systems. However, such lamps are complex devices, mostly due to their negative incremental impedance behavior. Thus, highly faithful models of these devices have a large number of variables and parameters to be determined.

In this work, a comparative study of a 70W high pressure sodium lamp time domain models is presented. Four equivalent circuits of different obtainability and building complexities have their performance compared for operation with third harmonic injection in order to avoid the acoustic resonance phenomenon. This models are the lamp as a pure linear resistance, an empiric model constituted by an equation derived of a set of RMS current and voltage measurements for several output power values (Ferrero), one based on the idea that a discharge column in the gas behaves approximately as a negative temperature coefficient resistor (Mader-Horn) and one based in the system energy balance equations while including in its formulation the dynamic electrode voltage drop and the hysteresis effects of the V-I characteristics of the lamp (Yan). To validate and characterize these models, experimental data of the lamp operating in steady state with and without harmonic injection is used.

The electronic ballast used to gather experimental lamp current and voltage data consists of numerous elements. The input filter act to correct the network current distortion, suppress radio frequency interference and remove feeding spikes. The rectifier, combined with the capacitive filter, converts the alternated feeding voltage into a continuous voltage. The resonant inverter converts the continuous voltage into a high frequency voltage and enables the lamp ignition, also eliminating the low frequency strobe effect and flicker. A boost converter is inserted as an intermediate stage between the rectifier and the resonant inverter to allow power factor correction. The modulation index control, performed with the help of a microprocessor, allows the use of a small step-up inductor (the equipment ends up smaller and lighter).

After being duly scrutinized, the model considered to have shown best performance considering the lamp behavior in both low and high frequencies was the Yan model. From this equivalent circuit, a frequency domain lamp model is found. In turn, from this final transfer function, a lamp circulating steady state current control strategy is proposed composed by a power control loop to provide current reference and a current control loop. The closed loop system is, therefore, simulated with different operation points to ascertain its performance and verify the effective desired current control. A voltage control strategy during the lamp warm-up phase is also proposed.

Keywords: *HPS lamps, harmonic injection, acoustic resonance, modeling, control*

Sumário

Resumo	iv
Abstract.....	vi
Sumário.....	viii
Lista de figuras	x
Lista de tabelas	xiii
Nomenclatura.....	xiv
1. Introdução	1
1.1. Motivação e contextualização.....	1
1.1.1. Lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão.....	2
1.1.2. Ressonância acústica	4
1.2. Objetivos do trabalho e contribuições pretendidas	5
1.2.1. Objetivos específicos do trabalho	6
1.3. Organização textual	6
2. Modelos da lâmpada HPS 70W no domínio do tempo.....	8
2.1. Obtenção dos modelos da lâmpada HPS 70W no domínio do tempo	9
2.1.1. Modelo do resistor puro	10
2.1.2. Modelo apresentado por Ferrero (Ferrero et al. 2000).....	10
2.1.3. Modelo apresentado por Mader-Horn (Mader & Horn 1992).....	13
2.1.4. Modelo apresentado por Yan (Yan & Hui 2005).....	16
2.2. Considerações finais do capítulo	23
3. Validação e comparação dos modelos no domínio do tempo.....	25
3.1. Circuito excitado por corrente senoidal	25
3.2. Circuito excitado com injeção de terceira harmônica de corrente.....	29
3.2.1. Dinâmica dos modelos com injeção de harmônicas e ressonância acústica	32
3.3. Comportamento de impedância incremental negativa.....	35

3.4.	Tempo de simulação	37
3.5.	Considerações finais do capítulo	38
4.	Acionamento e controle da lâmpada.....	39
4.1.	Partida suave (corrente eficaz constante durante aquecimento)	39
4.2.	Controle de corrente em malha fechada.....	45
4.2.1.	Modelo de pequenos sinais da lâmpada	45
4.2.1.	Metodologia de ajuste do sistema de controle	49
4.2.2.	Controladores PI projetados	52
4.2.3.	Simulação da lâmpada com sistema de controle.....	55
4.2.3.1.	Primeiro cenário de simulação.....	55
4.2.3.2.	Segundo cenário de simulação.....	57
4.2.3.3.	Terceiro cenário de simulação	58
4.2.3.4.	Análise dos resultados das simulações	60
4.3.	Considerações finais do capítulo	60
5.	Conclusões finais do trabalho e propostas de continuidade	62
5.1.	Conclusões finais	62
5.2.	Propostas de continuidade.....	65
	Referências Bibliográficas.....	66
	Apêndice A.....	72
	Apêndice B	73

Lista de figuras

Figura 1.1 - Lâmpada HPS	2
Figura 1.2 - Diagrama de blocos do reator eletrônico com correção do fator de potência.....	3
Figura 1.3 - Faixas de ocorrência da ressonância acústica em lâmpadas HPS de 150W da PHILIPS	5
Figura 2.1 - Diagrama do circuito de alimentação da lâmpada.....	9
Figura 2.2 - Correntes e tensões medidas na lâmpada em malha aberta alimentada em: (a) 60Hz e (b) 10kHz	9
Figura 2.3 - Modelo equivalente da lâmpada - Resistor Puro	10
Figura 2.4 - Característica V-I da lâmpada a 10kHz	11
Figura 2.5 - Modelo equivalente da lâmpada – Ferrero	13
Figura 2.6 - Resistência da lâmpada em função da potência calculada por (2.11).....	15
Figura 2.7 - Modelo equivalente da lâmpada - Mader-Horn.....	16
Figura 2.8 - Queda de tensão dinâmica no eletrodo em: (a) 60Hz e (b) 10kHz.....	19
Figura 2.9 - Modelo equivalente da lâmpada - Yan	22
Figura 2.10 - Onda dente de serra	23
Figura 3.1 - Correntes senoidais ideais e medidas para operação em: (a) 60Hz / $1,01A_{rms}$ e (b) 10kHz / $0,81A_{rms}$	26
Figura 3.2 - Tensão sobre a lâmpada (medições e simulações) com alimentação em: (a) 60Hz e (b) 10kHz	27
Figura 3.3 - Tensão e corrente medidas na lâmpada para operação com injeção de terceira harmônica com fundamental de: (a) 3kHz e (b) 5kHz	30
Figura 3.4 - Tensão sobre a lâmpada para operação com injeção de terceira harmônica com fundamental de: (a) 3kHz e (b) 5kHz	31
Figura 3.5 - Espectro harmônico (banda lateral positiva da DSFFT) da potência medida em laboratório com injeção de terceira harmônica de fundamental: (a) 3kHz e (b) 5kHz	33

Figura 3.6 - Espectro harmônico (banda lateral positiva da DSFFT) das potências medidas em laboratório e simuladas através dos modelos com injeção de terceira harmônica de fundamental: (a) 3kHz e (b) 5kHz.....	33
Figura 3.7 - Comportamento da impedância equivalente da lâmpada alimentada com corrente senoidal de 5kHz para o modelo: (a) resistor puro, (b) Yan, (c) Mader-Horn e (d) Ferrero	36
Figura 3.8 - Comportamento da impedância equivalente da lâmpada alimentada com injeção de terceira harmônica com fundamental de 5kHz para o modelo Yan.....	36
Figura 3.9 - Corrente e tensão simuladas do modelo Yan com injeção de terceira harmônica com fundamental de 5kHz com degrau de corrente: (a) positivo de 10% e (b) negativo de 10% em relação ao valor nominal.....	37
Figura 4.1 - Medidas realizadas na lâmpada HPS 150W durante a entrada em regime: (a) corrente na lâmpada e (b) tensão na lâmpada.....	41
Figura 4.2 – Dados da lâmpada HPS 150W durante a entrada em regime: (a) potência fornecida à lâmpada e (b) resistência equivalente da lâmpada.....	42
Figura 4.3 - Perfis de curvas operacionais da lâmpada HPS 150W para partida suave: (a) corrente na lâmpada, (b) tensão na lâmpada, (c) potência fornecida à lâmpada e (d) resistência equivalente da lâmpada.....	43
Figura 4.4 - Perfis aplicados pelo microcontrolador à lâmpada durante seu aquecimento: (a) degraus de tensão e (b) consequentes valores eficazes de corrente	44
Figura 4.5 - Formas de onda de tensão e corrente na lâmpada com modulação em: (a) 10Hz e (b) 50kHz.....	46
Figura 4.6 - Mensagens na tensão e corrente na lâmpada com modulação em: (a) 10Hz e (b) 50kHz.....	47
Figura 4.7 - Resposta em frequência dos resultados obtidos via simulação do modelo Yan proposto	47
Figura 4.8 - Resposta em frequência ajustada para se aproximar da obtida via simulação do modelo Yan	49
Figura 4.9 - Processo de ajuste e calibração dos ganhos dos compensadores PI projetados....	51
Figura 4.10 - Diagrama do sistema de controle de potência (regulação da corrente)	52
Figura 4.11 - Diagrama do sistema controlado em malha fechada	54
Figura 4.12 - (a) Resistência e potência média e (b) tensão e corrente eficazes na lâmpada durante a variação da resistência equivalente da lâmpada	56
Figura 4.13 - Formas de onda da tensão e corrente durante o primeiro incremento de resistência equivalente da lâmpada.....	56
Figura 4.14 - (a) Referência de potência e potência média e (b) tensão e corrente eficazes na lâmpada durante a variação da referência de potência fornecida à lâmpada	57

Figura 4.15 - Formas de onda da tensão e corrente durante o primeiro incremento de referência de potência fornecida à lâmpada	58
Figura 4.16 - (a) Degrau aplicado e referência do controle de corrente e (b) tensão e corrente eficazes na lâmpada durante a variação da referência de corrente realizada diretamente na saída do controlador de potência.....	59
Figura 4.17 - Formas de onda da tensão e corrente durante o primeiro incremento de referência de corrente realizada diretamente na saída do controlador de potência	59
Figura A.1 - Corrente, tensão, potência e fluxo luminoso na lâmpada HPS de 70W em função da tensão de alimentação	72
Figura B.1 - Espectro harmônico da potência na lâmpada em função da amplitude relativa da terceira harmônica calculado utilizando o modelo Yan.....	73

Lista de tabelas

Tabela 1.1 – Quantidade e participação por tipo de lâmpada na iluminação pública no Brasil em 2008.....	1
Tabela 2.1 - Medições V-I na lâmpada a 10kHz	11
Tabela 2.2 - Constantes ajustáveis do modelo Yan relativas à queda de tensão no eletrodo ...	20
Tabela 2.3 - Constantes ajustáveis do modelo Yan relativas aos parâmetros da lâmpada	21
Tabela 3.1 - Valores eficazes de tensão na lâmpada com alimentação senoidal.....	26
Tabela 3.2 - Indicadores de performance calculados com alimentação senoidal.....	28
Tabela 3.3 - Espectro harmônico da tensão medida na lâmpada.....	29
Tabela 3.4 - Espectro harmônico da corrente medida na lâmpada.....	29
Tabela 3.5 – Valores eficazes de tensão na lâmpada com injeção de terceira harmônica.....	30
Tabela 3.6 - Indicadores de performance calculados com injeção de terceira harmônica	32
Tabela 3.7 - THDs de corrente e tensão medidas e simuladas para operação com injeção de harmônicas.....	34
Tabela 3.8 - THDs das potências medidas e simuladas para operação com injeção de harmônicas.....	34
Tabela 3.9 - Tempos de execução dos algoritmos de cada modelo estudado	37
Tabela 4.1 - Dados de placa do reator indutivo da Transvoltec	40
Tabela 4.2 - Dados de tensão e corrente na lâmpada acionada pelo reator indutivo em regime permanente	41
Tabela 4.3 - Dados da impedância incremental da lâmpada de 70W em estudo	48
Tabela 4.4 - Ganhos dos controladores de corrente e potência projetados.....	55

Nomenclatura

AR	Ressonância acústica
DSFFT	Transformada rápida de Fourier de banda lateral dupla
FFT	Transformada rápida de Fourier
GA	Algoritmo genético
HID	Alta intensidade de descarga
IAE	Integral do erro absoluto
ISE	Integral do quadrado do erro
ITAE	Integral do erro absoluto multiplicado pelo tempo
HPS	Sódio de alta pressão
NTC	Coefficiente de temperatura negativo
RMS	Valor eficaz
THD	Distorção harmônica total
α	Ângulo de defasagem entre os sinais de mensagem de tensão e de corrente.
σ_e	Condutividade elétrica
ρ	Densidade de ionização do gás no interior do tubo da lâmpada
Π_L	Potência instantânea da lâmpada
τ	Constante de tempo para cálculo da média móvel do modelo Mader-Horn
τ_{MH}	Constante de tempo do circuito equivalente do modelo Mader-Horn
A	Constante ajustável do modelo Yan referente à queda de tensão no eletrodo
A_s	Área da seção transversal do arco
a_1	Constante ajustável do modelo Yan referente aos parâmetros da lâmpada

a_2	Constante ajustável do modelo Yan referente aos parâmetros da lâmpada
a_3	Constante ajustável do modelo Yan referente aos parâmetros da lâmpada
a_4	Constante ajustável do modelo Yan referente aos parâmetros da lâmpada
a_5	Constante ajustável do modelo Yan referente aos parâmetros da lâmpada
a_6	Constante ajustável do modelo Yan referente aos parâmetros da lâmpada
B	Constante ajustável do modelo Yan referente à queda de tensão no eletrodo
C	Constante ajustável do modelo Yan referente à queda de tensão no eletrodo
C_S	Capacitor do filtro de carga do reator eletrônico
c	Constante de proporcionalidade para cálculo da média móvel do modelo Mader-Horn
D	Constante ajustável do modelo Yan referente à queda de tensão no eletrodo
e	Carga do elétron
erro	Erro no tempo das simulações dos modelos em relação aos valores medidos
f	Frequência de operação da lâmpada
f_i	Frequência característica do controlador de corrente
f_p	Frequência característica do controlador de potência
I_j	Valores de corrente obtidos pela simulação do modelo Yan
I_j^*	Valores e corrente medidos experimentalmente cujas curvas correspondem às de I_j no mesmo instante de tempo
I_{rms}	Corrente eficaz circulando na lâmpada
i_L	Corrente na lâmpada
\hat{i}_m	Amplitude da componente da mensagem da modulação do sinal de corrente
i_{VA}	Corrente na lâmpada (utilizada nos algoritmos de simulação dos modelos)
K	Ganho do modelo no domínio da frequência da impedância da lâmpada
K_i	Ganho integral da malha de temperatura interna do modelo Yan
K_I	Ganho integral do controlador PI
K_P	Ganho proporcional controlador do PI

k	Constante de Boltzmann
l	Comprimento do arco elétrico
L_S	Indutor do filtro de carga do reator eletrônico
n_e	Concentrações de elétrons no interior do gás
n_0	Concentrações de átomos no interior do gás
P_{con}	Perda por condução térmica
P_{in}	Potência de alimentação da lâmpada
P_L	Potência média na lâmpada
P_{Lo}	Valor escolhido arbitrariamente que faz uma compensação da potência média da lâmpada para que se evitem erros de convergência no modelo Mader-Horn
P_{rad}	Perda por radiação
p	Polo do modelo no domínio da frequência da impedância da lâmpada
R_L	Resistência equivalente da lâmpada para ajuste do modelo Ferrero
R_L	Resistência equivalente da lâmpada
$R_{Lmedido}$	Resistência equivalente da lâmpada em altas frequências calculada através de medições
R_S	Parâmetro de ajuste do modelo Ferrero
S_{arc}	Espaço de solução potencial do algoritmo genético de cálculo dos parâmetros da lâmpada
S_{ele}	Espaço de solução potencial do algoritmo genético de cálculo dos parâmetros da queda de tensão no eletrodo
\tilde{V}	Valor médio mencionado da tensão sobre o eletrodo obtido pela simulação
\tilde{V}^*	Valor do potencial de ionização do sódio
V_i	Potencial de ionização do gás
V_j	Valores de tensão obtidos pela simulação do modelo Yan
V_j^*	Valores de tensão medidos experimentalmente cujas curvas correspondem às de V_j no mesmo instante de tempo
V_{Ldc}	Tensão contínua sobre a lâmpada

V_{rms}	Tensão eficaz na lâmpada
V_S	Parâmetro de ajuste do modelo Ferrero
v_{arc}	Tensão instantânea sobre a lâmpada (utilizada nos algoritmos de simulação dos modelos)
v_L	Tensão instantânea sobre a lâmpada
\hat{v}_m	Amplitude da componente da mensagem da modulação do sinal de tensão
T	Temperatura do gás no interior da lâmpada
T_0	Temperatura de recuperação adiabática do tubo do arco
THD_I	Distorção harmônica total de corrente
THD_V	Distorção harmônica total de tensão
T_{init}	Temperatura inicial do gás no interior da lâmpada
TR	Período de um ciclo da tensão de alimentação da lâmpada
t	Tempo
Z_{lamp}	Impedância de pequenos sinais da lâmpada
z	Zero do modelo no domínio da frequência da impedância da lâmpada

Capítulo 1

1. Introdução

1.1. Motivação e contextualização

A iluminação pública é essencial à qualidade de vida nos centros urbanos, uma vez que sua existência permite aos habitantes desfrutar do espaço público no período noturno. As luzes que iluminam as vias terrestres facilitam a hierarquia viária e trazem segurança ao tráfego automotivo. Quanto aos pedestres, a presença de iluminação orienta percursos e previne a criminalidade. Até mesmo uma melhoria estética das áreas urbanas pode ser alcançada através desses sistemas de iluminação, já que os mesmos permitem destacar e valorizar monumentos, prédios e paisagens [1].

Tabela 1.1 – Quantidade e participação por tipo de lâmpada na iluminação pública no Brasil em 2008

Lâmpada	Quantidade	Participação (%)
Vapor de mercúrio	$4,70 \cdot 10^6$	31,8
Vapor de sódio	$9,29 \cdot 10^6$	62,9
Multi-vapor metálico	$108,17 \cdot 10^3$	0,7
Incandescentes	$210,42 \cdot 10^3$	1,4
Mistas	$328,43 \cdot 10^3$	2,2
Fluorescentes	$119,54 \cdot 10^3$	0,8
Outras	$5,13 \cdot 10^3$	0,03
Total	$14,77 \cdot 10^6$	-

A iluminação artificial é responsável por cerca de 18% do consumo de energia elétrica no Brasil [2]. Apenas a iluminação pública no Brasil corresponde a 4% do consumo total de energia elétrica do país, o que equivale a um consumo de 10,6 bilhões de kWh/ano [3]. Segundo o levantamento cadastral realizado pelo PROCEL/ELETROBRAS feito em 2008 junto às

distribuidoras de energia elétrica, há aproximadamente 15 milhões de pontos de iluminação pública instalados no país [1]. A distribuição de lâmpadas cadastradas se dá conforme a Tabela 1.1 [3].

Considerando esses níveis de consumo de energia elétrica com iluminação e a busca atual de boas práticas visando à economia energética [4], estudos de sistemas de iluminação se tornaram cada vez mais essenciais e valiosos. Além disso, o uso racional de energia geralmente implica em economia financeira, o que é sempre algo a ser buscado em soluções de engenharia.

1.1.1. Lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão

A lâmpada de vapor sódio de alta pressão (HPS) é uma lâmpada de alta intensidade de descarga (HID) que possui uma propriedade de cor amarelada (geralmente utiliza-se uma mistura de gases no interior da lâmpada para corrigir a cor da luz emitida, aproximando-a do branco) que é aceitável e agradável para o olho humano em aplicações industriais e em áreas externas [5]. Hoje em dia, as lâmpadas mais utilizadas nos sistemas de iluminação pública na Europa e EUA são as lâmpadas de vapor sódio de alta pressão [6]. A Figura 1.2.1 apresenta uma lâmpada HPS típica. Uma descrição mais detalhada dos aspectos construtivos e das características referentes ao espectro luminoso da lâmpada HPS é encontrada em [7], [8], [9], [10], [11].



Figura 1.1 - Lâmpada HPS

Percebe-se pela Tabela 1.1 que essa também é a realidade brasileira. Esse tipo de lâmpada é vastamente utilizado na iluminação urbana por apresentar diversas vantagens. A primeira é a alta eficiência luminosa, implicando que a maior parte da energia elétrica consumida pela mesma é convertida em luz visível (dados comumente obtidos através de medição de iluminação fotópica, ou seja, de condições de intensidade luminosa que permitam a distinção das cores). O longo tempo de vida médio, quando comparado com o dos outros tipos de lâmpadas citados na Tabela 1.1, também é um dos fatores de excelência desse tipo de lâmpada. Além disso, também é um ponto a favor dessa tecnologia a operação em temperaturas mais baixas que implica em pequena dissipação de calor para certo fluxo luminoso [9].

Essas lâmpadas requerem circuitos especiais para seu acionamento, sendo eles os ignitores e os reatores. Os ignitores garantem a formação do arco elétrico no interior do tubo que terminará por provocar a emissão de luz pela lâmpada. Já os reatores são responsáveis por estabilizar e manter esse arco. Uma descrição mais detalhada do processo de ignição e reignição da lâmpada e da atuação de diferentes tipos de reatores (eletromagnéticos e eletrônicos) no sistema no que diz respeito à estabilização do arco e as curvas características da lâmpada pode ser encontrada em [9], [10], [12]. Nesse trabalho, utilizou-se como bancada de testes um reator eletrônico microcontrolado previamente desenvolvido e projetado em [9] e reestruturado em [11] e [13] considerando as adaptações em seu circuito apresentadas em [10]. A Figura 1.2 apresenta o diagrama de blocos do reator eletrônico com correção de fator de potência utilizado para realização de testes experimentais.

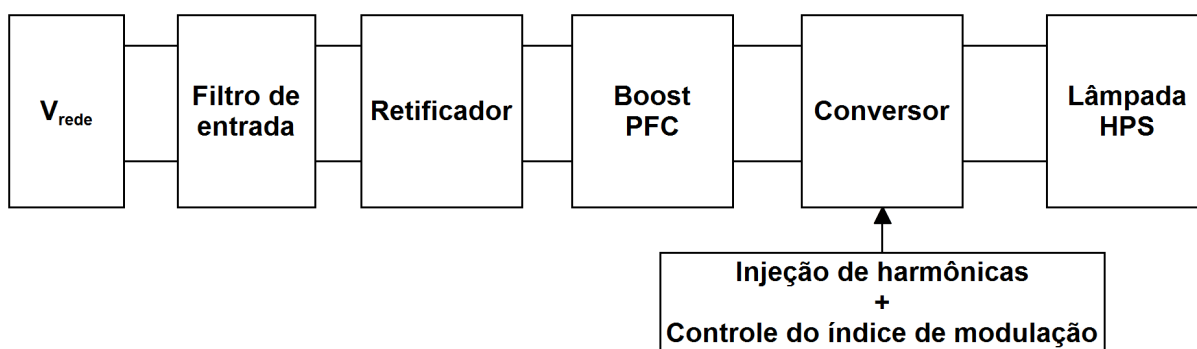


Figura 1.2 - Diagrama de blocos do reator eletrônico com correção do fator de potência

O filtro de entrada atua para corrigir a distorção da corrente na rede, suprimir interferência de rádio frequência e remover picos momentâneos presentes na alimentação. O retificador,

combinado com o filtro capacitivo, converte a tensão de alimentação alternada em uma tensão contínua. O inversor ressonante converte a tensão contínua em uma tensão de alta frequência e proporciona a ignição da lâmpada, além de eliminar o efeito estroboscópico de baixa frequência e o *flicker*. Um conversor tipo Boost é colocado como estágio intermediário entre o retificador e o inversor ressonante para correção do fator de potência [11]. O controle do índice de modulação permite o uso de um pequeno indutor elevador (o equipamento fica com menores dimensões e volume).

1.1.2. Ressonância acústica

Corpos que possuem massa e certa elasticidade estão sujeitos a vibrar. Vibrações que surgem a partir de fontes externas ao sistema em estudo são denominadas vibrações forçadas e, se essas fontes provoquem vibrações periódicas (ou oscilatórias), o sistema é forçado a vibrar na frequência de excitação das mesmas. Caso essa frequência coincida com uma das frequências naturais do sistema, é estabelecido um quadro de ressonância que pode resultar na amplificação das amplitudes dessas vibrações [14].

A ressonância acústica que ocorre nas lâmpadas HID alimentadas por fontes de altas frequências (de alguns poucos até algumas centenas de kHz) é produzida por flutuações da pressão do gás no interior do tubo de descarga [7]. Quando a frequência da variação de pressão é aproximadamente igual à frequência natural de oscilação do tubo (determinada pela sua forma, temperatura interna e tipo de gás contido), ondas de pressão permanentes se estabelecem, caracterizando a ressonância acústica [15]. Essas ondas de pressão causam a vibração e deformação do arco que, por sua vez, podem provocar *flicker*, extinção do arco, quebra do tubo de descarga e variação da temperatura e do índice de cor da luz [16]. Em cada tipo de lâmpada HID, a ressonância acústica ocorre em faixas de frequência diferentes, havendo intervalos livres da ressonância [11]. A Figura 1.3 apresenta as faixas de ocorrência do fenômeno da ressonância acústica em uma lâmpada HPS de 150W da Philips.

Para se evitar o fenômeno da ressonância acústica, várias técnicas foram propostas na literatura. Na bancada de testes com o reator eletrônico e a lâmpada HPS de 70W em estudo utiliza-se a técnica de injeção de ondas senoidais superpostas por sua terceira harmônica evitar a ocorrência de ressonância acústica proposta em [11] e [17]. No entanto, outras podem ser citadas:

1. Operação em corrente contínua, tratada em [12];
2. Operação em baixa frequência, tratada em [18] e [19];
3. Operação em alta frequência, tratada em [11] e [12];
4. Operação em frequência fixa pré-determinada, tratada em [20] e [21];
5. Operação com variação de frequência randômica, tratada em [22] e [23];
6. Operação em altíssima frequência, tratada em [24];
7. Operação com injeção de formas de onda quadradas, tratada em [25];

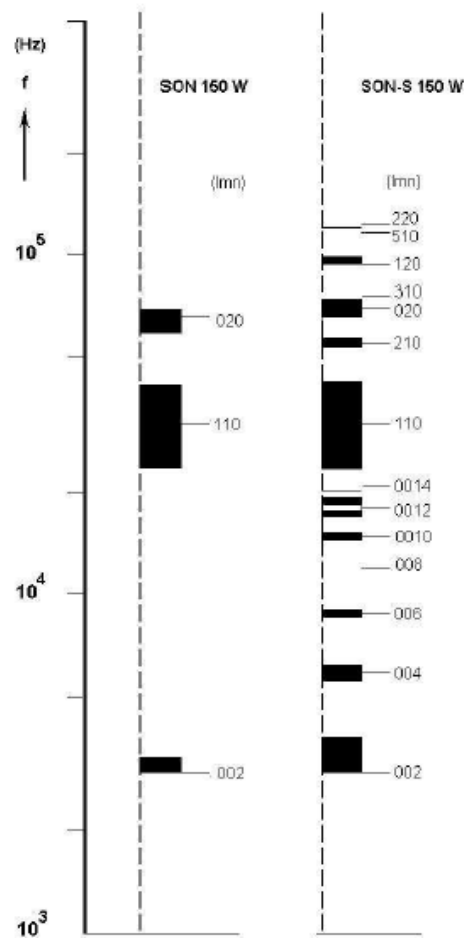


Figura 1.3 - Faixas de ocorrência da ressonância acústica em lâmpadas HPS de 150W da PHILIPS

1.2. Objetivos do trabalho e contribuições pretendidas

Este trabalho tem como objetivo principal possibilitar que o operador ou projetista de reatores e seus sistemas de controle execute sua função com mais facilidade por estar munido de

informações precisas e variadas sobre a lâmpada HPS e sua dinâmica de operação.

1.2.1. Objetivos específicos do trabalho

Durante o desenvolvimento deste estudo, pretende-se alcançar os seguintes objetivos:

1. Validação de modelos no domínio do tempo para uma lâmpada HPS de 70W;
2. Determinação do modelo no domínio do tempo que melhor caracteriza essa lâmpada;
3. Obtenção de um modelo no domínio da frequência para a impedância dessa lâmpada;
4. Elaboração e validação de uma estratégia de controle de tensão de alimentação de uma lâmpada HPS durante sua fase de aquecimento com corrente eficaz constante, caracterizando uma partida suave do equipamento;
5. Elaboração e validação de uma estratégia de controle de potência atuando sobre a corrente para o reator eletrônico alimentando uma lâmpada HPS com injeção de ondas senoidais superpostas por sua terceira harmônica.

1.3. Organização textual

O capítulo 2 apresenta o equacionamento dos quatro modelos no domínio do tempo propostos para a lâmpada HPS de 70W. Cada modelo é apresentado individualmente, sendo sua metodologia de obtenção, suas equações e seus circuitos equivalentes são discutidos ao longo do texto.

O capítulo 3 apresenta um estudo da performance dos quatro modelos da lâmpada HPS de 70W, comparados com alimentação senoidal e também perante a injeção de harmônicas. A semelhança entre as curvas de tensão e corrente simuladas e experimentais é analisada para condições de operação em baixas e altas frequências, bem como com e sem injeção de harmônicas. A resposta dos modelos à injeção de harmônicas e seu comportamento de impedância incremental também é analisada.

O capítulo 4 apresenta estratégias de controle de acionamento da lâmpada. Uma é a proposta de partida suave da lâmpada via controle de tensão de alimentação. A segunda, possível após o levantamento do modelo no domínio da frequência da impedância da lâmpada é uma

proposta de controle da lâmpada após a entrada em regime via controle de corrente utilizando PIs (controle de potência atuando em cima da corrente circulando no sistema). Ambas as estratégias são analisadas e validadas através de simulações.

O capítulo 5 apresenta as conclusões finais do trabalho e algumas propostas de continuidade.

Capítulo 2

2. Modelos da lâmpada HPS 70W no domínio do tempo

Lâmpadas HPS são dispositivos complexos, principalmente devido a seu comportamento de impedância incremental negativa [26]. Modelos altamente fidedignos desses dispositivos possuem uma grande quantidade de variáveis e parâmetros a serem determinados. No entanto, do ponto de vista do projeto de reatores para essas lâmpadas, as propriedades relevantes a serem estudadas são suas características terminais como uma carga elétrica [27].

Muitos modelos para lâmpadas HID foram propostos na literatura. Alguns mais simples são modelos empíricos que assumem que a resistência da lâmpada é constante [28], mas são fiéis apenas para altas frequências (condição de operação na qual a lâmpada HID apresenta um comportamento muito semelhante ao de uma resistência linear pura). Outros mais complexos se baseiam nas equações de balanço de energia do sistema, abrangendo operação em baixas e altas frequências e considerando os processos físicos da lâmpada [27], [29].

Nesse capítulo, levantam-se quatro modelos de diferentes complexidades de obtenção e construção para uma lâmpada HPS Philips SON-T 70W operando em regime permanente. O menos complexo é o modelo da lâmpada como uma resistência, válido apenas para altas frequências [28]. O segundo, também adequado apenas em altas frequências, é um modelo empírico que constitui em uma equação derivada de um conjunto de medições de correntes e tensões eficazes para diversas potências de saída [30]. Outro abrange operação em baixas e altas frequências e é derivado de um modelo para lâmpadas fluorescentes fundamentado na ideia de que uma descarga no gás se comporta aproximadamente como um resistor de coeficiente de temperatura negativo (NTC) [31]. O mais complexo abrange operação em baixas e altas frequências e se baseia nas equações de balanço de energia do sistema e inclui a queda de tensão dinâmica sobre o eletrodo e os efeitos de histerese das características V-I da lâmpada [32].

2.1. Obtenção dos modelos da lâmpada HPS 70W no domínio do tempo

O reator eletrônico utilizado nos testes experimentais é apresentado o mesmo apresentado em [11] e [13], considerando as adaptações em seu circuito apresentadas em [10]. O circuito equivalente do reator eletrônico utilizado para levantar dados experimentais de corrente e tensão na lâmpada é apresentado na Figura 2.1. Segundo [33], como existe uma rede LC entre a saída dos inversores e a carga devidamente projetada para filtrar as componentes de harmônicas mais elevadas da onda quadrada de alimentação fornecida pelo conversor, uma análise aproximada pode ser realizada utilizando apenas sua fundamental. Dessa forma, todas as simulações computacionais realizadas com os modelos apresentados a seguir são realizadas com a injeção de corrente senoidal. Os valores de $L_S = 875\mu\text{H}$ e $C_S = 47\text{nF}$ calculados segundo a metodologia apresentada em [9], [10], [11] foram os valores utilizados na montagem.

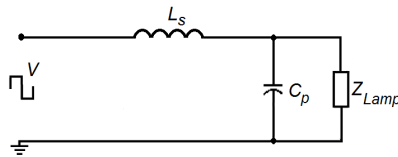


Figura 2.1 - Diagrama do circuito de alimentação da lâmpada

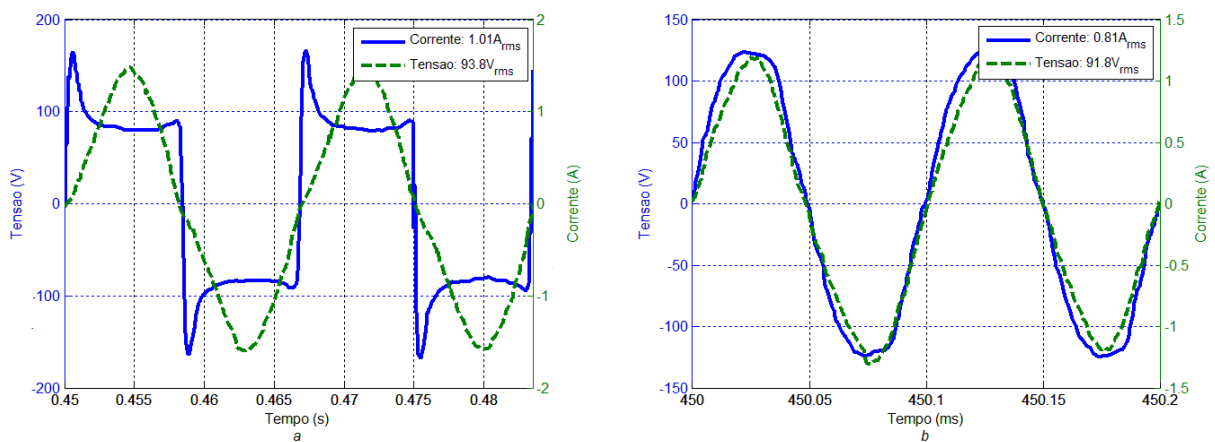


Figura 2.2 - Correntes e tensões medidas na lâmpada em malha aberta alimentada em: (a) 60Hz e (b) 10kHz

Resultados experimentais são levantados a partir da montagem citada com a lâmpada em operação em condições nominais ($90V_{\text{rms}}$ e $1,0 A_{\text{rms}}$ em 60Hz e $90V_{\text{rms}}$ e $0,8A_{\text{rms}}$ em 10kHz)

em malha aberta. Na Figura 2.2a têm-se as curvas de tensão e corrente na lâmpada levantadas para operação em baixa frequência ($93,8V_{rms}$ e $1,01A_{rms}$) e na Figura 2.2b tem-se as mesmas curvas levantadas para operação em alta frequência ($91,8V_{rms}$ e $0,81A_{rms}$). Devido ao filtro existente na saída do conversor, as correntes medidas são semelhantes à senóides.

2.1.1. Modelo do resistor puro

Em altas frequências, a resistência equivalente da lâmpada é ôhmica e linear [28], [31]. Uma simplificação típica do modelo de lâmpadas HPS para operação em altas frequências é considerá-la como uma resistência pura [28], [31]. Assumindo-se senóides ideais com o mesmo valor eficaz das ondas da Figura 2.2b, pela Lei de Ohm, a resistência equivalente da lâmpada é $R_L = 113,3\Omega$. A Figura 2.3 apresenta o circuito equivalente do modelo da lâmpada válido apenas para altas frequências onde a tensão $v_L(t)$ sobre a lâmpada é dada por $v_{arc}(t)$ e a corrente $i_L(t)$ circulando nela é amostrada como $i_{VA}(t)$.

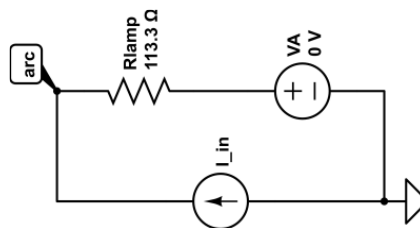


Figura 2.3 - Modelo equivalente da lâmpada - Resistor Puro

2.1.2. Modelo apresentado por Ferrero (Ferrero et al. 2000)

As equações que descrevem as características elétricas da lâmpada são derivadas de um conjunto de medidas obtido através de ensaios com a lâmpada em estudo. Para obtenção do modelo, a lâmpada HPS foi alimentada por uma onda quadrada de alta frequência (10kHz) variando-se a potência aplicada à mesma. A quantidade de potência transferida para a lâmpada é controlada alterando-se a tensão de alimentação do conversor (efetivamente, a tensão de alimentação do reator), o que resulta na variação da tensão sobre a lâmpada e a corrente circulando na mesma. Durante esse transitório de variação de alimentação, o comportamento de impedância incremental negativa é observado. No entanto, assim que ele termina e o regime

em estado estacionário é alcançado, o sistema estabiliza em um novo ponto de operação com seu próprio conjunto de valores terminais de tensão e corrente. Essa dinâmica é registrada pelo fabricante, o qual divulga as curvas de variação típicas de corrente, tensão, potência e fluxo luminoso em função do percentual da tensão de alimentação (apresentadas no Apêndice A) em [34]. Uma vez que o presente trabalho se propõe a estudar um equipamento específico, essas curvas são novamente levantadas em laboratório para a lâmpada em estudo.

Medindo a tensão e corrente eficazes da lâmpada em regime permanente, obtiveram-se os dados apresentados na Tabela 2.1. Essas medições permitem observar que a característica V-I se distribui aproximadamente ao longo de uma reta L, apresentada na Figura 2.4. Segundo [30], esse comportamento indica que a resistência equivalente em altas frequências é relativamente independente da potência e essas medidas são suficientes para se modelar a lâmpada.

Tabela 2.1 - Medições V-I na lâmpada a 10kHz

Potência (W)	V_{rms} (V)	I_{rms} (A)
28,8	58,8	0,489
32,0	61,0	0,525
36,3	63,2	0,574
42,5	68,8	0,617
48,7	73,3	0,664
52,9	77,2	0,685
56,6	80,1	0,707
58,9	82,6	0,714
64,6	84,3	0,766
72,9	89,1	0,818
80,7	95,9	0,842

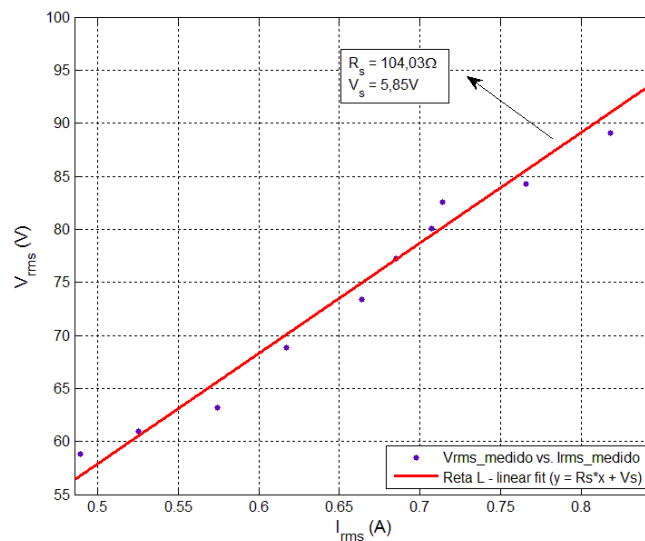


Figura 2.4 - Característica V-I da lâmpada a 10kHz

As equações do modelo são obtidas segundo a metodologia proposta em [30]. A equação da linha L que aproxima a característica V-I da lâmpada é:

$$v_L(t) = R_S \cdot i_L(t) + V_S \quad (2.1)$$

Pela Figura 2.4, R_S ($R_S = 104,03\Omega$) é a inclinação da reta L e V_S ($V_S = 5,85V$) é dado pelo ponto de interseção da reta L com o eixo das ordenadas. Pela reta L, o valor eficaz da tensão é expresso por:

$$V_{rms} = R_S \cdot I_{rms} + V_S \quad (2.2)$$

Por sua vez, a resistência equivalente da lâmpada em regime permanente, pela Lei de Ohm, é dada pela equação:

$$R_{eq} = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} = R_S + \frac{V_S}{I_{rms}} = \frac{V_{rms} \cdot R_S}{V_{rms} - V_S} \quad (2.3)$$

Assim, circulando-se uma corrente pela lâmpada $i_L(t)$, a tensão sobre a lâmpada é representada pela expressão:

$$v_L(t, I_{rms}) = \left(R_S + \frac{V_S}{I_{rms}} \right) \cdot i_L(t) \quad (2.4)$$

De acordo com (2.4), um circuito equivalente da lâmpada é construído com fontes de tensão controladas a partir de diferentes variáveis de entrada. A Figura 2.5 apresenta seu diagrama, onde a tensão $v_L(t)$ sobre a lâmpada é representada por $v_{arc}(t)$ e a corrente $i_L(t)$ circulando nela é amostrada como $i_{VA}(t)$. A constante de tempo do filtro RC foi definida como quinze vezes maior que o período de operação em altas frequências considerado (10kHz) garantindo que o mesmo não atenua significativamente o sinal nas frequências de estudo.

Nesse modelo, válido apenas para estudos em regime permanente e em altas frequências, a fonte de tensão VA é utilizada unicamente para amostrar a corrente instantânea da lâmpada. E1 implementa a tensão sobre a lâmpada descrita por (2.4). E2 transforma a medição de corrente circulando na lâmpada em um sinal de tensão. E3 calcula o quadrado da corrente medida. E4 fornece a corrente eficaz circulando na lâmpada ao calcular a raiz quadrada da tensão

média sobre o capacitor C3, sendo essa tensão, por sua vez, o valor suavizado do quadrado da corrente eficaz.

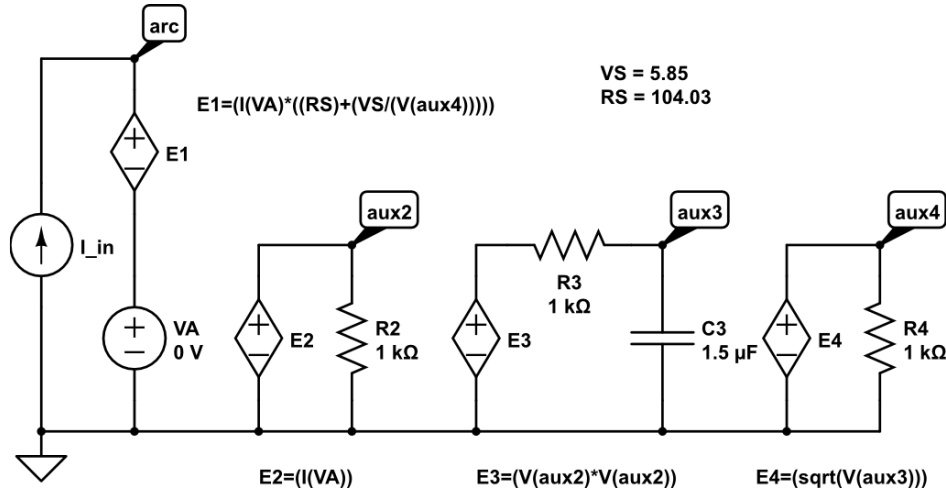


Figura 2.5 - Modelo equivalente da lâmpada – Ferrero

2.1.3. Modelo apresentado por Mader-Horn (Mader & Horn 1992)

Para o sistema efetivamente emitir luz, a potência elétrica fluindo pela lâmpada excita e ioniza (em um processo relativamente lento) os átomos de sódio na coluna de descarga. A densidade de ionização ρ está relacionada à potência instantânea da lâmpada Π_L por uma média móvel [31] como apresentado na equação:

$$\rho(s) = C \cdot \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \Pi_L(s) \quad (2.5)$$

onde τ é a constante de tempo de ionização e c uma constante de proporcionalidade.

A questão é simplificada, sendo a análise da densidade de ionização substituída por um estudo da potência média na lâmpada P_L [31], a qual, por sua vez, é proporcional à ionização do gás. Por (2.5), essa potência média é a potência instantânea filtrada por um passa-baixas:

$$P_L(s) = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \Pi_L(s) \quad (2.6)$$

O modelo da lâmpada se baseia no fato de que, em altas frequências, a resistência equiva-

lente da lâmpada é ôhmica e linear [31]. Assim, pela Lei de Ohm, a tensão v_L na lâmpada é:

$$v_L(t, P_L) = R_L(P_L) \cdot i_L(t) \quad (2.7)$$

onde R_L é a resistência da lâmpada e i_L é a corrente circulando nela.

Por [31], a função R_L é definida de forma que, em nível contínuo, a tensão contínua sobre a lâmpada V_{Ldc} (cujo valor é igual ao nominal de alimentação da lâmpada em estudo $V_{Ldc} = 90V_{rms}$) permaneça constante e independente. Em nível contínuo, tem-se:

$$P_L = \Pi_L = V_{Ldc} \cdot I_L \quad (2.8)$$

$$V_{Ldc} = R_L(V_{Ldc}, I_L) \cdot I_L \quad (2.9)$$

Dessa forma, é necessário que o termo referente à corrente circulando pela lâmpada I_L seja cancelado em (2.9). Para isso, tem-se que:

$$R_L(V_{Ldc}, I_L) = \frac{V_{Ldc}^2}{V_{Ldc} \cdot I_L} = \frac{V_{Ldc}^2}{P_L} \quad (2.10)$$

No entanto, (2.10) apresenta uma falha. A resistência da lâmpada é finita quando a potência cai para zero, o que não é representado por (2.10). Assim, a expressão é reescrita como:

$$R_L(P_L) = \frac{V_{Ldc}^2}{P_L + P_{L0}} \quad (2.11)$$

onde P_{L0} (no caso, $P_{L0} = 0,5W$) é um valor escolhido arbitrariamente que faz uma compensação da potência média da lâmpada para que se evitem erros de convergência quando a potência for nula e a resistência R_L for máxima. Por (2.11), tem-se o gráfico da Figura 2.6. Verifica-se que a resistência calculada $R_L = 114,9\Omega$ é próxima da medida apresentada na Figura 2.2b ($R_{Lmedido} = 113,3\Omega$). Essa comparação é realizada com os dados medidos para operação em altas frequências, pois, nessa situação, a resistência equivalente da lâmpada é linear e ôhmica [31].

Utilizando (2.11), a tensão sobre a lâmpada é dada por:

$$v_L(t, P_L) = \frac{V_{Ldc}^2}{P_L + P_{L0}} \cdot i_L(t) \quad (2.12)$$

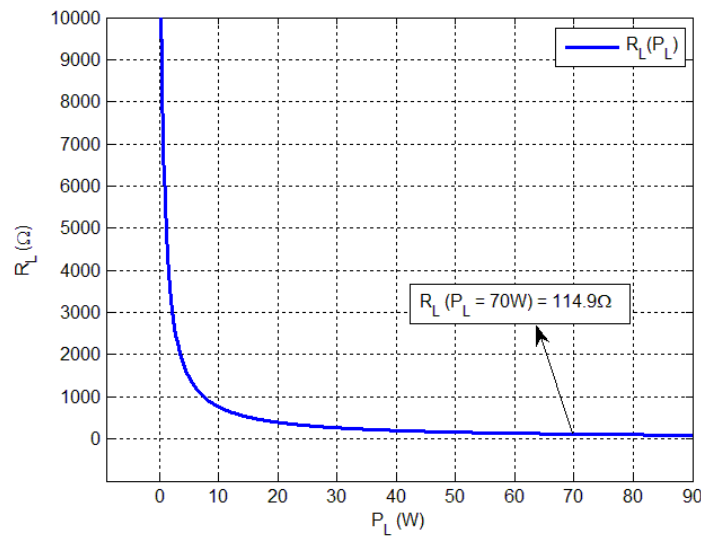


Figura 2.6 - Resistência da lâmpada em função da potência calculada por (2.11)

Através de (2.6) e (2.12), um circuito equivalente da lâmpada é construído com fontes de tensão e corrente controladas a partir de diversas variáveis de entrada. A Figura 2.7 apresenta o diagrama desse circuito equivalente, onde a tensão $v_L(t)$ sobre a lâmpada é representada por $v_{arc}(t)$ e a corrente $i_L(t)$ circulando nela é amostrada como $i_{VA}(t)$.

Nesse modelo proposto em [31], válido apenas para estudos em regime permanente em baixas e altas frequências, a fonte de tensão VA é utilizada unicamente para amostrar a corrente instantânea da lâmpada. E1 implementa a tensão sobre a lâmpada descrita por (12). E2 representa a relação hiperbólica entre a resistência da lâmpada R_L e potência P_L de (11). E3 é uma fonte de corrente controlada usada para representar a potência instantânea da lâmpada, a qual é filtrada pela resistência R3 e pelo capacitor C3. Assim, tem-se que a queda de tensão sobre o capacitor C3 representa a potência média da lâmpada.

É importante ressaltar que a constante de tempo τ do circuito RC definido por R3 e C3 está relacionada à constante da ionização da descarga, afetando portanto o comportamento do circuito em baixas frequências. De acordo com [31], as principais influências dessa constante são na largura e na altura do pico de tensão observado no início de cada semiciclo devido à ionização do gás no interior da lâmpada. No entanto, variando-se esse parâmetro, verificou-se também certa alteração no valor eficaz da tensão sobre a lâmpada nas análises de alta frequência. Assim, o ajuste de $\tau_{MH} = 0,15ms$ foi realizado empírica e iterativamente de forma

que os resultados obtidos fossem satisfatórios para análise tanto em baixas quanto em altas frequências.

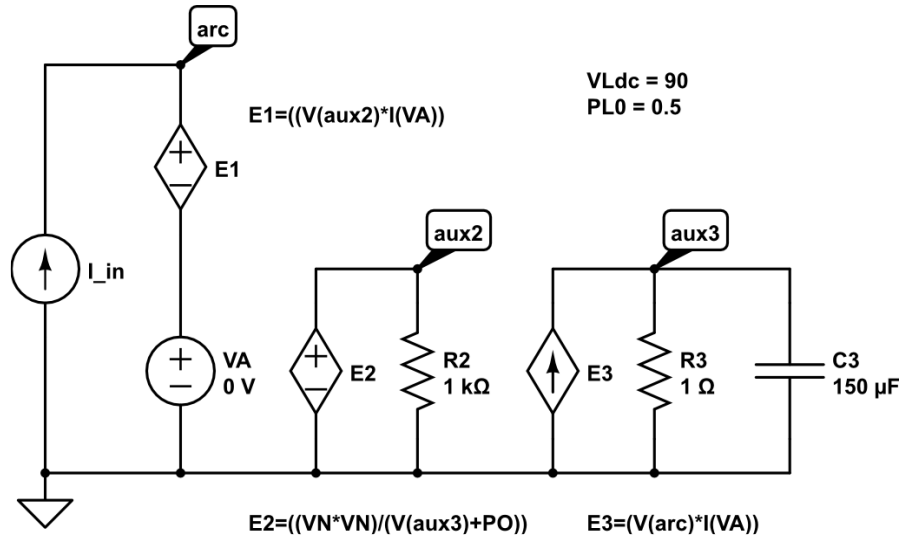


Figura 2.7 - Modelo equivalente da lâmpada - Mader-Horn

2.1.4. Modelo apresentado por Yan (Yan & Hui 2005)

O modelo proposto em [32] é baseado nas equações de balanço de energia e também inclui a dinâmica da queda de tensão no eletrodo bem como os efeitos de histerese da característica V-I da lâmpada. Ele busca representar os processos físicos básicos que ocorrem no componente durante sua operação em regime, sendo que suas equações tratam do modelo físico da coluna do arco elétrico na lâmpada [32].

Dentro da coluna de descarga, a energia é transferida pelos elétrons no campo elétrico aos átomos do gás via colisões elásticas e inelásticas. Conseqüentemente, há um aquecimento do gás. O calor é transferido para fora do sistema basicamente através de processos de condução, convecção, radiação e difusão [32]. Segundo [27], a contribuição da difusão pode ser desprezada devido às condições de pressão no interior do bulbo bem como a contribuição da convecção ao se operar a lâmpada verticalmente. O incremento de temperatura dentro da lâmpada pode ser pela equação de balanço de energia aplicada à coluna de descarga:

$$\frac{dT}{dt} = a_1 \cdot (P_{in} - P_{con} - P_{rad}) \quad (2.13)$$

onde P_{in} é a potência de alimentação da lâmpada, P_{con} é a perda por condução térmica, P_{rad} é a perda por radiação, T é a temperatura da lâmpada e a_1 é uma constante ajustável.

As perdas por radiação são baseadas na fórmula de Boltzmann assumindo que a radiação é opticamente fina (em outras palavras, toda radiação gerada no plasma é capaz de sair dele, não havendo reabsorção de nenhuma parcela de energia pelo próprio plasma [35]). A expressão simplificada é:

$$P_{rad} = a_2 \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot a_3}{k \cdot T}\right) \quad (2.14)$$

onde e é a carga do elétron, k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura do gás (descarga) no interior da lâmpada e a_2 e a_3 são constantes ajustáveis.

As perdas por condução térmica são dadas pela equação de Laplace:

$$P_{con} = a_4 \cdot (T - T_0) \quad (2.15)$$

onde T_0 é a temperatura de recuperação adiabática do tubo do arco, a qual se assume ser $T_0 = 1000K$ [32] e a_4 é uma constante ajustável. A contribuição para o balanço de energia da radiação opticamente espessa é incluída na condutividade térmica [36] representada pela constante ajustável a_4 do modelo.

A potência de alimentação da lâmpada é:

$$P_{in} = i_L^2 \cdot R_L \quad (2.16)$$

onde i_L é a corrente circulando pela lâmpada e R_L é sua resistência equivalente dada pela equação:

$$R_L = \frac{l}{\int \sigma_e(t) \cdot dA} \quad (2.17)$$

onde l é o comprimento do arco elétrico, A_s é a área da seção transversal do arco e $\sigma_e(t)$ é a condutividade elétrica que, por sua vez, é proporcional a concentração de elétrons no gás. Assumindo que a descarga dentro da lâmpada de alta pressão é um plasma, a quantidade de átomos ionizados no gás em equilíbrio térmico é dada pela equação de Saha:

$$n_e = n_0^{1/2} \cdot T^{3/4} \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot V_i}{2 \cdot k \cdot T}\right) \quad (2.18)$$

onde n_e e n_0 são as concentrações de elétrons e de átomos respectivamente e V_i é o potencial de ionização do gás. Como a condutividade elétrica é proporcional à concentração de elétrons, é possível reescrever (2.17) e aproximar a resistência da lâmpada pela expressão:

$$R_L = a_5 \cdot T^{-3/4} \cdot \exp\left(\frac{e \cdot a_6}{2 \cdot k \cdot T}\right) \quad (2.19)$$

onde a_5 e a_6 são constantes ajustáveis do modelo.

Por último, tem-se que a tensão $v_L(t)$ sobre a lâmpada é dada pela equação:

$$v_L(t, T) = R_L(T) \cdot i_L(t) \quad (2.20)$$

Apesar de (2.13), (2.14), (2.15), (2.19) e (2.20) determinarem as características terminais da coluna de descarga da lâmpada, um estudo mais completo da tensão sobre a lâmpada deve incluir não só a queda de tensão na coluna do arco, mas também a queda de tensão sobre as duas regiões dos eletrodos. Na literatura há estudos que mostram que a queda de tensão no eletrodo é uma função do tempo sob condições de operação em corrente alternada [37]. A tensão nos eletrodos atinge um máximo após cada zero de corrente. Em baixas frequências, esse máximo é seguido de um mínimo e o período de meia-tensão (meio ciclo de onda) é finalizado com um segundo máximo. Aumentando-se a frequência de operação, o mínimo e o segundo máximo de tensão eventualmente desaparecem. Além disso, no tempo de meio-período, independentemente da frequência, a tensão no eletrodo é sempre maior quando a corrente aumenta de zero ao máximo do que quando ela diminui do máximo ao zero [32].

Devido a essas questões e outros problemas de se modelar o processo ocorrendo nos eletrodos citados em [38], o modelo da queda de tensão nos mesmos proposto em [32] é empírico e definido por:

$$V_{ele}(t) = A \cdot \exp(-B \cdot t) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot t) + D \cdot t \quad (2.21)$$

onde f é a frequência de operação da lâmpada e A , B , C e D são constantes ajustáveis do modelo. O lado esquerdo de (2.21) gera o primeiro máximo de tensão e o lado direito gera o segundo máximo de tensão. A amplitude é controlada tanto por A quanto por B . A assimetria

mencionada é controlada pela variável B. Vale mencionar que as variáveis B, C e D são constantes dependentes da frequência de operação da lâmpada, sendo B e D funções lineares da mesma [32]. Como o potencial de ionização do sódio é aproximadamente 5,14V [39], a queda de tensão média em um semiciclo de alimentação no eletrodo assume esse mesmo valor [32]. Além disso, a forma de onda de um semiciclo da queda de tensão no eletrodo deve seguir a curva apresentada na Figura 2.8a para operação em baixas frequências e ir tomando a forma da curva apresentada na Figura 2.8b para operação em altas frequências [27].

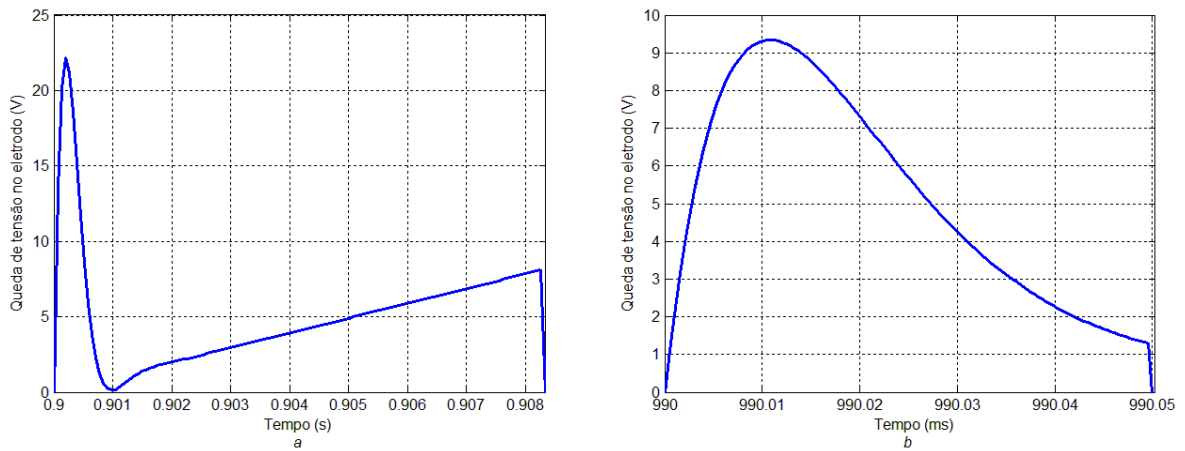


Figura 2.8 - Queda de tensão dinâmica no eletrodo em: (a) 60Hz e (b) 10kHz

Assim, para definir as constantes A a D, utilizando algoritmos genéticos (GAs), busca-se minimizar a função:

$$\begin{aligned}
 U(A, B, C, D) &= \\
 &= \min \left[\left(\tilde{V} - \tilde{V}^* \right)^2 \right] \\
 a_{ele} &= (A, \dots, D) \in S_{ele}
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

onde \tilde{V} é o valor médio mencionado da tensão sobre o eletrodo obtido pela simulação utilizando (2.21), \tilde{V}^* é o valor do potencial de ionização do sódio e S_{ele} é o espaço de solução potencial.

A Tabela 2.2 apresenta os valores levantados para as constantes ajustáveis do modelo da lâmpada baseado para a queda de tensão dinâmica sobre o eletrodo para diferentes frequências de operação. Os mesmos foram obtidos através do uso de GAs para diferentes frequências de estudo que buscavam minimizar (2.22). O tamanho da população foi definido como 60. A

taxa de recombinação, cuja estratégia escolhida foi a espalhada, foi estabelecida como 0,8. A taxa de mutação bilateral foi ajustada como 0,2. Utilizou-se também o método de seleção de torneio em grupos de 4 indivíduos, além de uma propagação dos 3 melhores indivíduos (elite) de uma geração para a próxima. A tolerância mínima buscada foi de um erro inferior a 10^{-9} para um máximo de 1500 gerações.

Tabela 2.2 - Constantes ajustáveis do modelo Yan relativas à queda de tensão no eletrodo

Queda de tensão no eletrodo					
Const.	60Hz	5kHz	10kHz	$f < 2kHz$	$f > 2kHz$
A	70.2	70.2	70.2	70.2	70.2
B	3979.0	44692.2	89620.1	$(8.62 \cdot f) + 2842$	$(8.62 \cdot f) + 2842$
C	10.2	0.52	0.52	$[12.79 \cdot e^{-(0.004701 \cdot f)}] + 0.52$	0.52
D	979.7	4599.6	9690.2	$(0.88 \cdot f) + 689.4$	$(0.88 \cdot f) + 689.4$

Com isso, é possível reescrever (2.20) como:

$$v_L(t, T) = R_L(T) \cdot i_L(t) + V_{ele}(t) \quad (2.23)$$

Percebe-se por (2.13) a (2.19) que todos os parâmetros do modelo que seriam funções da composição do plasma, pressão, temperatura e volume do arco dentro da lâmpada HPS foram substituídos direta ou indiretamente pelas variáveis ajustáveis a_1 a a_6 . Isso, pois a obtenção dos parâmetros reais é complexa, exigindo não só a análise profunda do catálogo do fabricante e da ficha de dados da lâmpada, mas também a obtenção via testes em laboratório de medições de difícil realização (como, por exemplo, percentuais de mistura de gases e pressões parciais). Por esse motivo o modelo proposto em [32] adota uma abordagem de "engenharia reversa" que exige o uso de GAs para determinar as constantes ajustáveis a partir de medições reais da tensão e corrente da lâmpada em operação.

Considerando os resultados experimentais levantados apresentados na Figura 2.2, o problema do ajuste das constantes a_1 a a_6 , as quais são independentes da frequência de operação, é um problema matemático de minimização da função:

$$\begin{aligned}
 J(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6) &= \\
 &= \min \left[\sum (V_j - V_j^*)^2 + \sum (I_j - I_j^*)^2 \right] \\
 a_{arc} &= (a_1, \dots, a_6) \in S_{arc}
 \end{aligned} \quad (2.24)$$

onde V_j e I_j são, respectivamente, os valores de tensão e corrente obtidos pela simulação utilizando (2.13), (2.14), (2.15), (2.19) e (2.23) do modelo proposto, V_j^* e I_j^* são, respectivamente, os valores de tensão e corrente medidos experimentalmente cujas curvas correspondem às de V_j e I_j no mesmo instante de tempo e S_{arc} é o espaço de solução potencial. É importante mencionar que apenas as medições realizadas em baixas frequências (60Hz) são utilizadas como entrada para o algoritmo de minimização do GA. Segundo [27], se as constantes forem determinadas com medidas em baixas frequências de operação, o modelo final é capaz de prever as características terminais da lâmpada para qualquer intervalo de frequências. Ainda de acordo com [27], isso pode ser explicado pelo fato de que o índice de modulação do plasma reduz de 20% a 60Hz para 1% a 10kHz. Dessa forma, apenas nesse caso as constantes determinadas em baixas frequências abrangem uma gama de temperaturas de operação que incluem não só as de baixa mas também as de alta frequência.

A Tabela 2.3 apresenta os valores levantados para as constantes ajustáveis do modelo da lâmpada (independentes da frequência de operação) baseado nas equações de balanço de energia. Os mesmos foram obtidos através de GAs que buscavam minimizar (2.24). Os parâmetros de calibração e operação desses algoritmos são os mesmos utilizados para a obtenção das constantes relativas à queda de tensão dinâmica sobre o eletrodo.

Tabela 2.3 - Constantes ajustáveis do modelo Yan relativas aos parâmetros da lâmpada

Parâmetros da lâmpada (independentes da frequência)					
a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
6813,896	6846,868	0,71865	0,32029	1,23069	2,03358

De acordo com (2.23), um circuito equivalente da lâmpada é construído com fontes de tensão controladas a partir de diversas variáveis de entrada. A Figura 2.9 apresenta o diagrama desse circuito equivalente, onde a tensão $v_L(t)$ sobre a lâmpada é representada por $v_{arc}(t)$ e a corrente $i_L(t)$ circulando nela é amostrada como $i_{VA}(t)$.

Nesse modelo, válido para estudos em baixas e altas frequências, a fonte de tensão VA é utilizada unicamente para amostrar a corrente instantânea circulando na lâmpada. E_{varc} implementa a tensão sobre a lâmpada descrita por (2.23). E_{power} representa a potência consumida pela resistência equivalente da lâmpada (2.16). E_{rlamp} é usada para representar a resistência equivalente da lâmpada, a qual varia segundo (2.19) em função da temperatura do gás

no interior do bulbo. E_{rad} representa as perdas por radiação (2.14) e E_{con} representa as perdas por condução (2.15). E_{tem} fornece um sinal de tensão que representa a temperatura do gás, a qual é submetida a um integrador ideal de ganho $K_i = 1,0$ (cujo valor inicial foi definido arbitrariamente como $T_{init} = 4500K$ baseado nas informações apresentadas em [27]) para que a dinâmica de temperatura da lâmpada seja contemplada. Esses blocos citados implementam as equações do modelo da lâmpada independentes da frequência de operação.

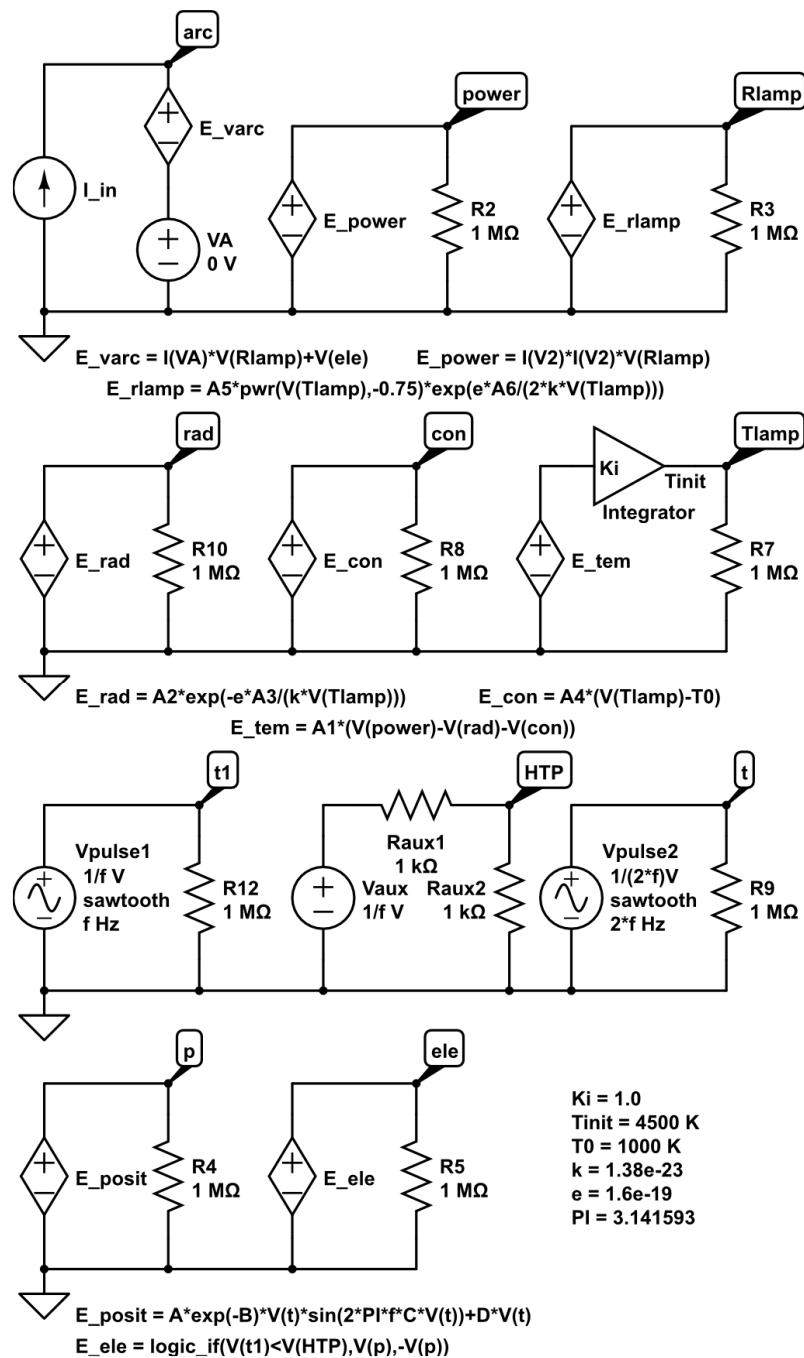


Figura 2.9 - Modelo equivalente da lâmpada - Yan

Por último, para representar o ciclo completo da queda de tensão dinâmica sobre os eletrodos, utiliza-se a fonte E_{ele} . V_{t1} e V_{HTP} são as saídas dos geradores de pulsos V_{pulse1} e do divisor de tensão formado por R_{aux1} e R_{aux2} respectivamente. O gerador de pulsos V_{pulse1} gera uma onda dente-de-serra como a apresentada na Figura 2.10, onde o tempo de subida e o valor de pico da onda são iguais ao período TR completo da fonte de alimentação do circuito. O divisor de tensão consiste em uma fonte contínua cujo valor de tensão é igual ao período completo da fonte de alimentação do circuito e dois resistores (R_{aux1} e R_{aux2}) de valores iguais. Assim, V_{HTP} representa o meio período da fonte de alimentação do circuito. O gerador de pulsos V_{pulse2} também gera uma onda dente de serra como a apresentada na Figura 2.10, onde o tempo de subida da onda e o valor de pico são iguais à metade do período TR da fonte de alimentação do circuito. Quando a saída de V_{pulse2} é menor que V_{HTP} , V_{ele} é igual ao valor negativo de V_p (sendo V_p a representação de (2.21)). Dessa maneira, o ciclo completo da onda de tensão sobre o eletrodo é obtido.

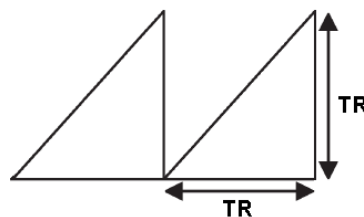


Figura 2.10 - Onda dente de serra

2.2. Considerações finais do capítulo

Nesse capítulo discutiu-se a metodologia de obtenção dos quatro modelos no domínio no tempo da lâmpada HPS de 70W em estudo que terão suas performances comparadas. Todas as considerações e aproximações envolvidas na montagem das equações dos modelos foram explicitadas. Mais importante, foram apresentados não só os parâmetros levantados para cada um desses modelos, mas também seus circuitos elétricos equivalentes.

Durante o processo de levantamento dos parâmetros de cada um dos modelos, verificou-se que eles apresentam diferentes processos com diferentes dificuldades de obtenção. De fato,

o modelo do resistor puro apresenta uma dificuldade mínima de obtenção. Basta realizar uma medida de tensão e uma medida de corrente terminal da lâmpada para obtê-lo. Já o modelo proposto por Ferrero exige que diversas medições sejam realizadas. Isso implica em testes simples, mas numerosos, uma vez que é necessário realizar medições de tensão e corrente terminais para diferentes pontos de operação (no caso, diferentes valores de potência fornecida à lâmpada). Por sua vez, o modelo Mader-Horn não exige que medições sejam realizadas no sistema, bastando apenas conhecer os valores nominais de potência e tensão de operação da lâmpada fornecidos pelo fabricante. No entanto, para sua obtenção, ele exige um ajuste iterativo de uma constante de tempo inerente ao sistema. Por último, o modelo Yan, assim como o do resistor puro, exige apenas que sejam realizadas uma medida de tensão e uma medida de corrente terminal da lâmpada. Mas a semelhança partilhada com o processo de obtenção do resistor puro é apenas essa, já que para obtenção dos parâmetros do modelo Yan é necessário ajustar e executar um algoritmo genético, processos os quais podem durar longos períodos de tempo.

Capítulo 3

3. Validação e comparação dos modelos no domínio do tempo

Os modelos no domínio do tempo levantados e apresentados no capítulo anterior devem ser validados e comparados. Inicialmente, os resultados obtidos via simulação dos modelos em estudo são contrapostos com resultados experimentais na seção 3.1 para alimentação com ondas senoidais. Esses resultados experimentais são os mesmo utilizados para obter e ajustar os parâmetros dos modelos no capítulo anterior. Para reafirmar a validade dos modelos, novos testes com frequências envolvidas diferentes daquelas utilizadas nos casos de alimentação senoidal são realizados. Assim, na seção 3.2 os mesmos são simulados operando com injeção de terceira harmônica (visando evitar o fenômeno da ressonância acústica). Os resultados obtidos são apresentados e comparados com os resultados experimentais para validação e comparação da performance dos modelos. Já na seção 3.3 é apresentada a simulação com variação da corrente imposta a lâmpada para observação do comportamento de impedância incremental negativa da lâmpada. Por último, são apresentados os tempos de simulação individuais dos modelos em estudo na seção 3.4.

3.1. Circuito excitado por corrente senoidal

Devido ao circuito de filtro devidamente projetado existente na saída do conversor, as correntes medidas apresentam formas de onda muito semelhantes à senóides [33]. Essa semelhança pode ser observada na Figura 3.1, onde são apresentadas senóides ideais de mesmo valor eficaz das medições realizadas e as correntes amostradas experimentalmente (apresentadas na Figura 2.2).

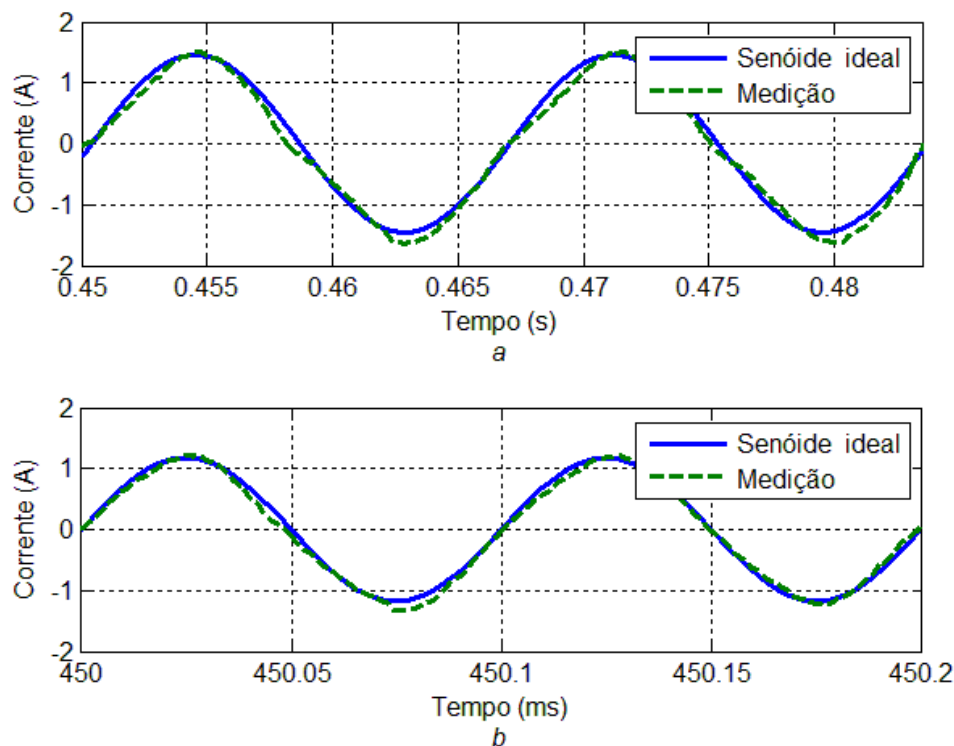


Figura 3.1 - Correntes senoidais ideais e medidas para operação em: (a) 60Hz / 1,01A_{rms} e (b) 10kHz / 0,81A_{rms}

Utilizando os quatro modelos apresentados no capítulo anterior, são realizadas simulações injetando correntes senoidais ideais da Figura 3.1 no sistema, as quais possuem mesmo o valor eficaz que o das medições realizadas e as correntes amostradas experimentalmente da Figura 2.2 (1,01A_{rms} a 60Hz e 0,81A_{rms} a 10kHz). As medições realizadas em laboratório e os resultados obtidos via simulação para operação da lâmpada em 60Hz são apresentados na Figura 3.2a e para operação em 10kHz são apresentados na Figura 3.2b. Os valores eficazes das tensões simulados e medidos são apresentados na Tabela 3.1.

Analisando a Figura 3.2, percebe-se que, visualmente, dentre os modelos sem estudo, o modelo Yan é o que melhor acompanha o contorno da curva da medição. Uma análise mais detalhada dessa conformidade é necessária.

Tabela 3.1 - Valores eficazes de tensão na lâmpada com alimentação senoidal

f	Medidas (V _{rms})	Modelo			
		Resistor (V _{rms})	Ferrero (V _{rms})	Mader- Horn (V _{rms})	Yan (V _{rms})
60Hz	93,79	114,43	110,74	89,75	90,85
10kHz	91,82	91,85	90,11	89,74	93,52

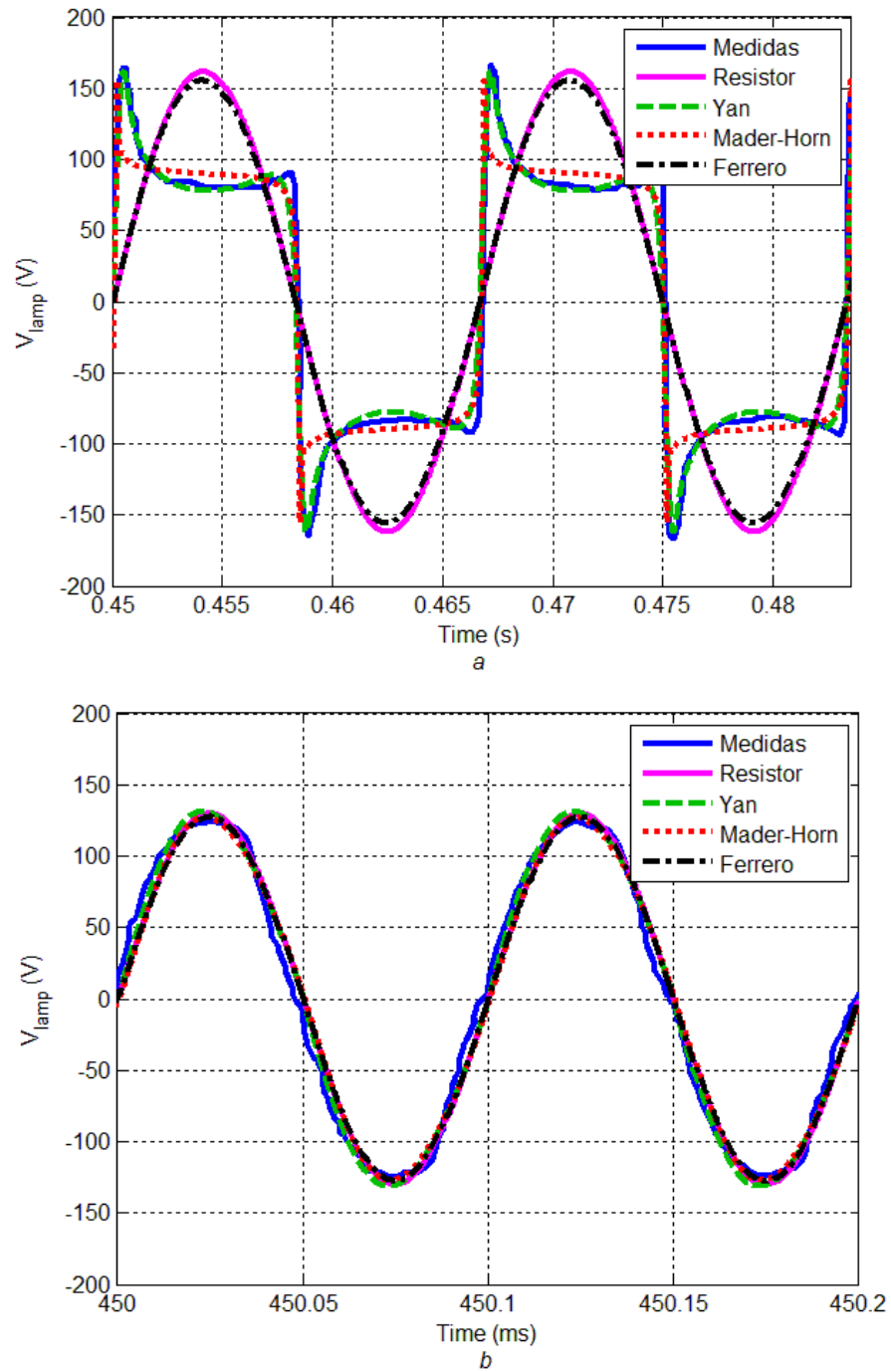


Figura 3.2 - Tensão sobre a lâmpada (medições e simulações) com alimentação em: (a) 60Hz e (b) 10kHz

O erro no tempo das simulações dos modelos a 60Hz e a 10kHz em relação às medições realizadas em laboratório é calculado por:

$$erro(t) = v_{simulado}(t) - v_{medido}(t) \quad (3.1)$$

O erro entre os valores de tensão eficazes das ondas é:

$$Erro_{rms\%} = \left| \frac{V_{rms_simulado} - V_{rms_medido}}{V_{rms_medido}} \right| \cdot 100 \quad (3.2)$$

O IAE é um índice de desempenho bom para fins de simulação, já que atribui um peso igual a todo tipo de desvio [40]. Ele é calculado por:

$$IAE = \int_0^{T_{estudo}} |erro(t)| \cdot dt \quad (3.3)$$

O ISE atribui um peso maior a desvios de grande amplitude [13] e é calculado através de:

$$ISE = \int_0^{T_{estudo}} (erro(t))^2 \cdot dt \quad (3.4)$$

O ITAE reduz a contribuição de desvios nos primeiros instantes para o índice de desempenho e atribui um maior peso a desvios em regime permanente. Ele é calculado por:

$$ITAE = \int_0^{T_{estudo}} t \cdot |erro(t)| \cdot dt \quad (3.5)$$

A Tabela 3.2 apresenta os valores dos índices de desempenho dos modelos calculados a partir de (3.2) a (3.5). O melhor desempenho é indicado por valores mais reduzidos dos índices calculados. Logo, pelos dados levantados, é possível perceber que o modelo que apresentou maior similitude para as diferentes frequências de operação foi o modelo Yan.

Tabela 3.2 - Indicadores de performance calculados com alimentação senoidal

f	Indicador	Modelo			
		<i>Resistor</i>	<i>Ferrero</i>	<i>Mader-Horn</i>	<i>Yan</i>
60Hz	Erro rms%	22,0%	18,1%	4,3%	3,1%
	IAE	1,8252	1,7366	0,4193	0,2157
	ISE	130,9498	120,1505	14,1295	5,8713
	ITAE	0,8513	0,8099	0,1952	0,1008
10kHz	Erro rms%	0,1%	1,9%	2,3%	1,9%
	IAE	0,0017	0,0017	0,0018	0,0015
	ISE	0,0224	0,0222	0,0260	0,0158
	ITAE	$0,78 \cdot 10^{-3}$	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$0,83 \cdot 10^{-3}$	$0,68 \cdot 10^{-3}$

3.2. Circuito excitado com injeção de terceira harmônica de corrente

Para se evitar o fenômeno da ressonância acústica, é possível trabalhar com injeção de terceira harmônica [41] e [42]. Resultados experimentais são levantados utilizando-se a mesma montagem citada no capítulo anterior (apresentada na Figura 2.1) com a lâmpada HPS em operação com tensão e corrente nominais ($90V_{rms}$ e $0,8A_{rms}$). A lâmpada é operada com ondas de frequências fundamentais de 3kHz e 5kHz com injeção de terceira harmônica de tensão cuja amplitude é igual a 30,5% da fundamental. A escolha desse valor percentual é analisada no Apêndice B. A Figura 3.3a apresenta as curvas de tensão e corrente experimentais na lâmpada levantadas para a fundamental 3kHz e a Figura 3.3a apresenta as mesmas curvas para a fundamental de 5kHz. A Tabela 3.3 apresenta as informações condensadas de conteúdo harmônico e distorção harmônica total (THD) da tensão na lâmpada e a Tabela 3.4 da corrente.

Tabela 3.3 - Espectro harmônico da tensão medida na lâmpada

Fundamental	Ordem	f (Hz)	Tensão (V_{rms})	Tensão (% fundam.)	THD _v (%)
3kHz	Fundam.	3000	89,84	100,00	32,01
	3ª Harm.	9000	26,41	31,91	
5kHz	Fundam.	5000	90,13	100,00	29,73
	3ª Harm.	15000	26,50	29,40	

Tabela 3.4 - Espectro harmônico da corrente medida na lâmpada

Fundamental	Ordem	f (Hz)	Corrente (I_{rms})	Corrente (% fundam.)	THD _i (%)
3kHz	Fundam.	3000	0,809	100,00	37,82
	Harm. 3	9000	0,300	37,04	
5kHz	Fundam.	5000	0,812	100,00	35,22
	Harm. 3	15000	0,281	34,54	

Utilizando os modelos apresentados no capítulo anterior, são realizadas simulações injetando-se correntes cujas fundamentais são senóides que possuem $0,81A_{rms}$ e frequências 3kHz e 5kHz com injeção apenas de terceira harmônica (9kHz e 15kHz) de amplitude igual a 30,5% a da fundamental. Com isso, busca-se uma terceira harmônica de tensão com amplitude igual a 30,5% a da fundamental (mesmo valor utilizado nas medições), já que os modelos são baseados em uma fonte de corrente e tendem a equivaler a resistores em altas frequências. As me-

dições realizadas em laboratório e os resultados obtidos via simulação para operação da lâmpada em 3kHz são apresentadas na Figura 3.4a e em 5kHz na Figura 3.4b. Os valores eficazes das tensões sobre a lâmpada simulados e medidos são apresentados na Tabela 3.5.

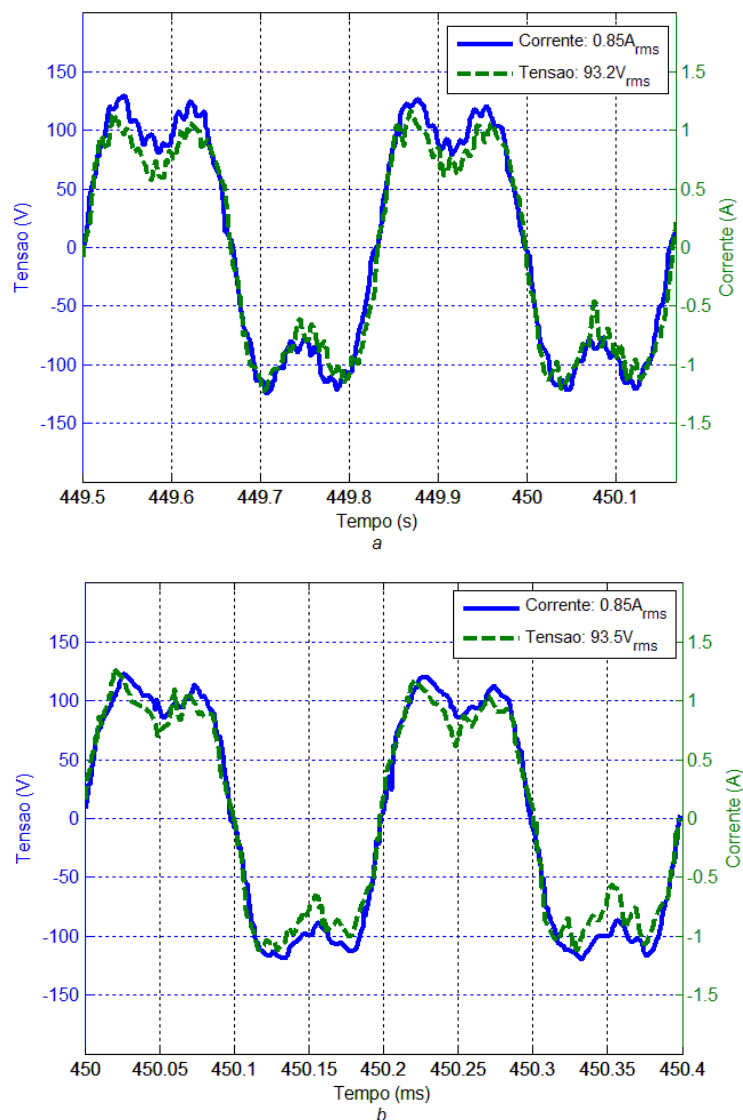


Figura 3.3 - Tensão e corrente medidas na lâmpada para operação com injeção de terceira harmônica com fundamental de: (a) 3kHz e (b) 5kHz

Tabela 3.5 – Valores eficazes de tensão na lâmpada com injeção de terceira harmônica

f	Medidas (V_{rms})	Modelo			
		Resistor (V_{rms})	Ferrero (V_{rms})	Mader- Horn (V_{rms})	Yan (V_{rms})
3kHz	93,17	95,95	93,95	89,76	92,80
5kHz	93,48	95,95	93,95	89,76	93,23

Pela Figura 3.4, os modelos geram traçados que acompanham bem as curvas de medições. Na Tabela 3.6 têm-se os índices de desempenho calculados. O modelo Yan foi, também nesse caso, o que apresentou maior similitude para as diferentes frequências em estudo.

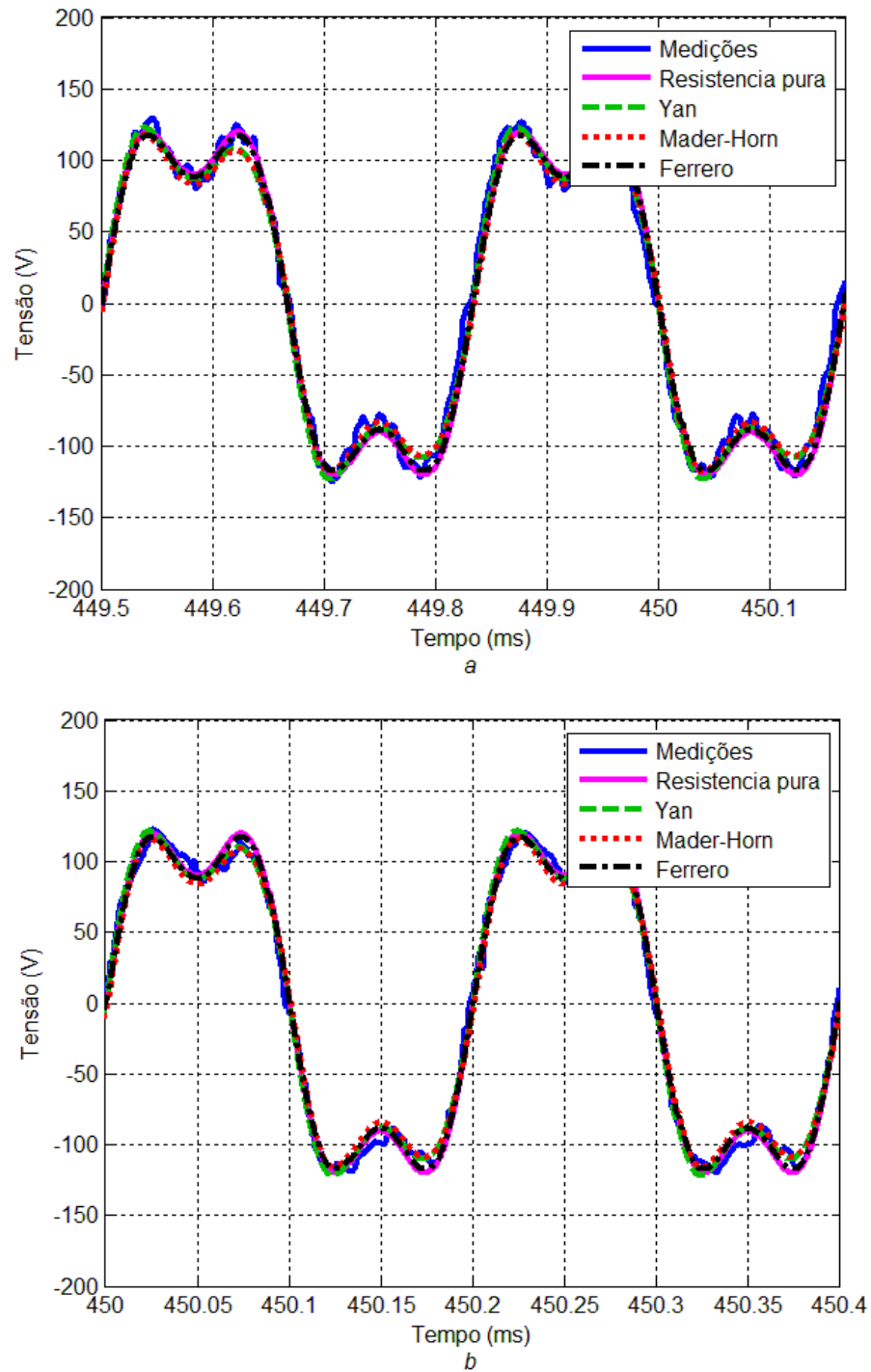


Figura 3.4 - Tensão sobre a lâmpada para operação com injeção de terceira harmônica com fundamental de: (a) 3kHz e (b) 5kHz

Tabela 3.6 - Indicadores de performance calculados com injeção de terceira harmônica

f	Indicador	Modelo			
		<i>Resistor</i>	<i>Ferrero</i>	<i>Mader-Horn</i>	<i>Yan</i>
3kHz	Erro rms%	3,0%	0,8%	3,7%	0,4%
	IAE	0,0053	0,0050	0,0053	0,0047
	ISE	0,0651	0,0595	0,0687	0,0500
	ITAE	0,0024	0,0023	0,0024	0,0021
5kHz	Erro rms%	2,6%	0,5%	4,0%	0,3%
	IAE	0,0025	0,0023	0,0027	0,0022
	ISE	0,0216	0,0190	0,0278	0,0188
	ITAE	0,0011	0,0010	0,0012	0,0010

3.2.1. Dinâmica dos modelos com injeção de harmônicas e ressonância acústica

O fenômeno da ressonância acústica (AR) é causado por flutuações na potência da lâmpada em frequências que correspondem às faixas favoráveis à excitação do mesmo. Assim, ele ocorre se a amplitude dessas harmônicas for maior do que o valor limiar hipotético da potência normalizada necessário para sua excitação [42], [43], [44] apresentado na Figura 3.5. Outras técnicas de verificação de ocorrência são apresentadas em [45]. A Figura 3.5a apresenta o conteúdo harmônico apenas para banda lateral positiva da potência normalizada pelo módulo da potência média calculado via transformada rápida de Fourier de banda lateral dupla (DSFFT) para operação com fundamental em 3kHz e a Figura 3.5b para 5kHz. Foram utilizadas como base para cálculo da potência as ondas de tensão e corrente da Figura 3.3 referentes às medições realizadas em laboratório. Verifica-se pela Figura 3.5 que, considerando apenas o critério apresentado, a ressonância acústica é evitada nos casos em estudo.

É importante mencionar que esse critério não é condição suficiente para definir a não ocorrência do fenômeno da ressonância acústica. De fato, não atender o limite teórico implica na ocorrência do fenômeno, mas operar abaixo dele não garante que o mesmo será evitado. Para isso, utilizam-se os dados levantados em estudos apresentados em [46] e [47], segundo os quais, na frequência de operação estudada, valores de injeção de terceira harmônica superiores a 27% implicam na ocorrência de ressonância acústica. Logo, como o fator de injeção de harmônica utilizado no estudo é de 30,5%, verifica-se que, pela junção dos dois critérios citados, não há ocorrência do fenômeno.

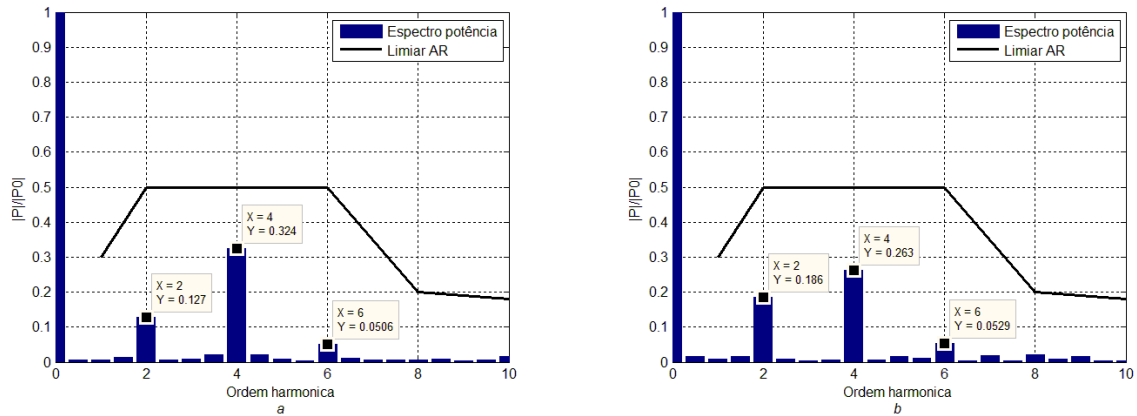


Figura 3.5 - Espectro harmônico (banda lateral positiva da DSFFT) da potência medida em laboratório com injeção de terceira harmônica de fundamental: (a) 3kHz e (b) 5kHz

Para verificar a resposta dos modelos perante a injeção de harmônicas, seus espectros harmônicos de potências também são levantados. A Figura 3.6a apresenta o conteúdo harmônico apenas para banda lateral positiva da potência normalizada pelo módulo da potência média calculado via DSFFT para operação com fundamental em 3kHz e a Figura 3.6b para 5kHz. Para as simulações, utilizaram-se as tensões apresentadas na Figura 3.3 e correntes com fundamentais senoidais e terceira harmônica de amplitude igual a 30,5% da fundamental

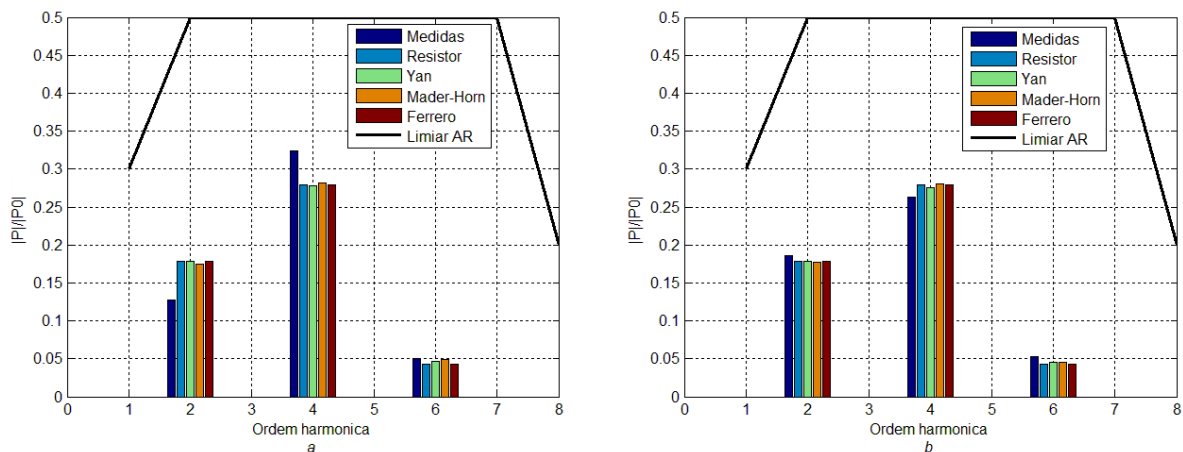


Figura 3.6 - Espectro harmônico (banda lateral positiva da DSFFT) das potências medidas em laboratório e simuladas através dos modelos com injeção de terceira harmônica de fundamental: (a) 3kHz e (b) 5kHz

Os resultados apresentados na Figura 3.6 sugerem que os modelos representam bem a reação da lâmpada à injeção de terceira harmônica, sendo notada a diferença entre as amplitudes das harmônicas uma vez que as THDs de tensão e corrente das medições apresentadas na Ta-

bela 3.3 e Tabela 3.4 não são exatamente as mesmas da simulação. De fato, os valores de magnitude da distorção referente à terceira harmônica e as THDs de tensão e corrente das medições e das simulações são apresentados na Tabela 3.7. Os dados de THD de potência das medições e das simulações são apresentados na Tabela 3.8.

Pela Tabela 3.7, verifica-se que, no sistema real, a THD de corrente é inferior a de tensão, diferentemente do que é verificado pelas simulações. Na montagem realizada em laboratório, é injetada terceira harmônica de tensão em malha aberta. Assim, não há nenhum tipo de controle ou realimentação para se prever e considerar a dinâmica da lâmpada. Como o modelo é baseado em fontes ideais de corrente e não possui o filtro de carga do reator eletrônico real, é de se esperar que ele apresente uma resposta diferente da lâmpada. No entanto, verifica-se pela Tabela 3.8 que o comportamento da potência é relativamente melhor representado pelos modelos que o da tensão e da corrente, o que é conveniente já que a ocorrência da ressonância acústica, como mencionado, está fortemente relacionada a flutuações na potência da lâmpada.

Tabela 3.7 - THDs de corrente e tensão medidas e simuladas para operação com injeção de harmônicas

f	Modelo	Magnitude de I 3ª harm. (% da fundamental)	Magnitude de V 3ª harm. (% da fundamental)	THD _I (%)	THD _V (%)
3kHz	Medições	37,04	31,91	37,82	32,01
	Resistor	30,50	30,50	30,50	30,50
	Ferrero	30,50	30,50	30,50	30,51
	Mader-Horn	30,50	31,00	30,50	33,64
	Yan	30,50	30,90	30,50	35,78
5kHz	Medições	34,54	29,40	35,22	29,73
	Resistor	30,50	30,50	30,50	30,50
	Ferrero	30,50	30,50	30,50	30,51
	Mader-Horn	30,50	31,80	30,50	36,35
	Yan	30,50	31,30	30,50	37,24

Tabela 3.8 - THDs das potências medidas e simuladas para operação com injeção de harmônicas

f	Modelo	Magnitude de P 2ª harm. (% da fundamental)	Magnitude de P 4ª harm. (% da fundamental)	Magnitude de P 6ª harm. (% da fundamental)	THD _P (%)
3kHz	Medições	12,72	32,43	5,06	50,21
	Resistor	17,84	27,90	4,26	50,00
	Ferrero	17,84	27,90	4,26	50,00
	Mader-Horn	17,43	28,18	4,89	50,50
	Yan	17,80	27,74	4,69	50,23
5kHz	Medições	18,63	26,25	5,29	50,17
	Resistor	17,84	27,90	4,26	50,00
	Ferrero	17,84	27,90	4,26	50,00
	Mader-Horn	17,72	28,05	4,49	50,26
	Yan	17,87	27,59	4,52	49,99

3.3. Comportamento de impedância incremental negativa

A lâmpada HPS possui um comportamento de impedância incremental negativa típico de muitas lâmpadas HID [3]. Essa característica deve ser lembrada ao se propor uma estratégia de controle da lâmpada, uma vez que é de extrema importância para a dinâmica do sistema. Assim, é necessário verificar se os modelos propostos representam bem esse comportamento.

Utilizando os modelos propostos no capítulo anterior, simula-se uma situação em que a lâmpada opera a 5kHz com corrente senoidal igual a nominal medida para altas frequências da Figura 2.2b ($0,81A_{rms}$). Variando-se essa corrente de 75% até 125% desse valor, encontrou-se a partir da simulação iterativa dos modelos a relação entre a tensão e a corrente na lâmpada apresentada na Figura 3.7a para o modelo do resistor puro, na Figura 3.7b para o modelo Yan, na Figura 3.7c para o modelo Mader-Horn e na Figura 3.7d para o modelo Ferreiro. Os valores admitidos como tensões base (referidos também como nominais) são aqueles obtidos para simulação com a corrente definida como nominal de $0,81A_{rms}$.

Percebe-se pela Figura 3.7 que o modelo Yan, diferentemente dos outros modelos, leva em consideração o comportamento de impedância incremental negativa da lâmpada citado. As informações da Figura 3.7b condizem com os resultados levantados através de diferente teste em [12] para uma lâmpada OSRAM VIALOX NAV E LONGLIFE 70W, onde, em valores aproximados, se verificou que, para reduções de 10% e 20% na corrente em relação ao seu valor nominal, a tensão subia respectivamente 3% e 6% e, para um aumento de 10% e 20% na corrente, a tensão caía respectivamente 3% e 7% em relação a nominal.

Para completar a análise, utilizando o modelo Yan, simula-se uma situação em que a lâmpada opera com fundamental de corrente em 5kHz de $0,81A_{rms}$ e injeção de terceira harmônica de 30,5% e encontra-se uma tensão sobre a lâmpada de $93,2V_{rms}$. Variando-se essa corrente de 75% até 125% desse valor, encontrou-se a partir da simulação iterativa do modelo a relação entre a tensão e a corrente na lâmpada apresentada na Figura 3.8. A Figura 3.9a apresenta a corrente e a tensão medidas nas mesmas condições de operação para um degrau durante quinze ciclos de 10% de acréscimo em relação a corrente com injeção de terceira harmônica e a Figura 3.9b para um degrau de 10% de redução. O teste é válido para apresentar a dinâmica de impedância incremental negativa e reafirmar os dados da Figura 3.8.

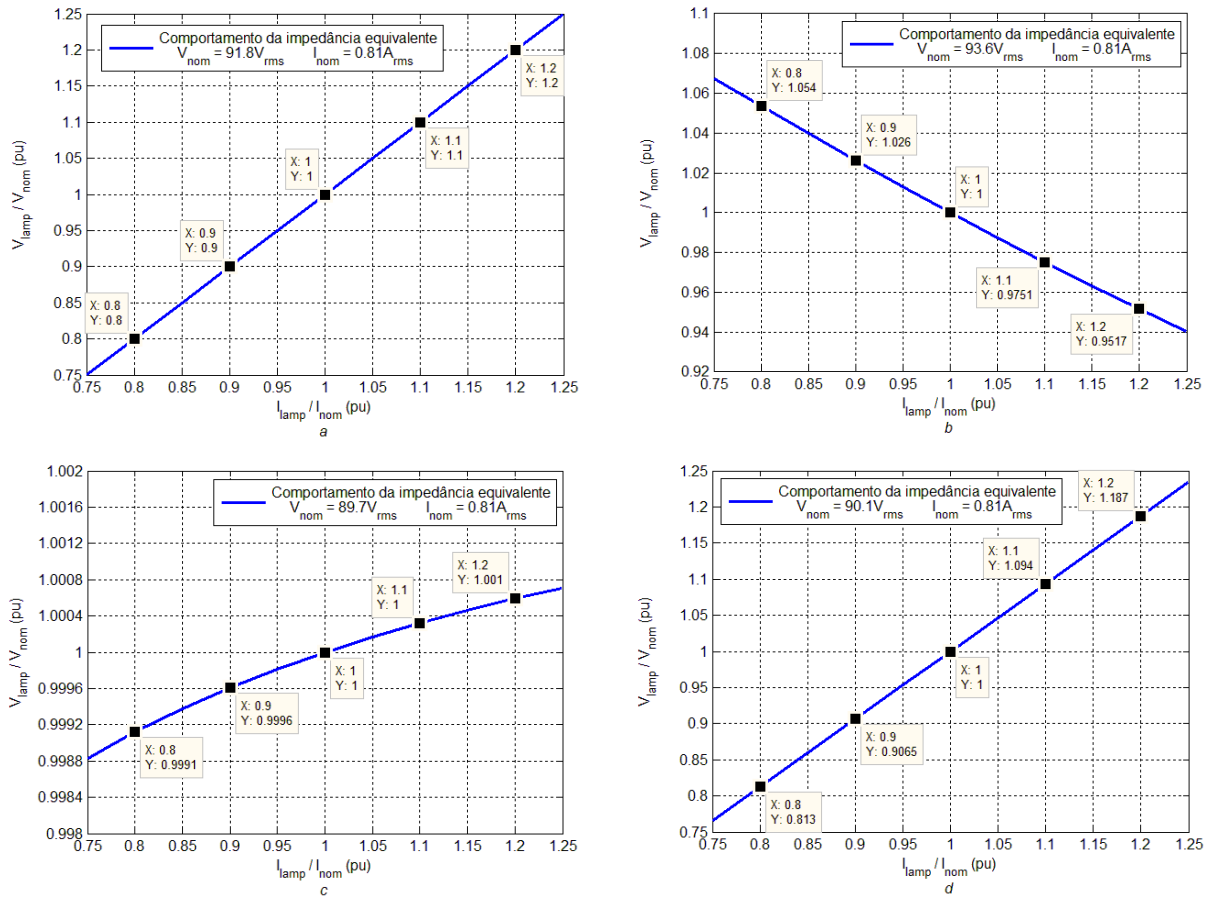


Figura 3.7 - Comportamento da impedância equivalente da lâmpada alimentada com corrente senoidal de 5kHz para o modelo: (a) resistor puro, (b) Yan, (c) Mader-Horn e (d) Ferrero

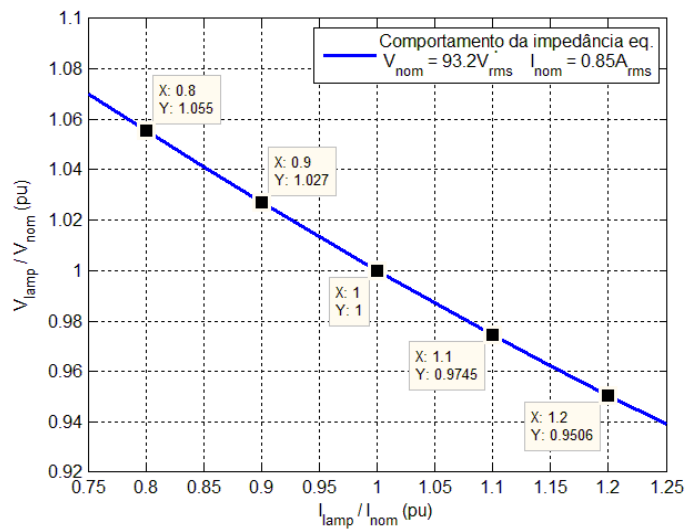


Figura 3.8 - Comportamento da impedância equivalente da lâmpada alimentada com injeção de terceira harmônica com fundamental de 5kHz para o modelo Yan

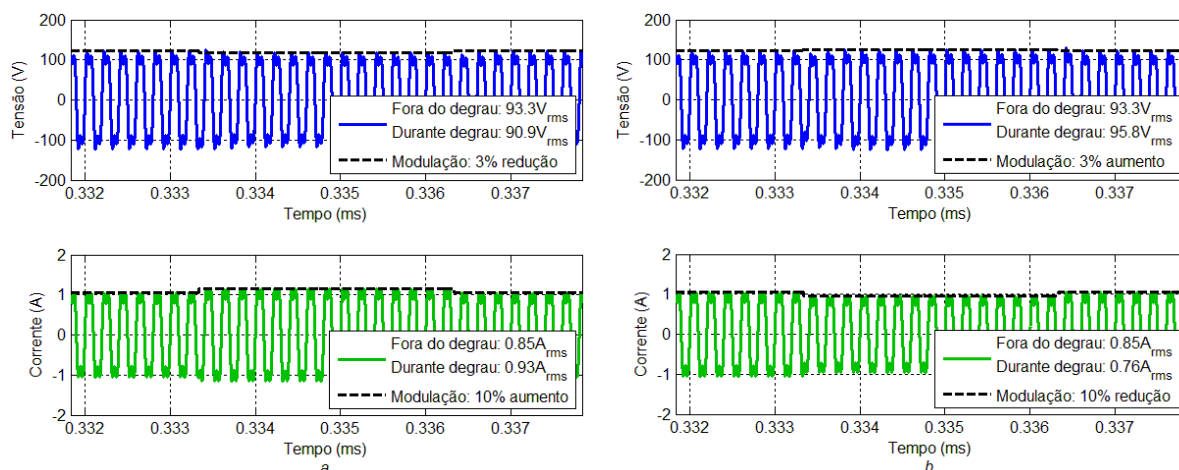


Figura 3.9 - Corrente e tensão simuladas do modelo Yan com injeção de terceira harmônica com fundamental de 5kHz com degrau de corrente: (a) positivo de 10% e (b) negativo de 10% em relação ao valor nominal

3.4. Tempo de simulação

Para comparar a performance dos quatro modelos discutidos é importante também mencionar o tempo gasto na simulação dos mesmos. Todas as simulações foram realizadas utilizando uma máquina com processador Intel Core i7 2,2GHz e 6MB de memória RAM, sendo o MATLAB[®] o programa de cálculo computacional utilizado. Os parâmetros de simulação definidos foram de um segundo de tempo simulado total com uma frequência de amostragem 256 vezes o valor da frequência de operação da lâmpada em estudo. Cada um dos algoritmos foi executado dez vezes para o preenchimento dos dados da Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Tempos de execução médio dos algoritmos de cada modelo estudado

f	Modelo	Tempo total médio verificado (s)	Valor percentual em relação ao menor tempo (pu)
60Hz	Resistor	$0,5383 \cdot 10^{-3}$	1,0
	Ferrero	0,1848	343,3
	Mader-Horn	0,0036	6,7
	Yan	0,1027	190,8
5kHz	Resistor	0,0315	1,0
	Ferrero	0,5168	16,4
	Mader-Horn	0,2959	9,4
	Yan	2,8472	90,4
10kHz	Resistor	0,0830	1,0
	Ferrero	0,8547	10,3
	Mader-Horn	0,5802	7,0
	Yan	5,6175	67,7

Pela Tabela 3.9, o modelo Yan apresenta o maior custo computacional dentre os algoritmos analisados. Isso, pois o modelo Yan exige que mais cálculos sejam realizados e mais variáveis e dados sejam armazenados por iteração. Uma análise da complexidade dos circuitos equivalentes de cada modelo apresentado no capítulo anterior permite chegar a essa mesma conclusão. É possível que um processo de otimização dos algoritmos leve a uma redução do tempo total de simulação. No entanto, considerando a relação percentual entre os tempos gastos, é provável que só haja um ganho real em se realizar esse processo para os modelos propostos por Ferrero e Mader-Horn, sendo que o modelo Yan continuará sendo mais lento e o modelo do resistor puro mais rápido que os outros.

3.5. Considerações finais do capítulo

O capítulo apresentou uma análise da performance dos quatro modelos da lâmpada HPS de 70W, comparados com alimentação senoidal e também perante a injeção de harmônicas. Uma análise da semelhança entre as curvas de tensão e corrente simuladas e experimentais foi apresentada para a lâmpada operando em baixas e altas frequências, bem como com e sem injeção de harmônicas. Foi analisada também a resposta dos modelos à injeção de harmônicas e a sua capacidade de representar o comportamento de impedância incremental negativa típico de lâmpadas HPS. Por último, comparou-se o tempo das simulações de cada um dos modelos.

Considerando apenas a similitude das ondas simuladas em relação às ondas experimentais, é possível afirmar que o modelo proposto por Yan apresentou melhores os índices de desempenho para operação em baixas e altas frequências. Esse desempenho superior foi observado até mesmo na situação de injeção de terceira harmônica. Quanto à resposta dos modelos à injeção de harmônicas, todos apresentaram espectros harmônicos semelhantes, sendo nenhum superior. Analisando a capacidade de ser fiel ao comportamento de impedância incremental negativa da lâmpada, apenas o modelo proposto por Yan foi capaz de fazê-lo. O revés do modelo Yan é sua complexidade, a qual implica em longos tempos de simulação.

Dessa forma, na busca pelo modelo mais fidedigno ao equipamento real, conclui-se que o modelo capaz de representar fielmente as características terminais da lâmpada em baixas e altas frequências foi o Yan. Assim, apesar de resultar em simulações lentas, esse foi o modelo escolhido como o mais apto e será aquele utilizado nas análises posteriores desse estudo.

Capítulo 4

4. Acionamento e controle da lâmpada

Os modelos testados nos capítulos anteriores permitem que o operador da lâmpada HPS em estudo conheça suas características terminais como uma carga elétrica. O modelo Yan, escolhido para dar continuidade ao estudo, representa bem a lâmpada ao incluir em suas equações a queda de tensão no eletrodo e a dinâmica de impedância incremental negativa. A partir dele, é possível traçar estratégias de acionamento da lâmpada com mais facilidade e precisão.

O reator eletrônico utilizado para realizar os testes e medições apresentados nos capítulos anteriores não foi projetado especificamente para esse projeto. A montagem já existia e é a mesma utilizada em [11] e [13] considerando as adaptações em seu circuito apresentadas em [10]. Dessa forma, optou-se por focar na proposta de novas contribuições para a bancada de testes ao invés de detalhar o desenvolvimento da mesma, uma vez que sua metodologia de projeto é apresentada em [9], [10] e [11].

Nesse capítulo são apresentadas uma proposta de partida suave da lâmpada via controle de tensão e uma proposta de controle da lâmpada após a entrada em regime via controle de corrente. A primeira é um algoritmo de partida suave da lâmpada implementado via microcontrolador no reator eletrônico e colocado em ação durante a entrada em regime permanente (período de aquecimento da lâmpada, ou *lamp warm-up*). A segunda é o controle em malha fechada da lâmpada após a mesma ter atingido regime permanente de operação a 3kHz.

4.1. Partida suave (corrente eficaz constante durante aquecimento)

Segundo [7], em lâmpadas HPS, um amálgama de sódio e mercúrio se encontra deposita-

do na parte mais fria da lâmpada. Esse depósito fornece o vapor de sódio e mercúrio necessário para o estabelecimento do arco elétrico dentro do tubo da lâmpada. Depois de realizada a ignição da lâmpada (*lamp ignition*), o arco inicial formado impõe a circulação de corrente pela lâmpada, provocando um aumento da temperatura do amálgama e sua consequente evaporação. Com isso, há elevação da pressão e a ionização do gás no interior do tubo, processo durante o qual há variação da resistência equivalente da lâmpada e que resulta na emissão de luz [8]. Ao período de tempo no qual ocorre a evaporação do amálgama e ionização do gás de forma a se estabelecer um valor de potência igual a 90% da nominal fornecida a lâmpada denomina-se tempo aquecimento da lâmpada [34].

Para a proposta da técnica de partida suave implementada via microcontrolador do reator eletrônico, trabalhou-se com outra lâmpada HPS. O estudo da entrada em regime foi realizado utilizando uma lâmpada General Electric HPS LUCALOX LU150/100/D/40. Segundo seu fabricante [48], em baixas frequências, seu valor de corrente nominal é de $1,8A_{rms}$ e tensão nominal é de $100V_{rms}$ e, em altas frequências, seu valor de corrente nominal é de $1,5A_{rms}$ e tensão nominal é de $100V_{rms}$. Para acionar essa lâmpada, utilizou-se o reator indutivo da Transvoltec conectado a rede (60Hz) cujos dados de placa são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Dados de placa do reator indutivo da Transvoltec

Tensão de alimentação (V)	Corrente na rede (A)	Corrente na lâmpada (A)	Tensão de pulso de ignição da lâmpada (kV)	Potência (W)	Fator de potência
220	1,8	1,8	3,0	150	0,42

Segundo o fabricante [48], para a lâmpada em estudo, o tempo de aquecimento da lâmpada é superior a quatro minutos. No entanto, o processo de completa entrada em regime é lento, podendo levar até algumas dezenas de minutos [49] e [50] para ser finalizado. Assim, optou-se por realizar um estudo dos valores terminais de corrente e tensão na lâmpada para um período de vinte minutos. Uma vez que a ignição da lâmpada não é de interesse para o estudo de partida suave, apenas os dados de entrada em regime são contemplados na Figura 4.1 (a ignição ocorre em quarenta segundos). A Figura 4.1a apresenta a corrente eficaz circulante e a Figura 4.1b a tensão eficaz sobre a lâmpada em cada instante de tempo. A Tabela 4.2 apresenta os dados de tensão e corrente medidos em regime permanente.

Pela Figura 4.1 e os dados da Tabela 4.2, verifica-se que os valores nominais de corrente

e tensão de operação da lâmpada a 60Hz são, respectivamente, $1,9A_{rms}$ e $99,4V_{rms}$. Verifica-se na Figura 4.1 a variação da resistência equivalente da lâmpada durante seu aquecimento.

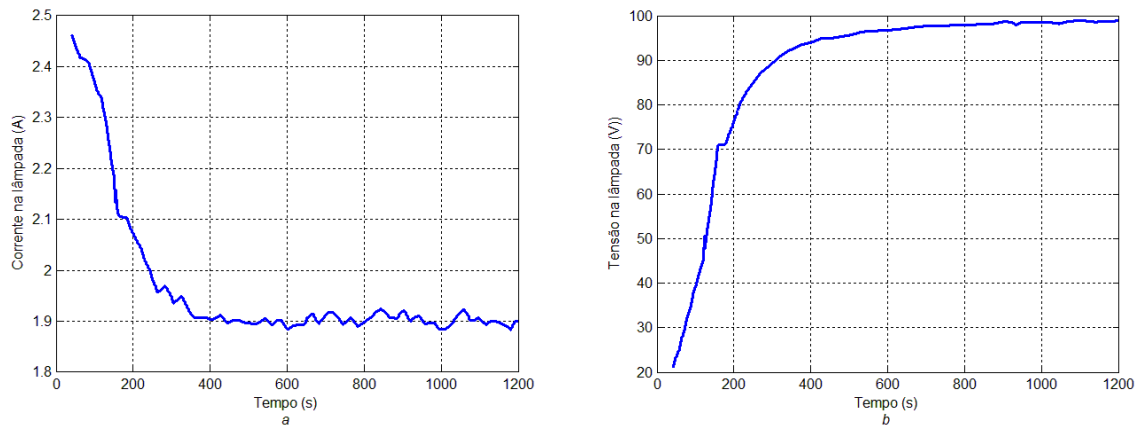


Figura 4.1 - Medidas realizadas na lâmpada HPS 150W durante a entrada em regime: (a) corrente na lâmpada e (b) tensão na lâmpada

Tabela 4.2 - Dados de tensão e corrente na lâmpada acionada pelo reator indutivo em regime permanente

Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	THD _V (%)	THD _I (%)	Fator de potência	Deslocamento de fase (°)	Potência instantânea (VA)
99,4	1,9	160	56,4	8,2	0,85	7,1	188

Percebe-se também pela Figura 4.1 que há um valor elevado de corrente circulando pela lâmpada durante esse período, o qual é chega a ser 30% superior ao nominal em regime permanente. Isso é indesejável, pois uma corrente superior a nominal circulando pela lâmpada implica em desgaste do equipamento e, conseqüentemente, na perda de vida útil do mesmo. Dessa forma, é vantajoso garantir que a corrente circulando pela lâmpada não ultrapasse seu limite nominal. Para isso, deve-se garantir que a lâmpada seja alimentada com corrente constante durante seu período de aquecimento.

Uma maneira de se realizar essa tarefa é implementar um sistema de controle em malha fechada. Uma vez que não há interesse em controlar a corrente circulante com precisão, um sistema de controle não é imprescindível. Felizmente, uma solução mais simples pode ser proposta. Isso, pois os dados de resistência equivalente da lâmpada durante seu aquecimento são suficientes para elaborar uma estratégia de partida suave com alimentação da lâmpada em corrente constante como será apresentado.

O modelo Yan apresentado nos capítulos anteriores tem como uma de suas variáveis calculadas a resistência da lâmpada. No entanto, suas equações são válidas apenas para estudos em regime permanente. De fato, todos os modelos apresentados não são válidos durante o transitório de aquecimento da lâmpada. Assim, mesmo que um circuito equivalente para a lâmpada em estudo seja levantado, os valores terminais de tensão e corrente obtidos não caracterizam a operação da lâmpada durante sua entrada em regime.

É oportuno mencionar que um complemento (não contemplado nesse trabalho) do modelo Yan é proposto por seus autores originais em [51] para levar em conta a fase de aquecimento da lâmpada. Para a obtenção do modelo em regime permanente, um tempo total de simulação de um segundo foi suficiente para obtenção dos parâmetros da lâmpada. No entanto, para obtenção do modelo durante seu transitório de aquecimento, é necessário implementar GAs que irão executar o modelo completo da lâmpada proposto em [51] repetidas e numerosas vezes durante tempos totais de simulação de vinte minutos. Isso implica em um alto custo computacional de processamento e memória e de tempo de execução. Sendo assim, uma vez que não há interesse no controle extremamente preciso da corrente circulante e também que há uma solução alternativa para o problema da identificação dessa resistência equivalente transitória da lâmpada, a adoção do modelo apresentado em [51] não é necessária.

Essa solução alternativa parte do conhecimento das curvas de corrente e tensão apresentadas na Figura 4.1. A partir da multiplicação ponto a ponto dessas curvas, é possível traçar a curva de potência apresentada na Figura 4.2a e, a partir da lei de Ohm, é possível obter a resistência equivalente em cada instante de tempo apresentada na Figura 4.2b.

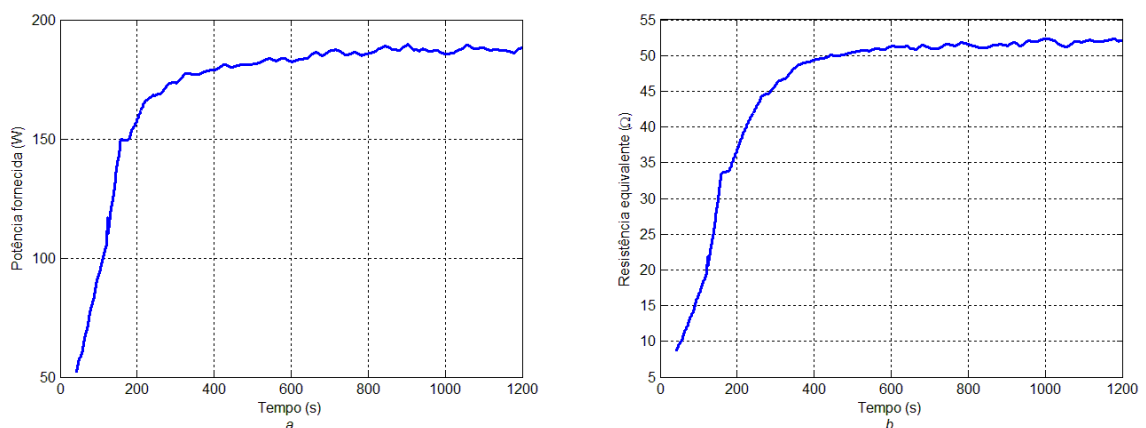


Figura 4.2 – Dados da lâmpada HPS 150W durante a entrada em regime: (a) potência fornecida à lâmpada e (b) resistência equivalente da lâmpada

Uma vez conhecido o perfil de resistência transitória de aquecimento da lâmpada no tempo, é possível obter o perfil de tensão de alimentação que deve ser aplicado à lâmpada durante sua entrada em regime de maneira que a corrente eficaz circulante seja constante. Para isso, basta considerar-se uma corrente de valor eficaz constante sendo aplicado ao perfil de resistência da Figura 4.2b. Assim, pela lei de Ohm, a corrente a ser aplicada à lâmpada é apresentada na Figura 4.3a e o novo perfil de tensão de alimentação da lâmpada para realizar a partida suave da mesma com corrente eficaz constante é apresentado na Figura 4.3b. Os valores de potência fornecida à lâmpada são apresentados na Figura 4.3c e a resistência equivalente em cada instante de tempo apresentada na Figura 4.3d.

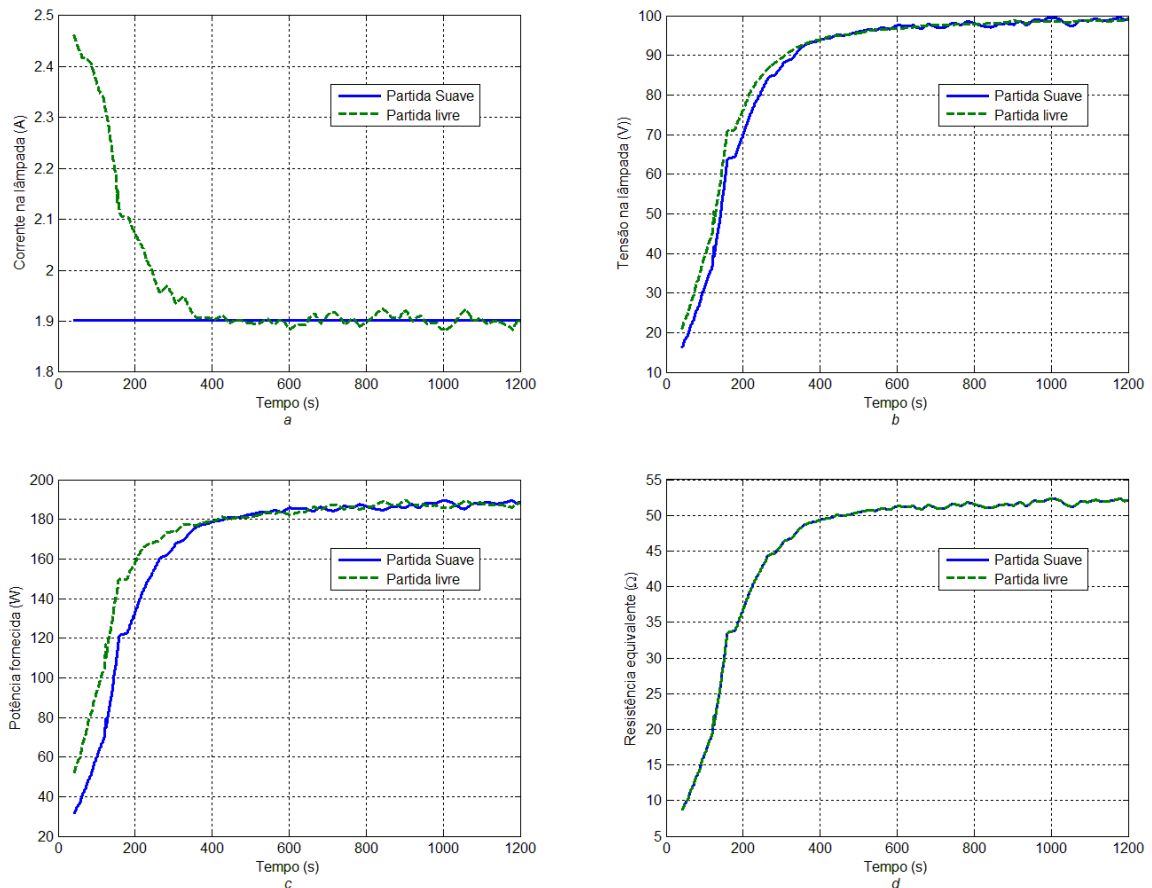


Figura 4.3 - Perfis de curvas operacionais da lâmpada HPS 150W para partida suave: (a) corrente na lâmpada, (b) tensão na lâmpada, (c) potência fornecida à lâmpada e (d) resistência equivalente da lâmpada

É possível argumentar que a alteração do valor da corrente circulando pela lâmpada provocaria uma variação do perfil de resistência transitória equivalente. No entanto, essa variação

não é significativa para o caso em estudo. A resistência equivalente da lâmpada depende da quantidade de vapor e, conseqüentemente, da pressão no interior do tubo. Segundo [7] e [52], durante a fase de aquecimento da lâmpada, o fator que mais influencia a massa evaporada do amálgama de mercúrio e sódio é a tensão aplicada. Pela Figura 4.3b, verifica-se que a variação da tensão aplicada na partida suave em relação à partida livre é inferior a 9V em seu ponto de maior diferença e inferior a 2,5V na média dos pontos. Isso justifica o argumento de que a variação do perfil de resistência transitória equivalente devido à alteração do perfil de corrente não é tão impactante para o estudo.

Portanto, garantindo-se a aplicação do perfil de tensão da Figura 4.3b à lâmpada, garante-se circulação de corrente eficaz constante igual ao valor nominal de operação e, conseqüentemente, evita-se a redução da vida útil da lâmpada pela operação com sobrecorrente. Para isso, agora já considerando o uso do reator eletrônico, é necessário se implementar uma rotina de partida no microcontrolador que aplique degraus de tensão ao longo do tempo de aquecimento da lâmpada que atendam o perfil da Figura 4.3b. A Figura 4.4 apresenta um possível perfil de degraus de tensão ajustados a cada dez segundos durante o período de aquecimento.

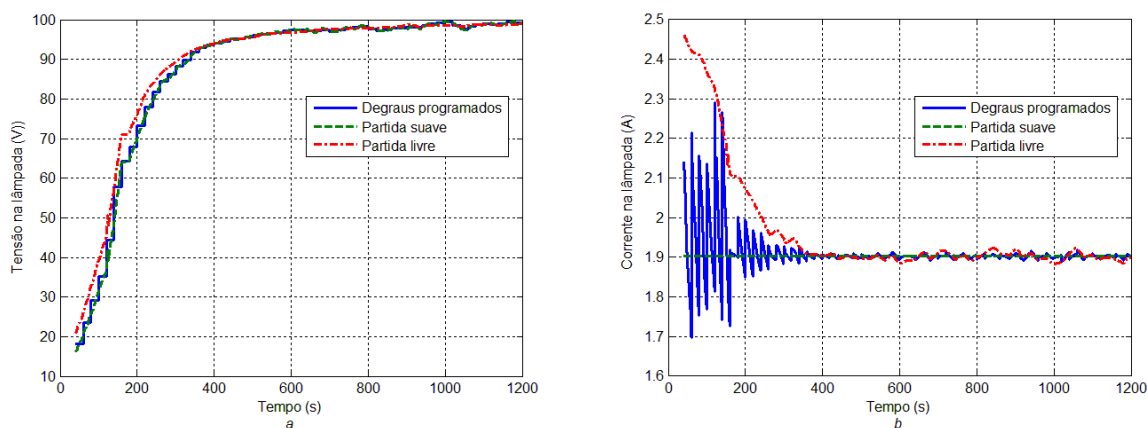


Figura 4.4 - Perfis aplicados pelo microcontrolador à lâmpada durante seu aquecimento: (a) degraus de tensão e (b) consequentes valores eficazes de corrente

Verifica-se pela Figura 4.4 que, nesse caso, ainda há certa sobrecorrente circulando pela lâmpada. No entanto, a técnica já se apresenta vantajosa em relação à situação apresentada na Figura 4.1 em que ela não é aplicada, uma vez que a sobrecorrente possui menor amplitude e ocorre por um período menor de tempo. Uma possível solução para se reduzir ainda mais essa sobrecorrente é diminuir ainda mais o tempo de reajuste da tensão, aproximando cada vez

mais a curva dos degraus de tensão da curva de partida suave.

Essa mesma estratégia proposta pode ser utilizada no acionamento da lâmpada HPS de 70W com injeção de terceira harmônica, a qual é o real objeto de estudo desse documento. Para extrapolar a estratégia traçada para a lâmpada HPS de 150W para aplicação na lâmpada HPS de 70W, basta fazer nesta os mesmos testes que foram realizados naquela. A partir dos perfis de tensão e corrente levantados, executam-se os mesmos passos propostos para obtenção da curva de perfil de tensão para partida suave.

4.2. Controle de corrente em malha fechada

O estudo do controle de corrente em malha fechada proposto é realizado para a lâmpada Philips HPS SON-T 70W com fundamental a 3kHz e injeção de terceira harmônica baseando-se no modelo Yan previamente apresentado. Busca-se realizar um controle de corrente em malha fechada da lâmpada para que a lâmpada opere em situação nominal de forma, principalmente, a não prejudicar a lâmpada e reduzir sua vida útil [7]. Além disso, o processo de envelhecimento natural da lâmpada também provoca alteração de sua resistência equivalente [7], o qual deve ser levado em conta para se garantir operação em condição nominal principalmente devido ao fato da lâmpada apresentar comportamento de impedância incremental negativa. Para definir uma estratégia eficiente de controle, é importante conhecer a lâmpada.

4.2.1. Modelo de pequenos sinais da lâmpada

Uma metodologia para levantamento do modelo de pequenos sinais da lâmpada na qual ela é alimentada com onda quadrada é proposta em [12]. Uma perturbação pequena, de mas amplitude suficiente para causar um impacto no sistema é aplicada em torno do ponto de operação nominal. Optou-se por trabalhar com a mesma perturbação proposta em [12] de 20% do valor nominal de operação com frequência de modulação variando de 10Hz a 50kHz. O modelo Yan é, então, simulado para operação em onda quadrada na frequência de 3kHz com valor eficaz de $0,8A_{\text{rms}}$ devido à operação em alta frequência. A Figura 4.5a apresenta as formas de onda de tensão e corrente na lâmpada com modulação em 10Hz e a Figura 4.5b apresenta as formas de onda de tensão e corrente na lâmpada com modulação em 50kHz.

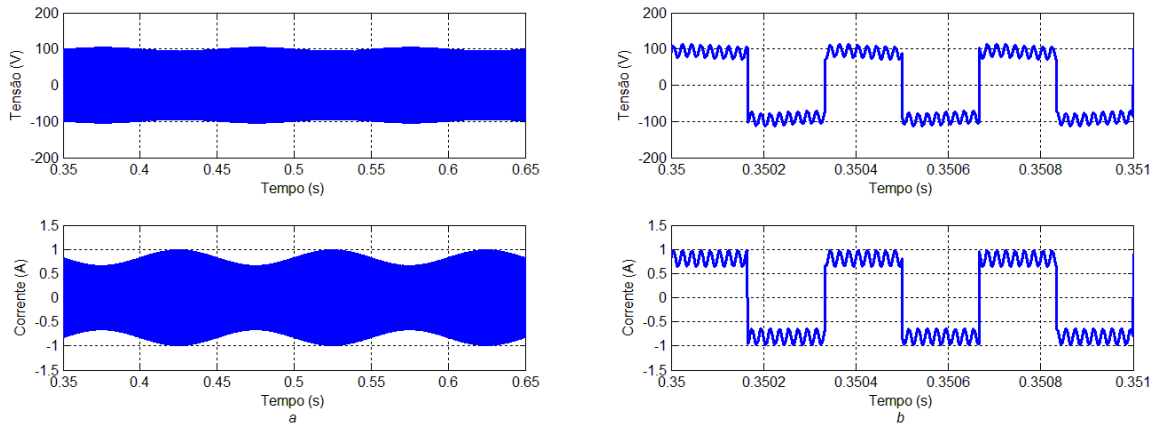


Figura 4.5 - Formas de onda de tensão e corrente na lâmpada com modulação em: (a) 10Hz e (b) 50kHz

O modelo de pequenos sinais é baseado na impedância incremental característica da lâmpada. Segundo [12], a impedância Z_{lamp} de pequenos sinais da lâmpada é caracterizada por:

$$Z_{lamp} = \frac{\hat{v}_m}{\hat{i}_m} \angle \alpha \quad (4.1)$$

onde \hat{v}_m é a amplitude apenas da componente da modulante (mensagem) do sinal de tensão, \hat{i}_m é a amplitude apenas da componente da mensagem da modulação do sinal de corrente e α é o ângulo de defasagem entre os sinais de mensagem de tensão e de corrente.

Dessa forma, diversas simulações são necessárias para cobrir uma grande faixa de frequências de modulação aplicadas da lâmpada. Foi variada a frequência da modulação de 10Hz até 50kHz em uma escala logarítmica, sendo que para cada ponto de operação, as formas de onda de tensão e corrente terminais da lâmpada eram armazenadas para análise. Dos valores absolutos das curvas de tensão e corrente, eram subtraídos seus respectivos valores eficazes, de forma que o sinal resultante fosse a mensagem contida na modulação. A Figura 4.6a apresenta a mensagem na tensão e na corrente com modulação em 10Hz e a Figura 4.6b apresenta a mensagem na tensão e na corrente com modulação em 50kHz.

Com as formas de onda das mensagens para cada frequência de modulação de 10Hz até 50kHz devidamente registradas, para se obter as informações de amplitude e ângulo de cada um dos sinais basta realizar as transformadas rápidas de Fourier (FFTs) dos mesmos. Uma vez obtidos os dados de amplitude e ângulo dos sinais de mensagem de tensão e corrente, aplica-se

a expressão (4.1). O resultado dessa ação iterativa é registrado na Tabela 4.3 e apresentado na Figura 4.7, a qual caracteriza o comportamento da impedância da lâmpada em estudo. Verifica-se pela resposta em frequência da Figura 4.7 que, em altas frequências, a lâmpada possui característica resistiva, apresentando módulo da impedância $|Z_L| = 108,7\Omega$, valor próximo do calculado para o modelo do resistor puro $R_L = 113,3\Omega$. Isso condiz com o esperado e é explicado pelo fato de que, em altas frequências de operação, o período de inversão da tensão aplicada à lâmpada é inferior a constante de ionização do gás em seu interior, não havendo tempo suficiente para ocorrer a ionização e recombinação do plasma em um período de operação [26].

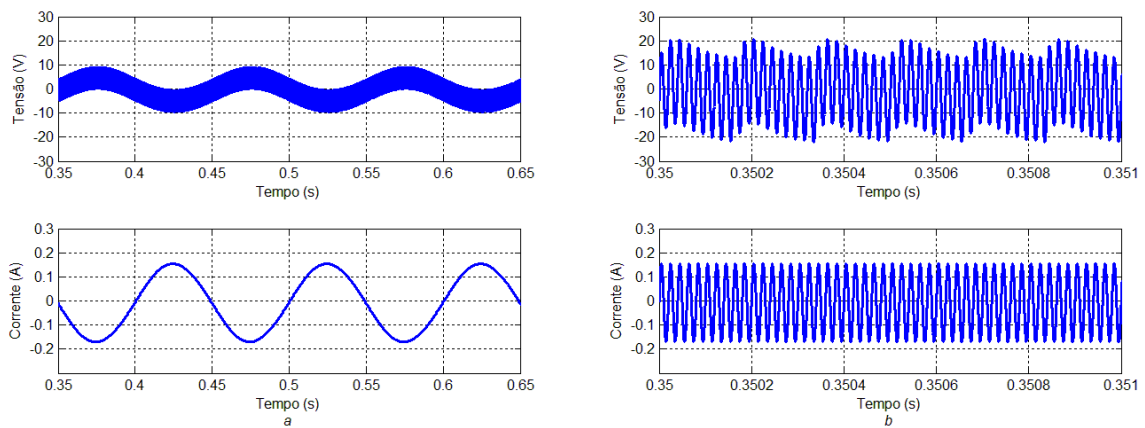


Figura 4.6 - Mensagens na tensão e corrente na lâmpada com modulação em: (a) 10Hz e (b) 50kHz

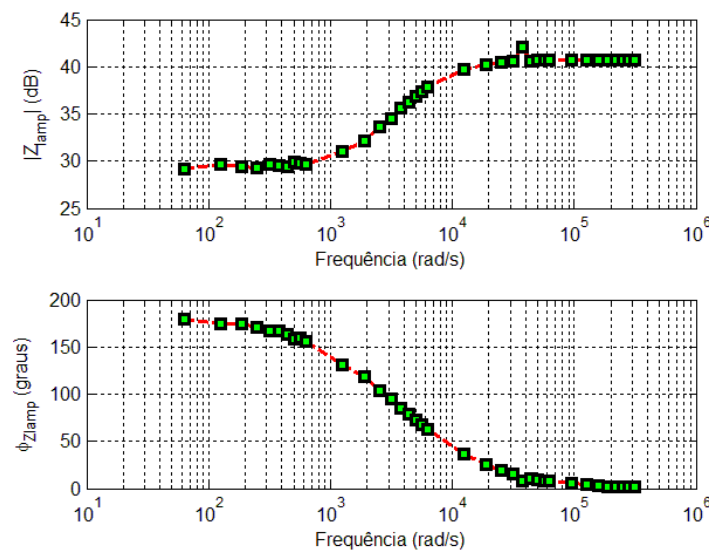


Figura 4.7 - Resposta em frequência dos resultados obtidos via simulação do modelo Yan proposto

Tabela 4.3 - Dados da impedância incremental da lâmpada de 70W em estudo

f (kHz)	$ Z_{lamp} $ (Ω)	$ Z_{lamp} $ (dB)	$\angle Z_{lamp}$ ($^\circ$)
0,01	28,89	29,21	179,03
0,02	30,40	29,66	174,76
0,03	29,70	29,45	174,23
0,04	29,04	29,26	171,10
0,05	30,61	29,72	166,67
0,06	30,02	29,55	166,65
0,07	29,49	29,39	163,42
0,08	31,11	29,86	158,85
0,09	30,62	29,72	159,28
0,10	30,44	29,67	156,01
0,20	35,50	31,01	131,47
0,30	40,52	32,15	118,28
0,40	47,72	33,57	103,70
0,50	53,44	34,56	94,95
0,60	60,00	35,56	85,69
0,70	65,00	36,26	79,11
0,80	70,16	36,92	72,63
0,90	74,19	37,41	67,51
1,00	78,07	37,85	62,65
2,00	97,18	39,75	36,16
3,00	103,06	40,26	25,04
4,00	105,46	40,46	18,92
5,00	106,61	40,56	15,27
6,00	126,42	42,04	8,15
7,00	107,66	40,64	10,90
8,00	107,93	40,66	9,58
9,00	108,08	40,67	8,56
10,00	108,23	40,69	7,61
15,00	108,52	40,71	5,12
20,00	108,65	40,72	3,77
25,00	108,70	40,72	2,94
30,00	108,62	40,72	1,74
35,00	108,73	40,73	2,07
40,00	108,73	40,73	1,74
45,00	108,71	40,73	1,59
50,00	108,73	40,73	1,36

A partir da resposta em frequência da Figura 4.7, é possível obter a função de transferência que caracteriza a lâmpada. Por análise dos gráficos e de acordo com [26] e [42], a impedância incremental da lâmpada pode ser modelada no domínio da frequência em função de um ganho K, um polo p localizado no semi plano esquerdo e um zero z localizado no semi plano direito, caracterizando um sistema de fase não mínima como definido por:

$$Z_{lamp}(s) = K \cdot \frac{s - z}{s + p} \quad (4.2)$$

Analisando os dados da Tabela 4.3 e seguindo a metodologia de análise de diagramas de Bode apresentada em [40], ajusta-se a função (4.2) de maneira que a sua resposta seja igual à da Figura 4.7. A função de transferência obtida é:

$$Z_{lamp}(s) = 110 \cdot \frac{s - 1875}{s + 68500} \quad (4.3)$$

Para comparação, a resposta em frequência de (4.3) é apresentado na Figura 4.8 juntamente com a resposta em frequência obtida via simulação do modelo Yan.

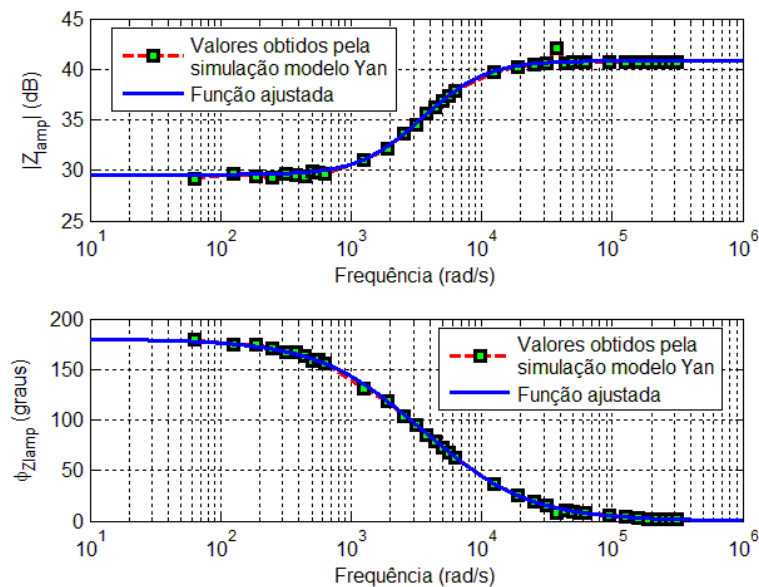


Figura 4.8 - Resposta em frequência ajustada para se aproximar da obtida via simulação do modelo Yan

Pela Figura 4.8, verifica-se visualmente que o modelo da lâmpada no domínio da frequência representado por (4.3) apresenta resposta muito semelhante a sua contrapartida no domínio do tempo (modelo Yan).

4.2.1. Metodologia de ajuste do sistema de controle

Uma vez que a lâmpada tem característica de impedância incremental negativa e é um sistema de fase não mínima (o que é confirmado pela expressão (4.3) e pela Figura 4.8), percebe-se que ela constitui um sistema instável. Esses são os principais motivos pelo qual lâmp-

padas HID não devem ser conectadas diretamente a rede sem nenhum circuito limitador ou de controle. Isso afirma a necessidade de se acionar lâmpadas HPS via um reator eletromagnético ou um reator eletrônico com filtro de carga.

Para o controle de corrente da lâmpada, propõe-se utilizar um controlador PI. Optou-se por trabalhar com esse tipo de compensador por ele ser simples, fácil de ajustar e comumente utilizado em acionamento de lâmpadas HID [17], [53], [54]. Por [40] e [55], conhecer a função de transferência do sistema referente à variável que se deseja controlar auxilia o projeto do compensador, apesar do mesmo poder ser ajustado empírica e iterativamente.

Na presença de um reator, a função de transferência do sistema deixa de ser representada apenas por (4.3), assumindo uma configuração mais complexa que inclui a dinâmica dos elementos passivos do sistema (capacitores e indutores) e, no caso dos reatores eletrônicos, do circuito de chaveamento. Nesse estudo, é analisada apenas a função de transferência da lâmpada, uma vez que o modelo no tempo proposto é baseado em fontes de corrente como alimentação. Isso impõe certa dificuldade de se projetar um controlador pelo método do Lugar das Raízes ou de análise da resposta de frequência pelo diagrama de Bode. No caso em questão, esses métodos implicariam em uma falsa análise, uma vez que não há como garantir que os dados de frequência de corte, margens de ganho e de fase e análise de estabilidade serão iguais tanto para a lâmpada alimentada em corrente quanto na presença de um reator.

A solução é, portanto, partir para um processo experimental de ajuste dos ganhos do controlador. Para não configurar um processo de tentativa e erro, algumas diretrizes são estabelecidas para se sintonizar o controlador PI. A partir da Figura 4.8, verifica-se que a malha mais interna do sistema de controle projetado deverá ser lenta para que sua banda passante se encontre abaixo da frequência da dinâmica da lâmpada [53]. Com isso, ajustam-se os ganhos proporcional e integral dos PIs de forma que suas frequências características sejam inferiores à dinâmica da lâmpada. Para cada compensador projetado, realiza-se a simulação do modelo da lâmpada realimentado e analisam-se as curvas de tensão e corrente terminais na presença de variações dos valores de referência do sistema. As variáveis perturbadas são a resistência da lâmpada (para contemplar seu processo de envelhecimento) e a referência de corrente circulante desejada (para representar o controle a ser efetivamente realizado). Se os valores terminais não forem apropriados (os níveis de corrente e tensão não estiverem dentro do desejado), estipulam-se novos ganhos e o processo é reiniciado. Caso contrário, as sobrelevações e o tempo de acomodação são analisados. Se forem consideradas inaceitáveis, o processo é

também reiniciado. Do contrário, se o controlador for considerado bom o suficiente e um melhor não for necessário, encerra-se o algoritmo de ajuste, o qual é representado na Figura 4.9.

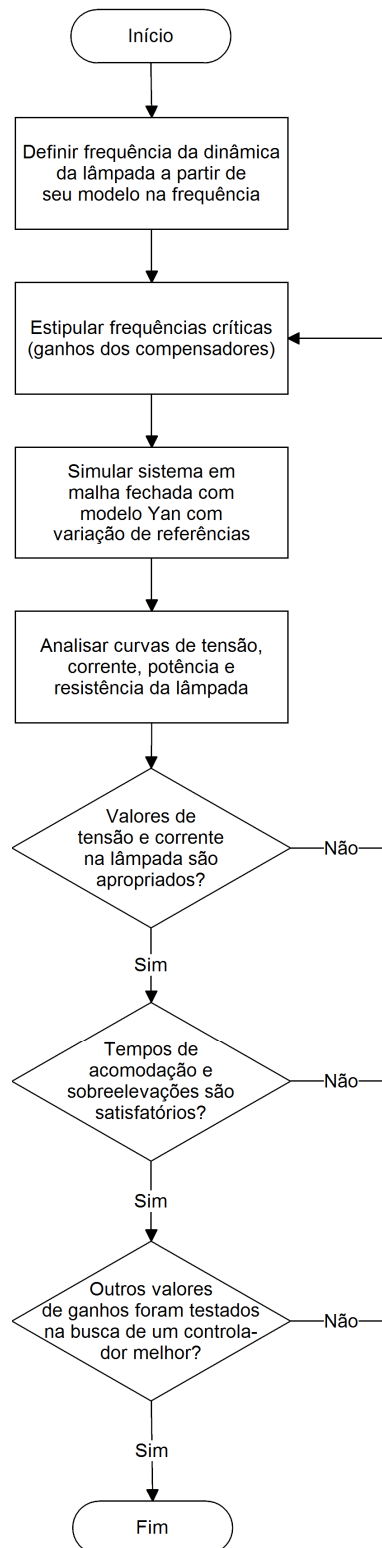


Figura 4.9 - Processo de ajuste e calibração dos ganhos dos compensadores PI projetados

4.2.2. Controladores PI projetados

De acordo com [56], uma das causas mais comum de falha prematura de lâmpadas HPS é a sua operação em sobrepotência. Nessa situação, o material do eletrodo rapidamente é vaporizado, deixando um filme escuro no final do tubo da lâmpada que absorve parte do calor da descarga, elevando a temperatura do amálgama de sódio condensado e, conseqüentemente, a resistência equivalente da lâmpada e a tensão sobre a mesma. Sabendo disso, a vida útil da lâmpada é prolongada ao se garantir operação com potência constante entregue a ela.

Medindo-se tanto a tensão quanto a corrente terminal da lâmpada, é possível obter a potência média fornecida a ela. Para regular essa transferência de potência, sendo conjunto do inversor do reator e o filtro de carga tratados como uma fonte de corrente nesse estudo, é necessário controlar a corrente fluindo no sistema. Uma vez que em sistemas de controle de potência a malha mais interna é tipicamente uma malha de corrente [17], [53], [54] e [56], essa consideração não resultará em uma excessiva simplificação do objeto de estudo.

Assim, deseja-se projetar um sistema de controle para a lâmpada HPS alimentada com injeção de terceira harmônica que garanta operação em níveis de potência que não sejam prejudiciais à lâmpada. Um sistema de controle é capaz de regular a potência de saída ao ajustar a amplitude da fundamental de corrente injetada no sistema (o valor percentual de terceira harmônica injetada é mantido constante). Dessa forma, a estratégia de controle proposta é constituída de uma malha de corrente em cascata com uma malha de potência que fornece a referência para aquela mais interna. A Figura 4.10 apresenta o diagrama do sistema de controle.

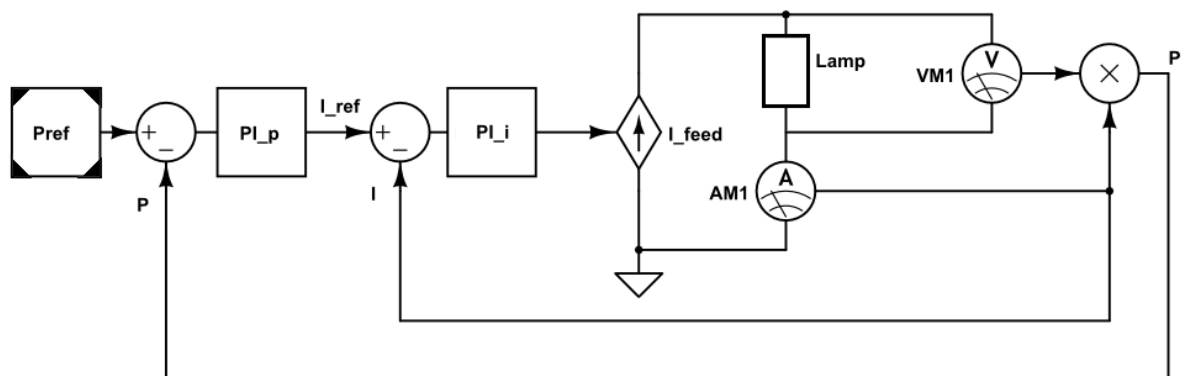


Figura 4.10 - Diagrama do sistema de controle de potência (regulação da corrente)

Para projetar esse sistema de controle, as condições operacionais consideradas são da lâmpada sendo operada a 3kHz com injeção de terceira harmônica de corrente de amplitude igual a 30,5% a da fundamental, buscando assim uma harmônica de tensão de mesma ordem com amplitude igual a 30,5% a da respectiva fundamental. A potência fornecida à lâmpada desejada, no entanto, é igual àquela medida em condições nominais em alta frequência com alimentação senoidal apresentada na Figura 2.2b ($91,8V_{\text{rms}}$ e $0,81A_{\text{rms}}$, logo, 74,4W).

A seguinte função de transferência caracteriza um controlador PI genérico [55]:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (4.4)$$

onde K_p é o valor do ganho proporcional e K_i é o valor do ganho integral.

Dois compensadores PIs são usados para controlar a potência transferida à lâmpada e minimizar o erro em estado estacionário. A malha mais interna é uma de controle de corrente. Como mencionado, existe a restrição de que o controle de corrente deve ser lento para que sua banda passante se encontre abaixo (a fração de duas vezes menor foi utilizada para atender a exigência sem que o sistema fique muito lento) da frequência da dinâmica da lâmpada [53].

Assim, uma análise da Figura 4.8 e da Equação 4.3 sugere que a lâmpada possui um zero em torno de 300Hz. Dessa forma, para satisfazer a restrição mencionada sem que o custo de memória e processamento da simulação se torne impeditivo, simulando-se iterativamente o sistema em malha fechada da Figura 4.10, escolheu-se projetar um controlador PI de corrente com frequência característica $f_I = 150\text{Hz}$. Vale mencionar que, como a dinâmica da lâmpada é, em si, muito lenta, no sistema real é possível que uma frequência de corte ainda menor possa ser utilizada para garantir um sistema mais estável.

Quanto à malha de potência que fornece a referência para a de corrente, ela existe para limitar a potência fornecida à lâmpada, evitando seu superaquecimento e, como mencionado, a vaporização do material do eletrodo. Assim, ela está intimamente ligada à dinâmica relativamente lenta de temperatura da lâmpada e não impõe restrições drásticas ao projeto do controle do sistema no que se refere a sua dinâmica de impedância equivalente. Assim, o controlador de potência é projetado com frequência característica de $f_p = 40\text{Hz}$.

Os ganhos dos controladores projetados após seguir os passos da Figura 4.9 são apresentados na Tabela 4.4.

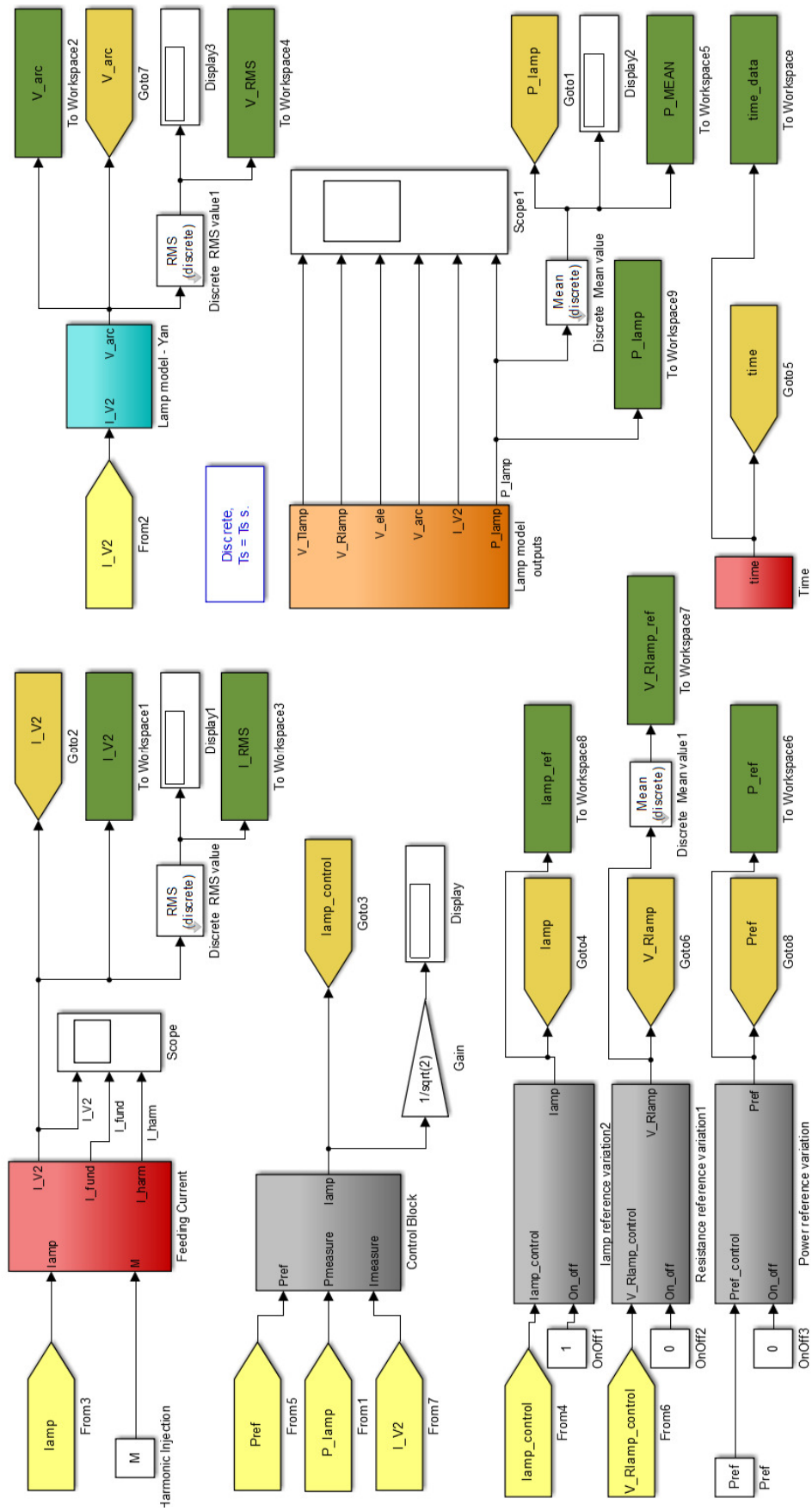


Figura 4.11 - Diagrama do sistema controlado em malha fechada

Tabela 4.4 - Ganhos dos controladores de corrente e potência projetados

Controlador	Ganho proporcional K_p	Ganho integral K_i
Corrente	0,1	94,248
Potência	0,1	25,133

A Figura 4.11 apresenta o diagrama do sistema controlado em malha fechada.

4.2.3. Simulação da lâmpada com sistema de controle

Utilizando o modelo Yan, são realizadas simulações injetando-se correntes cujas fundamentais são senóides que possuem $0,81A_{rms}$ e frequência 3kHz com injeção apenas de terceira harmônica de amplitude igual a 30,5% a da fundamental. Três situações são analisadas para verificar a performance do sistema de controle proposto: a variação da resistência da lâmpada, a variação da referência de potência e a perturbação da referência de corrente. No primeiro cenário, são aplicados no sistema degraus de 10% da resistência equivalente da lâmpada em altas frequências $R_L = 113,3\Omega$ calculada para o modelo do resistor puro. No segundo cenário, degraus de 10% da potência nominal são inseridos na referência de potência. No terceiro cenário, degraus de 10% da corrente nominal são forçados na referência da amplitude da fundamental de corrente gerada pela malha de potência. Vale mencionar que, em todos os casos estudados, a simulação é iniciada e finalizada com os valores nominais de operação como referência e parâmetros de simulação.

4.2.3.1. Primeiro cenário de simulação

Os resultados da simulação do primeiro cenário são apresentados na Figura 4.12. O padrão de variação da resistência equivalente é apresentado juntamente com a potência média fornecida à lâmpada na Figura 4.12a. Já a Figura 4.12b apresenta os valores eficazes de tensão e corrente terminais. A Figura 4.13 apresenta as formas de onda de tensão e corrente na lâmpada durante o primeiro incremento da resistência equivalente da lâmpada.

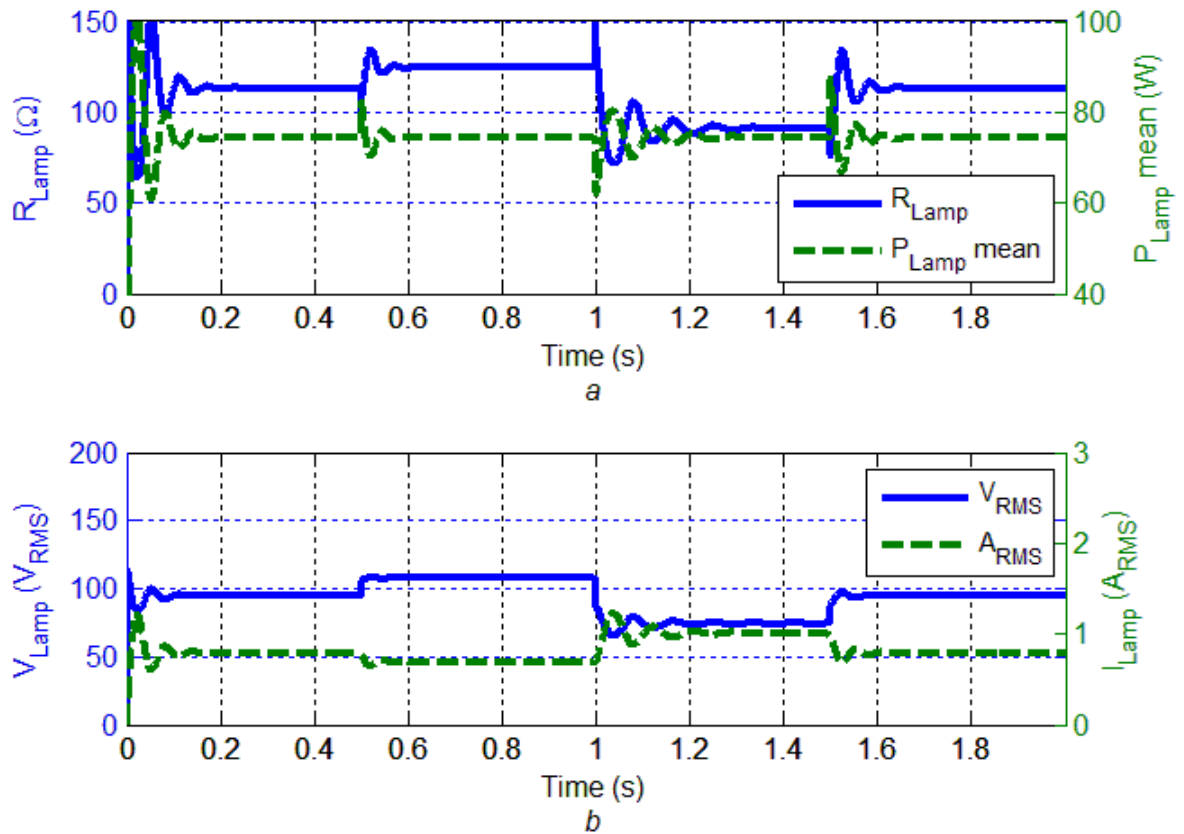


Figura 4.12 - (a) Resistência e potência média e (b) tensão e corrente eficazes na lâmpada durante a variação da resistência equivalente da lâmpada

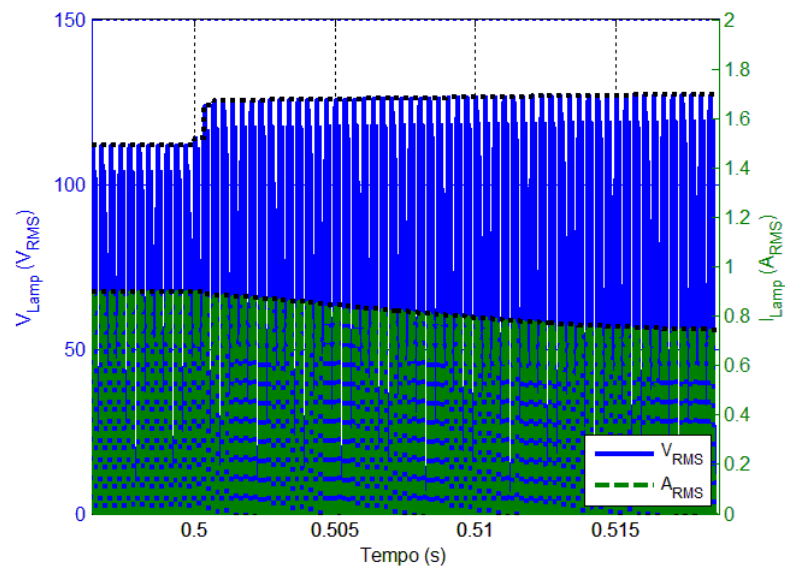


Figura 4.13 - Formas de onda da tensão e corrente durante o primeiro incremento de resistência equivalente da lâmpada

4.2.3.2. Segundo cenário de simulação

Os resultados da simulação do segundo cenário são apresentados na Figura 4.14. O padrão de variação da referência de potência do sistema é apresentado juntamente com a potência média fornecida à lâmpada na Figura 4.14a. Já a Figura 4.14b apresenta os valores eficazes de tensão e corrente terminais. A Figura 4.15 apresenta as formas de onda de tensão e corrente na lâmpada durante o primeiro incremento da referência de potência (o qual é visto pela lâmpada posteriormente como um incremento de corrente).

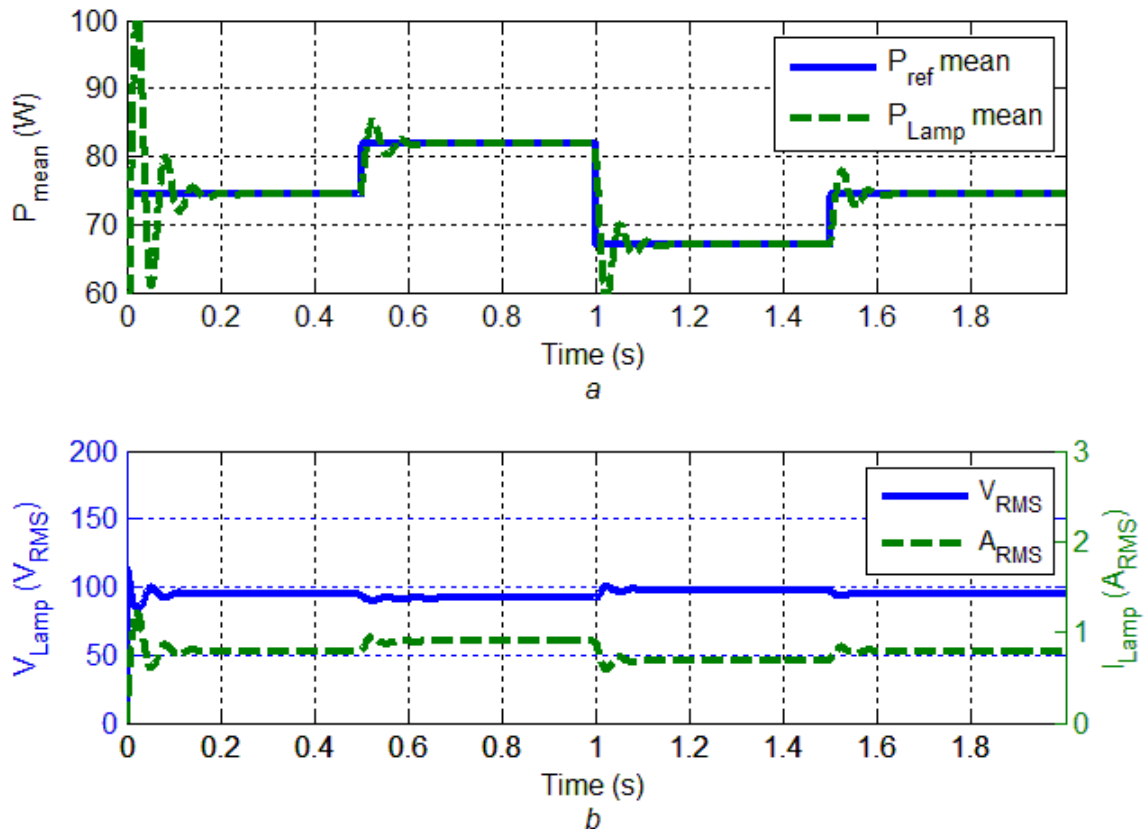


Figura 4.14 - (a) Referência de potência e potência média e (b) tensão e corrente eficazes na lâmpada durante a variação da referência de potência fornecida à lâmpada

Uma vez que a variável terminal elétrica controlada é a corrente, verifica-se que um incremento da referência de potência implica em um aumento da corrente na lâmpada.

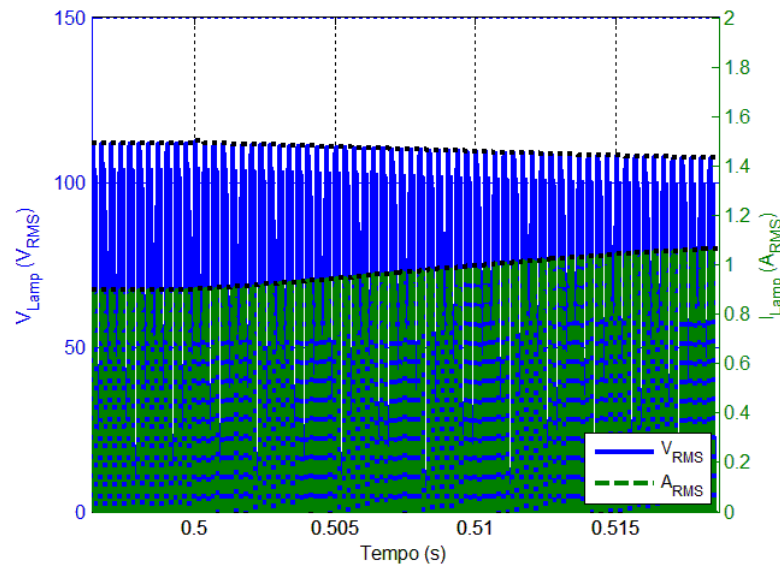


Figura 4.15 - Formas de onda da tensão e corrente durante o primeiro incremento de referência de potência fornecida à lâmpada

4.2.3.3. Terceiro cenário de simulação

Os resultados da simulação do terceiro cenário são apresentados na Figura 4.16. Os degraus são diretamente somados na saída da malha de controle de potência que gera a referência da amplitude da fundamental de corrente a ser injetada. Os degraus de variação da referência de corrente do sistema é apresentado juntamente com a referência utilizada pelo controle de corrente a circular pela lâmpada na Figura 4.16a. Já a Figura 4.16b apresenta os valores eficazes de tensão e corrente terminais. A Figura 4.17 apresenta as formas de onda de tensão e corrente na lâmpada durante o primeiro incremento da referência de corrente realizado.

É importante mencionar que amplitude da corrente a ser injetada é incrementada diretamente na saída do controlador PI de corrente. Assim, apenas a corrente instantânea circulando na lâmpada é alterada, mantendo-se constante a referência de potência. O controlador de potência compensa essa alteração rapidamente como pode ser visto na Figura 4.15. Com isso, verifica-se apenas um transitório curto de variação da corrente circulando na lâmpada (como pode ser visto na Figura 4.15e Figura 4.16) rapidamente compensado pelo controlador de potência, o qual é responsável por alterar a referência passada ao controlador de corrente. Assim, a corrente circulando pela lâmpada tende a se manter em um nível constante.

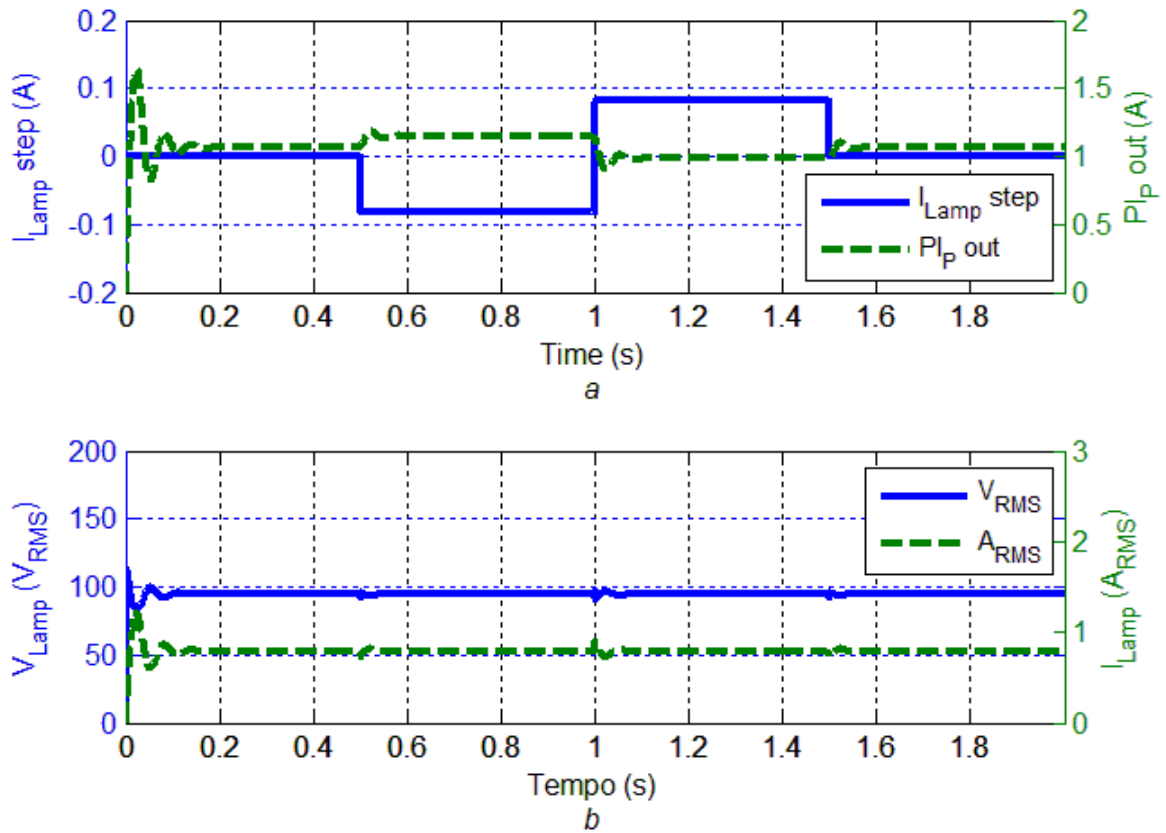


Figura 4.16 - (a) Degrau aplicado e referência do controle de corrente e (b) tensão e corrente eficazes na lâmpada durante a variação da referência de corrente realizada diretamente na saída do controlador de potência

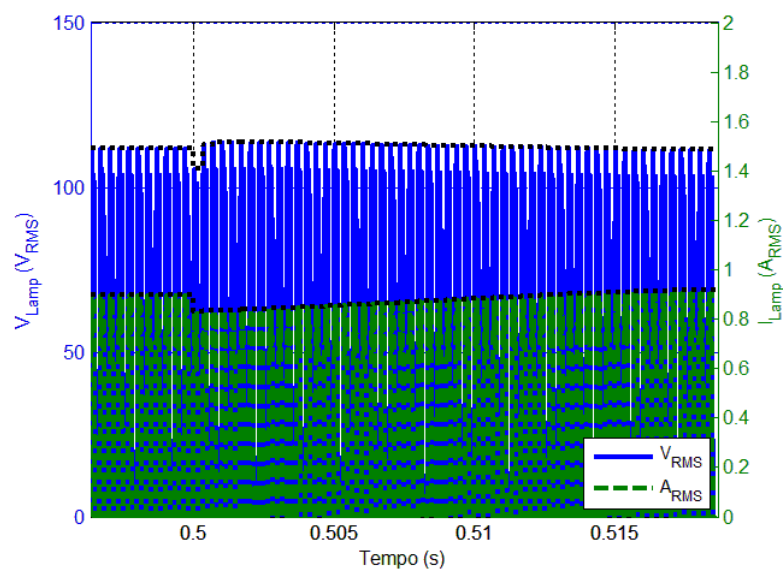


Figura 4.17 - Formas de onda da tensão e corrente durante o primeiro incremento de referência de corrente realizada diretamente na saída do controlador de potência

4.2.3.4. Análise dos resultados das simulações

Da Figura 4.12 e Figura 4.14 é possível concluir que o controle de potência atuando sobre a corrente no sistema projetado é satisfatório. Isso, pois que a potência transferida à lâmpada segue a referência desejada com curtos tempos de acomodação e sem a presença de sobrelevações exageradas nos instantes de perturbação do sistema (a partida é desconsiderada). A Figura 4.16 confirma a devida atuação do controlador de potência sobre o sistema, uma vez que os degraus diretamente somados na referência de corrente são rapidamente compensados pela malha de potência.

4.3. Considerações finais do capítulo

O capítulo apresentou duas propostas de atuação no acionamento da lâmpada. A primeira é um algoritmo de partida suave da lâmpada que garante circulação de corrente na lâmpada eficaz próxima de constante. A segunda foi uma topologia de regulação de corrente circulante no sistema em regime permanente através de um sistema de controle de potência.

Em relação à partida suave, verificou-se que a aplicação de um simples padrão de degraus de tensão durante o período de aquecimento da lâmpada é suficiente para reduzir os valores de corrente circulando na lâmpada para patamares mais próximos dos de operação nominal. Com isso, é possível prolongar a vida útil do equipamento. É importante frisar que o algoritmo proposto é aplicável à lâmpada HPS de 70W em estudo. Nesse caso, como observado em [51], o traçado da curva de tensão a ser aplicada pelo microcontrolador seria bem semelhante àquele apresentado na Figura 4.4, sendo que a diferença residiria apenas nos valores finais de tensão e corrente atingidos em regime permanente e no tempo de acomodação do sistema.

Já o modelo no domínio da frequência levantado para a lâmpada HPS de 70W em estudo comprova a necessidade de se acionar lâmpadas HID a partir de fontes controladas. Segundo a teoria apresentada em [40], como o modelo da impedância da lâmpada é um sistema que possui zeros no semi plano direito, ele apresenta característica instável em malha aberta. Isso implica na necessidade de se empregar uma ação de controle ou, pelo menos, um dispositivo de limitação de corrente para operar a lâmpada. Nesse sentido, a função de transferência que

modela a dinâmica da impedância da lâmpada auxilia o operador da lâmpada a realizar um projeto confiável do reator e de seu sistema de controle visando satisfazer as condições de estabilidade e bom funcionamento do equipamento.

Assim como mencionado, o reator eletrônico e o filtro de carga impõem dinâmicas no sistema que não foram abordadas no estudo realizado devido ao fato do modelo no tempo ser alimentado em corrente. Mesmo não representando fielmente todo o sistema de acionamento da lâmpada, uma análise da corrente circulante é perfeitamente possível e gera resultados interessantes. O principal foi a constatação de que, devido às frequências características da dinâmica da impedância da lâmpada, o compensador de corrente deverá atuar com bandas passantes relativamente pequenas (valores de frequências características muito baixos). Além disso, observou-se que é possível trabalhar com um compensador de potência com banda passante levemente maior que a do de corrente por estar associado a uma dinâmica lenta e secundária de temperatura do sistema.

Por último, verificou-se que as malhas de controle projetadas efetivamente regularam as variáveis de interesse do sistema, o que valida a metodologia de sintonia de ganhos apresentada. A partida do sistema foi desconsiderada nessa análise pois depende de uma malha interna relativamente lenta de temperatura inerente ao modelo Yan. Assim, em todos os casos simulados, observou-se que a potência transferida à lâmpada seguiu a referência imposta ao sistema com curtos tempos de acomodação e sem a presença de sobreelevações exageradas nos instantes de variação de parâmetros do sistema, havendo boa rejeição a perturbações. Novamente foi verificado o comportamento de impedância incremental negativa da lâmpada, uma vez que variações na corrente injetada no sistema provocaram reações opostas na tensão do mesmo. Até no incremento de referência de corrente somado à saída do controlador de potência verificou-se que a redução momentânea da corrente provocou aumento momentâneo da tensão.

Capítulo 5

5. Conclusões finais do trabalho e propostas de continuidade

5.1. Conclusões finais

Este trabalho apresentou um ensaio de modelos para uma lâmpada de vapor sódio se alta pressão de 70W. O estudo foi realizado para ter seus resultados e conclusões aplicados ao projeto do controle de acionamento da lâmpada durante seu aquecimento via controle de tensão e após a entrada em regime permanente via controle de corrente. A etapa de aquecimento foi contemplada com um algoritmo de partida suave e a de operação em estado estacionário foi contemplada com o controle de corrente circulante focado principalmente na injeção de terceira harmônica como estratégia para evitar o fenômeno da ressonância acústica.

Os quatro modelos no tempo estudados foram comparados e testados para operação em baixas e altas frequências, bem como sob a injeção de corrente senoidal pura e com terceira harmônica. Após realizar um estudo da resposta desse modelos (baseado nas figuras de mérito de performance calculadas e nos custo computacional de simulação dos modelos), escolheu-se o modelo Yan como base para os estudos de estratégias de controle do acionamento da lâmpada. Apesar de ter se mostrado como o de processamento mais lento dentre os modelos, ele foi o único capaz de representar bem os valores de corrente e tensão terminais da lâmpada para operações em diversas faixas de frequência, a resposta à excitação harmônica traduzida no espectro harmônico da potência fornecida ao equipamento e, principalmente, a dinâmica de impedância incremental negativa da lâmpada. É notável também que ele é o único modelo a considerar em suas equações a queda de tensão sobre o eletrodo.

Os testes realizados para validar os modelos também possuem outra contribuição para o estudo. Eles contribuem também para ajudar a validar o valor percentual de terceira harmônica em relação a fundamental escolhido para excitação da lâmpada. O valor escolhido de 30,5% é superiores aos patamares mínimos de 27% sugeridos em [46]. Constatou-se que para esse percentual, o espectro harmônico da potência apresentou componentes com amplitudes inferiores aos limites teóricos de ocorrência de ressonância acústica apresentados em [42], [43], [44].

Escolhido o modelo no tempo para a lâmpada, estudou-se primeiramente uma estratégia de acionamento da lâmpada durante seu aquecimento. No entanto, esse modelo Yan no tempo proposto para a lâmpada só é válido em regime permanente. Como o modelo considera em suas equações um equilíbrio térmico local [57] no interior do tubo, ele não pôde ser utilizado para prever a dinâmica da lâmpada durante sua fase de aquecimento.

A avaliação da resposta da lâmpada durante o intervalo de tempo que caracteriza seu aquecimento mostrou que a etapa na qual o amálgama de sódio no interior do tubo é vaporizado e a pressão no interior do tubo atinge seus valores de regime permanente é relativamente lenta. Durante o processo de aquecimento não controlado, devido à característica de impedância incremental negativa da lâmpada e a própria dinâmica de aumento da resistência equivalente interna, verificou-se que valores elevados de corrente circulavam pelo sistema em teste (lâmpada acionada por um reator eletromagnético). Para garantir o prolongamento da vida útil do equipamento, uma técnica de partida da lâmpada com injeção de corrente eficaz constante foi sugerida e testada com êxito.

Baseando-se na informação do perfil de variação da resistência equivalente da lâmpada durante seu aquecimento foi possível sugerir um perfil de tensão a ser aplicado nos terminais da lâmpada para garantir que a corrente eficaz circulante assumisse um valor constante. Sugeriu-se aplicar esse perfil de tensão através de um algoritmo implementado por um microcontrolador, uma vez que o objeto de estudo principal desse estudo é uma lâmpada HPS de 70W alimentada com injeção de terceira harmônica sintetizada por um reator eletrônico microcontrolado. No entanto, é possível utilizar a mesma filosofia de aplicação de degraus de variáveis de entrada para reatores eletromagnéticos. Algumas possíveis soluções para esses casos são a utilização de um banco chaveado de resistores para limitar a corrente de partida no circuito ou de um circuito a tiristores no qual se controla o ângulo de disparo dos mesmo de forma a limitar a corrente circulante. Essas duas estratégias propostas baseiam-se no controle de corrente

ao invés de tensão, mas levam ao mesmo resultado desejado.

Finalizado o estudo de partida suave com tensão controlada, partiu-se para o estudo do modelo de pequenos sinais da lâmpada. A partir de simulações realizadas com o modelo Yan no domínio do tempo, foi possível levantar uma função de transferência que caracteriza bem a impedância da lâmpada. Assim como se esperava segundo a teoria exposta na literatura sobre o equipamento em estudo, a lâmpada apresenta em baixas frequências o comportamento de um resistor “negativo”. À medida que a frequência de operação é aumentada, ela tende a se comportar cada vez mais como um resistor puro. A análise permitiu também verificar que a lâmpada sozinha caracteriza um sistema instável, o que justifica a preocupação com o controle de seu acionamento.

A partir do modelo no domínio da frequência da lâmpada, foi possível propor uma estratégia de sintonia de controladores PI para projeto do sistema de controle de corrente da lâmpada. Essa estratégia consiste basicamente no ajuste empírico e iterativo dos ganhos do controlador. O método, apesar de se basear na tentativa e erro, sugere valores iniciais e limites para uma sintonia melhor conduzida dos compensadores. Essa metodologia possibilita o ajuste dos PIs que compõem o controle de corrente da lâmpada.

É oportuno mencionar que se optou por controlar a amplitude de corrente da fundamental a ser injetada e manter o percentual de terceira harmônica constante em 30,5% ao invés de se controlar esse percentual em si. Dessa maneira, o perfil do espectro harmônico da potência transferida se mantém praticamente o mesmo do traçado para o caso ensaiado em laboratório de excitação da lâmpada com injeção de terceira harmônica com o sistema em malha aberta. Os valores de amplitude de distorção referentes a cada ordem harmônica se alteram com a variação da amplitude das componentes fundamental e de terceira harmônica, mas simulações iterativas do modelo da lâmpada indicaram que o perfil do espectro pouco se altera quando a relação entre as duas é constante. Isso é vantajoso, pois se sabe que nos testes realizados em laboratório não há ocorrência de ressonância acústica.

Uma vez que é sempre interessante garantir o bom funcionamento do equipamento, optou-se por trabalhar com um sistema constituído de uma malha de controle de corrente em cascata com uma malha de controle de potência. A malha de potência mais externa fornece a referência de trabalho da malha de corrente mais interna, a qual efetivamente regula os níveis de corrente circulando no sistema. Assim, toda informação de potência fornecida à lâmpada é traduzida em uma informação de corrente eficaz a ser injetada na mesma. Isso foi verificado

nas simulações do sistema com perturbações de suas variáveis e parâmetros. Essas mesmas simulações também validaram o bom desempenho dos controladores projetados, uma vez que os valores terminais de potência e corrente seguiram as referências impostas ao sistema com êxito.

5.2. Propostas de continuidade

Como sugestões para trabalhos futuros podem ser citadas:

1. Modelagem do sistema completo do reator eletrônico (conjunto composto pelo conversor, filtro e lâmpada HPS de 70W) através de técnicas de linearização propostas em [58];
2. Projeto de um sistema de controle para o reator eletrônico da lâmpada HPS de 70W de corrente composto por uma malha mais externa de potência e uma mais interna de corrente considerando o modelo do sistema completo utilizando a estratégia de injeção de terceira harmônica para evitar ocorrência de ressonância acústica;
3. Levantamento de um modelo no tempo seguindo a topologia proposta por Yan para uma lâmpada de vapor sódio de 150W;
4. Modelagem do sistema completo do reator eletrônico para acionamento de uma lâmpada HPS de 150W através de técnicas de linearização propostas em [58];
5. Realização de testes em laboratório com o reator eletrônico microcontrolado operando em malha fechada acionando as lâmpadas HPS de 70W e 150W;
6. Estudo em laboratório da resposta da lâmpada aos degraus de tensão propostos (partida suave) para obtenção do tempo de duração e valor ideal de cada patamar aplicado durante seu período de aquecimento;
7. Estudo do efeito da modulação da tensão aplicada às lâmpadas de 70W e 150W e sua influência na eliminação da ressonância acústica.

Referências Bibliográficas

- [1] Eletrobrás , “Programa RELUZ,” Ministério de Minas e Energia, Disponível em: www.eletrobras.com.br/EM_Programas_Reluz/default.asp , Acesso em: 11 de abril de 2012
- [2] ANEEL , “Atlas de energia elétrica do Brasil 2005 2ª. edição,” Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm>, Acesso em: 19 de setembro de 2012
- [3] Ministério de Minas e Energia - Brasil , “Plano nacional de eficiência energética: premissas e diretrizes básicas na elaboração do plano – ano base 2010,” Disponível em: mme.gov.br/mme/noticias/destaque1/destaque_150.html, Acesso em 22 de dezembro de 2012.
- [4] Ragone, J.C.; Abreu, S.R.; Rodrigues, M.C.B.; Ribeiro, M.V; Pinto, D.P.; Braga, H.A.C. , “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), 2007.
- [5] Philips, “Pocket guide to high intensity discharge lamp ballasts - year 2009,” Disponível em: advance.philips.com/documents/uploads/literature/RT-8100-R02_1209_HIDPcktGde.pdf, Acesso: 11 de outubro de 2012
- [6] Rea, M.; Bullough, J.; Akashi, Y. , “Several views of metal halide and high-pressure sodium lighting for outdoor applications,” *Lighting Research and Technology*, vol. 41, no. 4, pp. 297,320, Sep. 2009
- [7] Groot, J. de; Vliet, J. van; , "The High-Pressure Sodium Lamp", Philips, Macmillan Education, 1986.
- [8] Coaton, J. A; Marsden, A. M.; , "Lamps and lighting", Arnold, 1997.
- [9] Moraes, L.M.F., “Reator Eletrônico com Alto Fator de Potência para Lâmpada de Vapor de Sódio de Alta Pressão,” M.Sc. thesis, GEP, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brazil, 2002

- [10] de Sá, H.R., “Estudo, projeto e desenvolvimento de um reator eletrônico, pela técnica de injeção de correntes harmônicas, para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão de 70W,” M.Sc. thesis, GEP, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brazil, 2009
- [11] Morais, L.M.F., “Estudo, análise e implementação de formas de onda de tensão sintetizadas através de PWM , com estágio de ignição e de correção de fator de potência para reatores eletrônicos para lâmpadas HPS,” Ph.D. dissertation, GEP, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brazil, 2007
- [12] Marchesan, T.B., “An integration of static converters applied to public lighting systems,” Ph.D. dissertation, GEDRE, UFSM, Santa Maria, RS, Brazil, pp. 23,27, 2007
- [13] Morais, L.M.F.; Donoso-Garcia, P.F.; Seleme, S.I.; Cortizo, P.C., “Electronic ballast for high pressure sodium lamps without acoustic resonance via controlled harmonic injection synthesized with PWM,” Power Electronics Specialists Conference, 2005. IEEE 36th, pp. 1107,1112, 2005
- [14] Sinha, D. N. , “Acoustic resonance spectroscopy (ARS),” *IEEE Potentials*, vol. 11, no. 2, pp. 10,13, 1992
- [15] Olsen, J.; Woskowitz, W.P. , “Optical measurement of acoustic resonance frequencies in HID lamps,” IAS '97. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting, vol. 3, pp. 2263,2269, 1997
- [16] Peng, H.; Ratanapanachote, S.; Enjeti, P.; Laskai, L.; Pitel, I. , “Evaluation of acoustic resonance in metal halide (MH) lamps and an approach to detect its occurrence,” IAS '97. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting, vol. 3, pp. 2276,2283, 1997
- [17] Chhun, L. , “Modes d'alimentation et de commande des lampes sodium haute pression en vue d'éviter les résonances acoustiques,” Ph.D. dissertation, Laplace, GEET, Toulouse, France, 2010
- [18] Co, M.A.; Resende, C.Z.; Simonetti, D.S.L.; Vieira, J.L.F; Almeida, P.C.A. , “Microcontrolled electronic gear for low wattage metal halide (MH) and high-pressure sodium (HPS) lamps,” Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting, vol. 3, pp. 1863,1868, 2002
- [19] Shen, M.; Peng, Q.; Zhaoming, F.Z. , “A novel two-stage acoustic resonance free electronic ballast for HID lamps,” Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting, vol. 3, pp. 1869,1874, 2002

- [20] Batschauer, A.L. , “Projeto de reatores eletrônicos para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão de 250W e 400W,” Ms.C. thesis, UFSC, Florianópolis, SC, Brazil, 2002
- [21] Egert, F.A. , “Reator eletrônico auto-oscilante para uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão,” Ms.C. thesis, GEDRE, UFSM, Santa Maria, RS, Brazil, 2004
- [22] Laskai, L.; Enjeti, P.N.; Pitel, I.J. , “White-noise modulation of high-frequency high-intensity discharge lamp ballasts,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 34, no. 3, pp. 597,605, 1998
- [23] Yan, W.; Ho, Y.K.; Hui, S.Y.R. , “Stability study and control methods for small-wattage high-intensity-discharge (HID) lamps,” Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 37, no. 5, pp. 1522,1530, 2001
- [24] Gulko, N.; Ben-Yaakov, S. , “A MHz electronic ballast for automotive-type HID lamps,” in PESC97. Record 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol. 1, pp. 39,45, 1997
- [25] Lee, C.R.; Chen, K.H.; Moo, C.S. , “Operating characteristics of small-wattage metal halide lamps with square wave current from 50 Hz to 50 kHz,” 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003., vol. 2, pp. 1030,1035, 2003
- [26] Deng, E.; Cuk, S., "Negative incremental impedance and stability of fluorescent lamps," Applied Power Electr Conf. and Exposition, 1997. APEC '97 Conf. Proceedings 1997., Twelfth Annual , vol.2, no., pp.1050,1056 vol.2, 23-27 Feb 1997
- [27] Yan, W.; Hui, S. Y R; Chung, H., "Nonlinear high-intensity discharge lamp model including a dynamic electrode voltage drop," Science, Meas. and Techn., IEE Proceedings - , vol.150, no.4, pp.161,167, 2003
- [28] Melis, J., "Ballast curves for HPS lamps operating on high frequency," Industry Appl. Society Annual Meeting, 1992., Conf. Record of the 1992 IEEE , vol., no., pp.1908,1914 vol.2, 4-9 Oct. 1992
- [29] Shvartsas, M.; Ben-Yaakov, S., "A SPICE compatible model of high intensity discharge lamps," Power Electr Specialists Conf., 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE , vol.2, pp.1037,1042 vol.2, 1999
- [30] Ferrero, F.J.; Blanco, C.; Perez, M.A.; Vega, M.G.; Secades, M.R., "A PSpice model for HPS lamps operated at high frequency," Ind. Appl. Conf.,2000. Conf. Record of the 2000 IEEE, pp.3423,3427 vol.5, 2000

- [31] Mader, U.; Horn, P., "A dynamic model for the electrical characteristics of fluorescent lamps," Ind. Appl. Soc. Annual Meeting, 1992., Conf. Record of the 1992 IEEE , pp.1928,1934 vol.2, 4-9, 1992
- [32] Yan, W.; Hui, S. Y R, "A universal PSpice model for HID lamps," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.41, no.6, pp. 1594,1602, 2005
- [33] Cosby, M.C.; Nelms, R.M., "Designing a parallel-loaded resonant inverter for an electronic ballast using the fundamental approximation," Applied Power Electr Conf. and Exposition, 1993. Conf. Proceedings 1993., 8th Annual, vol., no., pp.418,423, 7-11, 1993
- [34] Philips , "Catálogo de lâmpadas de vapor sódio de alta pressão: modelo SON-T de 70W", Disponível em: <http://www.ecat.lighting.philips.com/l/lamps/high-intensity-discharge-lamps/20952/cat/> , Acesso em: 04 de junho de 2013
- [35] Kitchin, C.R., "Stars, Nebulae and the Interstellar Medium: Observational Physics and Astrophysics", CRC Press, 1987
- [36] Born, M.; , "An evaluation of the contribution of radiation diffusion to thermal conductivity in high-pressure discharge lamps from operating-voltage and wall-temperature measurements", Journal of Physics. D: Applied Physics, 1999
- [37] Kloss, A.; Schneidenbach, H.; Schopp, H.; Hess, H.; Hitzshke, L.; Schalk, B.; , "Electrode-sheath voltages in high-pressure mercury arcs", Journal Applied Physics, 88, pp. 1271-1275, 2000
- [38] Benilov, M. S.; , "Near-cathode phenomena in HID lamps", IEEE Transactions on Industry Applications, 37, pp. 986-993, 2001
- [39] Earnshaw A.; Greenwood, N., "Chemistry of the Elements", Butterworth-Heinemann, 2nd ed., 1997
- [40] Dorf, R.C.; Bishop, R.H., "Modern control systems", Prentice Hall, 10th ed., 2004
- [41] Morais, L.M.F.; Donoso-Garcia, P.F.; Seleme, S.I.; Cortizo, P.C., "Acoustic Resonance Avoidance in High Pressure Sodium Lamps Via Third Harmonic Injection in a PWM Inverter-Based Electronic Ballast," Power Electr., IEEE Trans., vol.22, no.3, pp.912,918, 2007
- [42] Alonso, J.M.; Ribas, J.; Rico-Secades, M.; Garcia, J.; Cardesin, J.; Dalla Costa, M.A., "Evaluation of high-frequency sinusoidal wave-form superposed with third harmonic for stable operation of metal halide lamps," Ind. Appl., IEEE Trans., vol.41, no.3, pp.721,727, 2005

- [43] Koshimura, Y.; Aoike, N.; Kobayashi, H.; Nomura, O., "Several ways for stabilizing HID lamps operation on high frequency power," *J. Illum. Eng. Inst. Jpn.*, vol. 67, no. 2, pp. 55–61, 1983.
- [44] Koshimura, Y.; Aoike, N.; Nomura, O., "Stable high frequency operation of high intensity discharge lamps and their ballast design," in *Proc. CIE 20th Session*, pp. E36/1,E36/2., 1983
- [45] Chhun, L.; Maussion, P.; Bhosle, S.; Zissis, G. , "Characterization of acoustic resonance in a high-pressure sodium lamp," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 47, no. 2, pp. 1071,1076, 2011
- [46] Morais, L.M.F.; Donoso-Garcia, P.F.; Seleme, S.I.; Cortizo, P.C., "Análise da amplitude da 3ª harmônica para se evitar a ressonância acústica em lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão," *IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON, 2006, Proceedings of the 7th, 2006*
- [47] de Sá, H.R.; Morais, L.M.F.; Donoso-Garcia, P.F.; Seleme, S.I.; Cortizo, P.C., "Harmonic current injection to avoid acoustic resonance in 70W HPS lamps," *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society* , pp. 2935,2940, 2011
- [48] General Electric , "Catálogo de lâmpadas de vapor sódio de alta pressão: modelo LUCALOX LU150/100/D/40 MIH." Disponível em: <http://catalog.gelighting.com/lamp/high-intensity-discharge/high-pressure-sodium-lamps/?r=emea> , Acesso em: 04 de junho de 2013
- [49] Wei, W.; Weiqiang, Z.; Guoan, G.; Dianguo, X. , "A study of an electronic ballast for high pressure sodium lamp," *Power Electronics and Motion Control Conference, 2000. Proceedings. IPEMC 2000. The Third International*, vol. 3, pp. 1056,1060, 2000
- [50] Branas, C.; Azcondo, F.; Bracho, S. , "Electronic ballast for HPS lamps with dimming control by variation of the switching frequency. Soft start-up method for HPS and fluorescent lamps," *Industrial Electronics Society, 1998. IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE*, vol. 2, pp. 953,958, 1998
- [51] Lin, D.; Yan, W.; Hui, S. Y R, " Modeling the warm-up phase of the starting processes of high-intensity discharge lamps," *IET Science, Measurement & Technology* , vol.5, no.6, pp. 199,205, 2005
- [52] Stambouli, M.; Asselman, A.; Charrada, K. ; Zissis, G. , "Experimental study of a mercury high-pressure discharge in the course of its start-up phase," *Journal of Applied Physics*, vol. 79, no. 1, pp. 99–103, 1996

- [53] Hansen, J. , “Modelagem e controle de um reator eletrônico para lâmpadas HPS baseado na conexão diferencial de conversores CC,” M.Sc. thesis, GEDRE, UFSM, Santa Maria, RS, Brazil, 2012
- [54] Weiqiang Z.; Dianguo, X. , “Novel constant power control of electronic ballast for HPS lamps,” 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT '02., vol. 1, pp. 129,132, 2002
- [55] Pomilio, J.A.; “Apostila de Fontes Chaveadas.” Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Unicamp, Disponível em: www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/fontchav.html; Acesso em: 04 de julho de 2013
- [56] Kaiser, W., "Hybrid electronic ballast operating the HPS lamp at constant power," Industry Applications Conference, 1996., IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE, vol.4, 6-10, pp.2103,2108 , 1996
- [57] Waymouth, J. F. , “LTE and near-LTE lighting plasmas,” Plasma Science, IEEE Transactions on, vol. 19, no. 6, pp. 1003,1012, 1991.
- [58] Sanders, S.R.; Noworolski, J.M.; Liu, X.Z.; Verghese, G.C. , “Generalized averaging method for power conversion circuits,” 21st Annual IEEE Conference on Power Electronics Specialists, 1990, pp. 333,340, 1990

Apêndice A

Para obtenção do modelo proposto por Ferrero [30], é necessário varia a quantidade de potência transferida para a lâmpada. Para isso, controla-se a tensão de alimentação do reator, ou seja, da própria lâmpada em si. O fabricante da lâmpada em estudo Philips SON-T 70W divulga em [34] as curvas de variação características das variáveis de interesse da lâmpada (corrente, tensão, potência e fluxo luminoso) em função do percentual da tensão de alimentação da lâmpada. Elas representam o comportamento típico observado através de testes em diversas lâmpadas do mesmo modelo pelo fabricante. Uma vez que se deseja nesse estudo comparar a performance de diferentes modelos para a lâmpada, é justificável realizar testes em laboratório do equipamento em estudo ao invés de usar os traçados em questão retirados de [34] e apresentadas na Figura A.1.

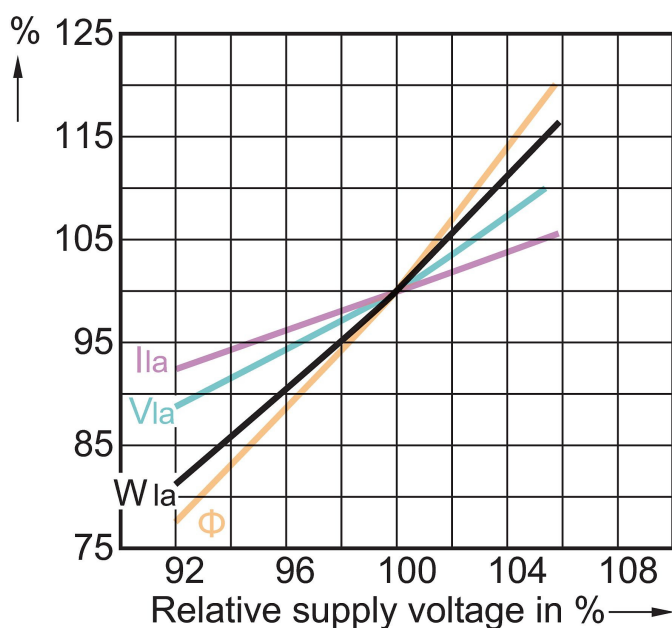


Figura A.1 - Corrente, tensão, potência e fluxo luminoso na lâmpada HPS de 70W em função da tensão de alimentação

Apêndice B

O fenômeno da ressonância acústica é evitado desde que o espectro harmônico da potência fornecida à lâmpada apresente amplitudes nas frequências referentes à segunda, quarta e sexta ordem (as mais relevantes para o sistema) menores que o limiar hipotético de 50% da potência normalizada necessário para sua excitação [42], [43], [44]. Uma simulação iterativa do modelo Yan para diferentes valores percentuais da amplitude da terceira harmônica em relação à fundamental de 3kHz de corrente injetada no sistema. As amplitudes das harmônicas de interesse são registradas junto com seu máximo valor aceitável na Figura B.1.

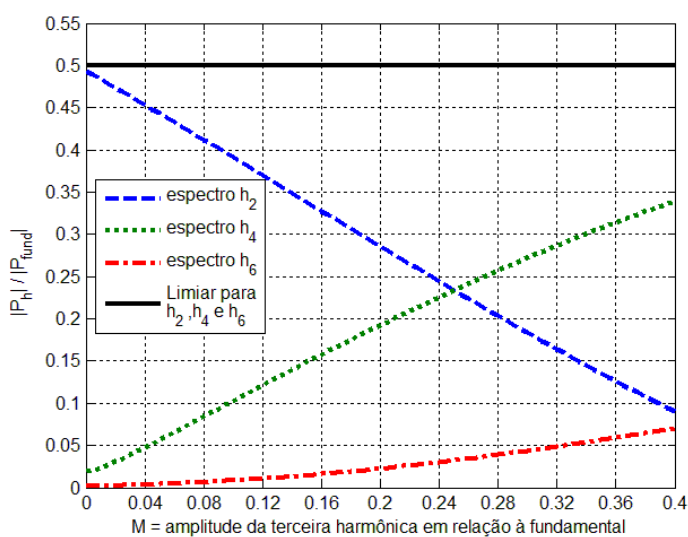


Figura B.1 - Espectro harmônico da potência na lâmpada em função da amplitude relativa da terceira harmônica calculado utilizando o modelo Yan

Verifica-se pela Figura B.1 que o valor percentual da amplitude da terceira harmônica que minimiza as amplitudes de interesse do espectro de potências uma a uma é 25% e o que minimiza o somatório das mesmas é 34%. No entanto, de acordo com estudos apresentados em [46] e [47], na frequência de operação estudada, valores superiores a 27% implicam na

ocorrência de ressonância acústica. Logo, conclui-se que o fator de 30,5% utilizado no estudo é satisfatório pois se encontra fora dos limites inferiores e superiores de ocorrência do fenômeno e está suficientemente próximo do ponto no qual se registra o mínimo do somatório das amplitudes do espectro harmônico das frequências de interesse.