



**Universidade Estadual de Campinas**  
**Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação**  
**Dep. de Máquinas, Componentes e Sistemas Inteligentes**



# ESTUDO DO COMPORTAMENTO ELÉTRICO DE LÂMPADAS FLUORESCENTES

**Autora: Gabriela de Paiva Siqueira**

Orientador: Prof. Dr. Yaro Burian Junior

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Energia Elétrica.

## Banca Examinadora

Prof. Dr. Yaro Burian Junior (presidente) — DMCSI/FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Walter Kaiser — POLI/USP

Prof. Dr. José Antenor Pomílio — DSCE/FEEC/UNICAMP

Campinas – SP  
10 de junho de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -  
UNICAMP

Si75e Siqueira, Gabriela de Paiva  
Estudo do comportamento elétrico de lâmpadas  
fluorescentes / Gabriela de Paiva Siqueira. --Campinas,  
SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Yaro Burian Junior.  
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de  
Computação.

1. Lâmpadas fluorescentes. I. Burian Junior, Yaro.  
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Study of the electric behavior of fluorescent lamps

Palavras-chave em Inglês: Fluorescent lamps

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Walter Kaiser, José Antenor Pomílio

Data da defesa: 10-06-2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

**Candidata:** Gabriela de Paiva Siqueira

**Data da Defesa:** 10 de junho de 2011

**Título da Tese:** "Estudo do Comportamento Elétrico de Lâmpadas Fluorescentes"

Prof. Dr. Yaro Burian Junior (Presidente): Yaro Burian Junior

Prof. Dr. Walter Kaiser: Walter Kaiser

Prof. Dr. José Antenor Pomílio: José Antenor Pomílio

# Resumo

Este trabalho apresenta o estudo do comportamento elétrico de lâmpadas fluorescentes compactas. Ele engloba a análise dos componentes da lâmpada e do circuito do reator, a análise da estabilidade do ponto de funcionamento dessas lâmpadas, o estudo das características estáticas e dinâmicas, criação de modelo matemático, simulações e experimentos. Também é analisado o fenômeno de cintilações em lâmpadas fluorescentes desligadas.

Inicialmente foi feita a análise geral das características da lâmpada e dos reatores magnéticos e eletrônicos. Foi feita uma análise comparativa entre os reatores eletrônicos e magnéticos levando-se em consideração as principais características de uso: tamanho, custo, efeito estroboscópico e fator de potência.

Em seguida foi estudando o comportamento estático da lâmpada fluorescente. Foi feita a análise da estabilidade do ponto de funcionamento da lâmpada em regime estático levando-se em consideração o circuito externo e a dinâmica do plasma. Verificamos que existe uma boa aproximação para a curva característica estática na região de interesse. Ainda em regime estático observamos que, com corrente constante, existe uma oscilação periódica não senoidal na tensão, sobrepostas à tensão constante, da ordem de até uma dezena de volts e com frequências da ordem de 10 kHz.

O comportamento dinâmico da lâmpada fluorescente foi estudado a partir das equações do circuito externo, da dinâmica da lâmpada e da aproximação da característica estática. Simulações na frequência de distribuição de energia elétrica (60 Hz) foram comparadas com os resultados obtidos experimentalmente.

Simulando também o funcionamento da lâmpada alimentada por tensões senoidais em frequências mais elevadas verificamos que a tensão e a corrente na lâmpada tendem para curvas senoidais em fase, confirmando que ela tende a funcionar como resistor em altas frequências. As experiências em alta frequência confirmaram essa tendência.

Também notamos, através da verificação dos circuitos dos reatores de diversas lâmpadas ao longo dos anos, que o filtro de entrada dos reatores eletrônicos das lâmpadas fluorescentes compactas comerciais foi suprimido. Fato que se revelou causador de um

evento indesejável dessas lâmpadas: a ocorrência de emissão de lampejos de luz de baixa intensidade e curta duração em intervalos da ordem de 1 minuto por algumas lâmpadas fluorescentes compactas desligadas. Foi analisado o motivo e proposta uma solução para eliminar este fenômeno.

**Palavras-chave:** *lâmpadas fluorescentes, análise de estabilidade, modelo e simulação, cintilações.*

# Abstract

This work presents a broad study of the electrical behavior of compact fluorescent lamps. It includes an analysis of the lamp components and the circuit of the reactor; an analysis of the stability on the operating point of the lamp; a study of static and dynamic characteristics; a development of a mathematical model; simulations and experiments. It is also analyzed the phenomenon of sparking in turned off fluorescent lamps.

First it was made a general analysis of the characteristics of those lamps with magnetic and electronic reactors. Then it was made a comparative analysis between them considering the main usage characteristics: size, cost, stroboscopic effect and power factor.

It was then studied the static behavior of fluorescent lamps. It was made an analysis of the stability on the operation point of the lamp in static regime considering not only the external circuit but also the plasma dynamic. It was shown that there is a good approximation for the static characteristic curve in the region of interest. We also observed that, with a constant current, the voltage has a periodic (but not sinusoidal) oscillation on top of a constant value of voltage. This oscillation of dozens of volts has a frequency of about 10kHz.

The dynamic behavior of the fluorescent lamp was studied by using: the equation of the external circuit, the equation of the lamp dynamic and the equation of the approximation of the static characteristic. It was made simulations in the frequency of electric energy distribution (60Hz) and they were compared with the results obtained experimentally.

When it was simulated the functioning of the lamp fed by sinusoidal voltage in high frequencies, we saw that both voltage and current in the lamp tend towards sinusoidal curves in phase, confirming that the lamp has a tendency to function as a resistor in high frequencies. The experiences in high frequencies confirmed this trend.

We also saw, by looking at reactors circuits over the years, that the entrance filter was suppressed from electronic reactors of commercial compact fluorescent lamps. This fact revealed to be the cause of an undesirable effect of these lamps: the emission of flashes with small intensity and short duration in intervals of about a minute by some fluorescent lamps when they are turned off. It was analyzed the reason and it was proposed a solution to eliminate this phenomenon.

**Keywords:** *fluorescent lamps, stability analysis, modeling and simulation, flashes.*

# *Agradecimentos*

Ao professor Yaro, pela orientação dos meus trabalhos de iniciação científica e de mestrado; pela paciência e o companheirismo que sempre teve comigo; pelo seu enorme conhecimento.

À professora Ana Cristina pelo apoio, comentários e sugestões.

Aos meus queridos pais Rosângela Coelho de Paiva e Marco Antônio Cruz Siqueira pelo incentivo e confiança.

Ao SAE/UNICAMP e PIBIC/CNPq pelo apoio financeiro.

# Sumário

Capítulo 1: Características das lâmpadas fluorescentes .....	1
1.1. Introdução .....	1
1.2. Funcionamento da Lâmpada Fluorescente .....	3
1.3. Componentes da Lâmpada Fluorescente .....	4
1.4. Lâmpadas Fluorescentes Compactas .....	6
Capítulo 2: Reatores.....	7
2.1. Reatores Magnéticos e Eletrônicos – Estudo Comparativo .....	8
2.2. Reatores Magnéticos.....	9
2.2.1. Configuração dos Reatores Magnéticos .....	9
2.2.2. Fator de Potência dos Reatores Magnéticos .....	10
2.3. Reatores Eletrônicos .....	12
2.3.1. Circuito dos Reatores Eletrônicos .....	13
2.3.1.a. Filtro de Rede.....	13
2.3.1.b. Retificador / Dobrador de Tensão .....	14
2.3.1.b*. Ondulação residual da tensão retificada .....	15
2.3.1.c. Inversor.....	17
2.3.2. Fator de potência dos Reatores Eletrônicos .....	20
CAPÍTULO 3: Características do Arco Elétrico.....	21
3.1. Característica Estática Tensão-Corrente do Arco.....	21
3.2. Circuito Utilizado para Obtenção da Curva Estática .....	22
3.3. Análise da Estabilidade do Ponto de Equilíbrio Estático.....	23
3.3.1. Dinâmica do Arco.....	25
3.3.2. Análise da Estabilidade Considerando apenas a Dinâmica do Arco... 26	
3.3.3. Dinâmica Local do Arco .....	27
3.3.4. Efeito de uma Indutância em Série .....	29

3.3.5.	Efeito da Inclusão de uma Capacitância em Paralelo com o Arco .....	30
3.3.6.	Considerações a respeito da dinâmica do dispositivo .....	31
3.4.	Curva Estática Encontrada Experimentalmente .....	32
3.5.	Simulações em Baixa Freqüência .....	34
3.6.	Verificação Experimental em Baixa Freqüência .....	36
3.7.	Constante de Tempo .....	36
3.8.	Simulação em Freqüências Mais Elevadas .....	37
3.9.	Resultados Experimentais em Alta Freqüência .....	39
Capítulo 4:	Cintilações .....	41
4.1.	Cintilações em lâmpadas fluorescentes .....	41
4.2.	Capacitâncias Parasitas em Instalações Elétricas .....	41
4.3.	Simulações.....	45
4.4.	Constante de Tempo de Carga do Capacitor .....	46
4.5.	Capacitor Chaveado .....	47
4.6.	Verificações Experimentais.....	48
4.7.	Solução.....	49
Conclusão e Trabalhos Futuros .....		50
APÊNDICE: Outras Resistências Negativas .....		52
Bibliografia.....		56

# Lista de Figuras

Figura 1 – Componentes das lâmpadas fluorescentes convencionais. ....	4
Figura 2 – Circuito básico das lâmpadas fluorescentes convencionais. ....	5
Figura 3 – Dispositivo de partida (starter) para lâmpadas convencionais. ....	5
Figura 4 – Lâmpadas fluorescentes compactas convencionais. ....	6
Figura 5 – Fotografia da lâmpada com reator magnético. ....	9
Figura 6 – Fotografia de lâmpada de reator eletrônico. ....	9
Figura 7 – Fator de potência em função da capacitância do capacitor em paralelo. ....	11
Figura 8 – Tensão e corrente nas lâmpadas eletrônicas. ....	12
Figura 9 – Esquema de módulos do reator ligado á lâmpada. ....	13
Figura 10 – Filtro de rede. ....	14
Figura 11 – Circuito do retificador. ....	14
Figura 12 – Circuito dobrador de tensão. ....	14
Figura 13 – Tensão na carga. ....	15
Figura 14 – Tensão retificada. ....	15
Figura 15 – Circuito primitivo do inversor. ....	17
Figura 16 – Retirada de uma fonte. ....	17
Figura 17 – Circuito do inversor. ....	18
Figura 18 – Transformador para comutação auto-oscilante. ....	18
Figura 19 – Circuito completo do reator eletrônico. ....	19
Figura 20 – Corrente fornecida pelo circuito. ....	20
Figura 21 – Curva de funcionamento do arco elétrico. ....	21
Figura 22– Circuito montado para determinar característica estática. ....	22
Figura 23 – Oscilação na tensão (CH1) e corrente constante (CH2). ....	32
Figura 24 – Medidas experimentais e aproximações linear e hiperbólica. ....	33
Figura 25 – Gráfico tensão (V), em azul, e corrente ( $A/270$ ), em verde, ambos em função do tempo, da simulação de segunda ordem. ....	35
Figura 26– Gráfico tensão (V), em azul, e corrente ( $A/270$ ), em verde, ambos em função do tempo, da simulação de terceira ordem. ....	35

Figura 27– Curvas tensão (CH 2) e corrente (CH 1) em função do tempo, determinadas experimentalmente.....	37
Figura 28 – Simulação: voltagem ( $V/50$ ), em azul, e corrente ( $A/(200mx1,15)$ ), em verde, pelo tempo. ....	37
Figura 29 – Gráfico voltagem (V), em azul, e corrente ( $A/270$ ), em verde, em função do tempo, com a frequência aumentada para 3770rad/s.....	38
Figura 30 – Gráfico voltagem (V), em azul, e corrente ( $A/270$ ), em verde, em função do tempo, com a frequência aumentada para 251000rad/s.....	38
Figura 31 – Gráfico corrente (A) por tensão (V) para a frequência 251.000rad/s. ....	38
Figura 32 – Corrente (CH1) e tensão (CH2) na lâmpada pelo tempo. ....	40
Figura 33 – Gráfico XY para corrente (X) tensão (Y). ....	40
Figura 34 – Circuito de comando da lâmpada com dois interruptores.....	41
Figura 35 – Circuito retificador.....	42
Figura 36 – Circuito do retificador e filtro. ....	42
Figura 37 – Curva $v \times i$ .....	42
Figura 38 – Circuito equivalente para D1 e D2 conduzindo.....	43
Figura 39 – Circuito equivalente para D3 e D4 conduzindo.....	44
Figura 40 – Simulação do circuito da Figura 38. ....	46
Figura 41 – Gráfico obtido com $C1$ igual a $100\eta F$ .....	46
Figura 42 – Gráfico da capacitância de $C1$ pelo período entre as cintilações.....	49
Figura 43 – Gráfico da resistência $Req$ pelo período entre as cintilações.....	49
Figura 44 – Circuito com a lâmpada desligada e $C3$ .....	49
Figura 45 – Equivalente de Thévenin do circuito. ....	49
Figura 46 – Resistência negativa controlada por corrente.....	52
Figura 47 – Resistor não-linear controlado por corrente.....	53

# Capítulo 1:

## Características das lâmpadas fluorescentes

### 1.1. Introdução

Lâmpadas fluorescentes utilizam a descarga elétrica luminosa em gases ionizados com a finalidade de converter energia elétrica em energia luminosa. O espectro emitido pelos gases é convertido pelo revestimento dos tubos que os contêm em um espectro predominantemente de luz visível.

As lâmpadas fluorescentes compactas têm dimensões compatíveis com as das lâmpadas incandescentes usuais. Seu uso tem aumentado em consequência de duas vantagens em relação às lâmpadas incandescentes:

- ❖ Sua eficiência luminosa é da ordem de cinco vezes maior (lâmpadas incandescentes produzem da ordem de 15 lúmens por watt, lâmpadas fluorescentes da ordem de 80 lúmens por watt).
- ❖ Sua duração é da ordem de 10 vezes maior (lâmpadas incandescentes duram de 750 a 1.000 horas, lâmpadas fluorescentes de 8.000 a 10.000 horas).

Em função da primeira dessas características, em março de 2009 foi oficializada na União Europeia uma nova lei [1] com objetivo de economizar energia aumentando a eficiência energética e poupar o meio ambiente. A medida impõe a saída gradual das lâmpadas incandescentes de baixa eficiência energética do mercado: até 2012, elas serão banidas da União Europeia. O Brasil também adotou a medida para o fim do uso das lâmpadas incandescentes. Em janeiro de 2011 foi publicada no Diário Oficial da União uma portaria interministerial de Minas e Energia, Ciência e Tecnologia e Indústria e Comércio. A portaria interministerial número 1.007, de 31 de dezembro de 2010 exige que até 2016 retirem gradualmente do mercado brasileiro as lâmpadas incandescentes de uso comum (superior a 40 Watts).

Apesar das vantagens mostradas, do ponto de vista elétrico as lâmpadas fluorescentes apresentam alguma dificuldade. A característica tensão-corrente de um arco elétrico é de uma resistência negativa controlada por corrente. Esta característica não é compatível com os sistemas de distribuição de energia elétrica, que a fornecem como fontes de tensão. Isto exige o emprego de equipamentos auxiliares, os reatores, que limitam as correntes através das lâmpadas.

O circuito equivalente de Norton de uma fonte de tensão em série com um reator é uma fonte de corrente em paralelo com o reator. Se a impedância do reator for suficientemente elevada, ela pode ser desprezada e tudo se passa como se a lâmpada fosse alimentada por uma fonte de corrente. Adicionalmente os reatores incluem dispositivos para a partida da lâmpada. O fator de potência resultante da lâmpada com seu reator é usualmente muito baixo, inferior a 0,5. E em parte este fator de potência baixo é causado pela forma de onda da corrente, que não é mais senoidal. Os reatores puramente magnéticos têm sido substituídos pelos chamados reatores eletrônicos, que envolvem a conversão da frequência de alimentação da lâmpada para uma frequência mais elevada, da ordem de 50 kHz. Assim, a indutância necessária para limitar a corrente pode ter um valor muito inferior. Mas as lâmpadas atualmente disponíveis comercialmente e que utilizam estes reatores também apresentam à rede de energia elétrica fatores de potência muito baixos, da ordem de 0,5 e com considerável distorção harmônica. Têm sido propostos, na bibliografia [2], reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes compactas que apresentam à rede fatores de potência próximos da unidade. Estes reatores podem ser construídos acrescentando ao reator eletrônico usual um estágio para correção de fator de potência. Aparentemente o interesse comercial destes sistemas é, no momento, pequeno: são mais caros e o fator de potência de consumidores residenciais não é observado pelas companhias de distribuição de energia elétrica. Há referências na bibliografia a um comportamento resistivo (linear) das lâmpadas em altas frequências (em primeira aproximação). O valor da resistência do 'resistor equivalente' à lâmpada depende do valor eficaz da corrente que a atravessa. De certa forma existe aqui uma analogia com as lâmpadas incandescentes. Estas lâmpadas apresentam uma característica estática corrente-tensão não linear, uma vez que a resistividade do material do filamento varia muito, mais de uma ordem de grandeza, com a variação de sua temperatura. Mas quando alimentadas por tensões alternadas de frequência suficientemente alta, a

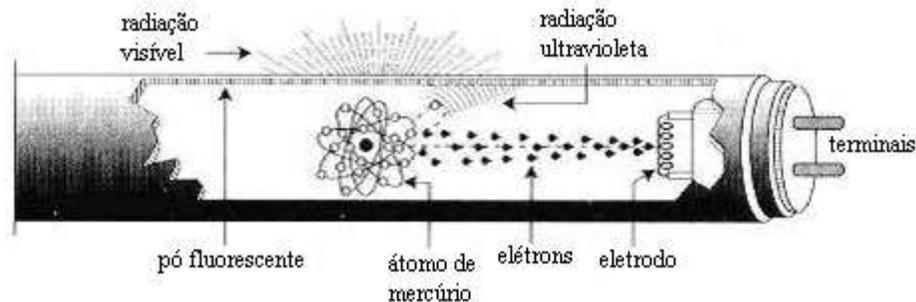
temperatura do filamento permanece aproximadamente constante e as lâmpadas se comportam como resistências lineares. Tensões senoidais levam a correntes senoidais, em fase com as tensões, e o fator de potência destas lâmpadas é praticamente unitário. Uma diferença importante é, entretanto, a faixa de frequências nas quais pode ser observado o comportamento de resistência linear. Em lâmpadas incandescentes este comportamento já ocorre nas frequências usadas em distribuição de energia elétrica. Nas lâmpadas fluorescentes ocorre em frequências de dezenas de kHz. Outra diferença importante é a resistência dinâmica estática das lâmpadas, sempre positiva nas incandescentes e negativa nas fluorescentes.

## 1.2. Funcionamento da Lâmpada Fluorescente

A Figura 1 [2] mostra o funcionamento da lâmpada fluorescente. Esse funcionamento se dá através do fenômeno de arco elétrico, caracterizado pela circulação da corrente elétrica através de uma atmosfera gasosa. As atmosferas gasosas são isolantes elétricos e se comportam como condutores quando ionizadas. A ionização dos gases é obtida submetendo-se a atmosfera gasosa contendo vapor de mercúrio a uma determinada intensidade de campo elétrico.

Os elétrons livres emitidos pelo catodo migram para o outro eletrodo, o anodo, causando colisões entre os elétrons com os átomos de mercúrio. Essas colisões fazem com que um elétron situado em uma órbita do átomo mais interna passe para uma mais externa. Com o subsequente retorno desse elétron à órbita de origem, ocorre a emissão de fótons. A emissão de fótons libera energia radiante em vários comprimentos de ondas eletromagnéticas que vão desde as faixas de radiação visível às faixas de radiação não visível.

Os elétrons livres poderão também, na colisão com os átomos do gás, retirar um elétron de sua órbita mais externa. Neste caso, os elétrons libertados caminharão juntamente com os seus libertadores em direção ao anodo. Este fenômeno não produzirá energia radiante, porém, é responsável pela atmosfera ionizada, também chamada de plasma, que permite a continuidade da corrente elétrica do arco.



**Figura 1 – Componentes das lâmpadas fluorescentes convencionais.**

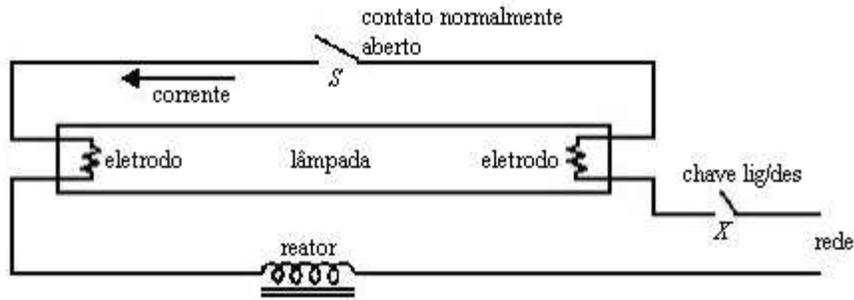
A lâmpada fluorescente é uma lâmpada de descarga de vapor de mercúrio a baixa pressão, na qual a maior parte da luz é emitida por uma ou mais camadas de fósforo excitadas pela radiação ultravioleta da descarga já descrita e representada na Figura 1.

### 1.3. Componentes da Lâmpada Fluorescente

As lâmpadas Fluorescentes consistem de um tubo de vidro recoberto internamente por partículas sólidas a base de fósforo com propriedades fluorescentes, responsáveis pela emissão de luz, quando ativadas pela energia radiante ultravioleta.

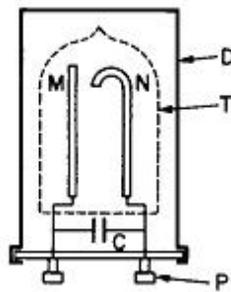
Nas extremidades do bulbo se localizam os eletrodos de tungstênio em forma de espiras e recobertos com uma camada de óxido emissores de elétrons. Os eletrodos, no processo de emissão eletrônica, atingem níveis de temperatura de  $950^{\circ}\text{C}$ , facilitando a emissão. A atmosfera gasosa contida no tubo é constituída de argônio e também de pequena quantidade de mercúrio. Este último é vaporizado no processo de acendimento e responsável pela emissão da radiação ultravioleta.

Nas lâmpadas de descarga elétrica a intensidade da corrente no arco é estabilizada utilizando-se uma impedância limitadora, normalmente reatores, conforme mostrado na Figura 2:



**Figura 2 – Circuito básico das lâmpadas fluorescentes convencionais.**

O contato S representa o starter (mostrado em detalhe na Figura 3) que é o dispositivo de partida que promove o aquecimento dos filamentos da lâmpada. Ele é composto por uma lâmina bimetálica, gás e um capacitor cuja função é minimizar os efeitos de radiointerferência. O starter fica normalmente aberto. Quando a chave X (o interruptor) se fecha acontece a descarga no interior do starter que aquece o elemento bimetálico em seu interior, o qual se fecha fazendo um curto-circuito. A descarga cessa e a lâmina bimetálica se resfria e se abre, voltando a posição inicial. Um transitório eletromagnético é produzido. Este transitório gera altos níveis de força eletromotriz de auto-indução na indutância do reator, e é responsável pela formação de um arco elétrico inicial entre os eletrodos, acendendo a lâmpada.

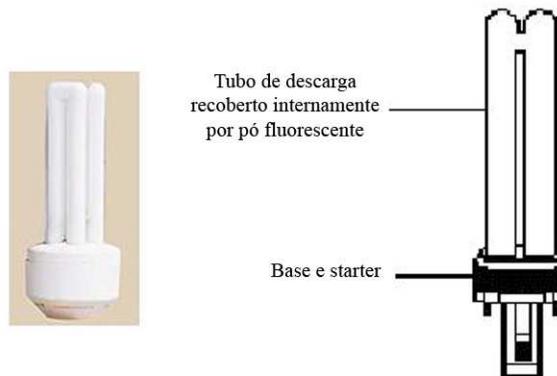


- C – Capacitor;
- D – Capa cilíndrica de proteção;
- M – Eletrodo fixo;
- N – Lâmina bimetálica recurvada;
- P – Terminais;
- T – Tubo de vidro.

**Figura 3 – Dispositivo de partida (starter) para lâmpadas convencionais.**

## 1.4. Lâmpadas Fluorescentes Compactas

Neste trabalho foram estudadas as lâmpadas fluorescentes compactas mostradas na Figura 4. As que utilizam reatores magnéticos convencionais e trabalham na frequência da rede tem o starter incorporado à base. Nas eletrônicas, a base incorpora todo o circuito eletrônico de conversão de frequência.



**Figura 4 – Lâmpadas fluorescentes compactas convencionais.**

# Capítulo 2:

## Reatores

A partir da experiência, sabe-se que a lâmpada é controlada por corrente. Ela deve ser alimentada por uma fonte de corrente ou por uma fonte de alta impedância.

As lâmpadas não são, na prática, alimentadas por tensão contínua. E nem deveriam ser, pois nesse caso teria que ser utilizada uma resistência de alto valor para limitar a corrente, fazendo a eficiência da lâmpada ser muito baixa. Além de ocorrer um desgaste desigual dos eletrodos ocasionando a perda da lâmpada muito rapidamente.

Em alimentação de rede alternada, a primeira solução para se limitar a corrente foi o emprego de indutor em série com as lâmpadas. O emprego de indutor, comparado ao de um capacitor, tem a vantagem de reduzir o conteúdo harmônico das correntes, o que pode ser importante em decorrência da não-linearidade da lâmpada. Para esses reatores magnéticos o fator de potência pode ser melhorado com a simples adição de capacitor em paralelo. A correção foi vista em laboratório.

As soluções mais modernas empregam conversão de frequência, para que a lâmpada opere em frequências mais elevadas. Assim, os indutores da faixa de 1H empregados em frequência de rede passam, na frequência de ordem 1000 vezes maior, a miliHenrys, com redução de peso e preço. Os dispositivos eletrônicos para conversão de frequência, integrados com o pequeno indutor constituem os reatores eletrônicos.

Os reatores eletrônicos, porém, apresentam outros problemas. Como no circuito é usado um retificador (uma ponte de diodos ou, em alguns casos, um dobrador de tensão) seguido de um inversor, o conteúdo harmônico da corrente absorvida da rede é elevado. Existem soluções para esse problema que são circuitos de correção da forma e do fator de potência. Esse assunto já foi muito discutido inclusive no livro de M. Polonskii e A. R. Seidel “Reatores Eletrônicos para Iluminação Fluorescente” [2]. Aparentemente a ausência de uma regulamentação no Brasil faz com que as lâmpadas comercialmente disponíveis não utilizem estes circuitos.

Outro problema decorrente do emprego do retificador e relatado por usuários são as cintilações emitidas pelas lâmpadas fluorescentes desligadas. Esse assunto foi analisado e solucionado nos artigos [3, 4].

## 2.1. Reatores Magnéticos e Eletrônicos – Estudo Comparativo

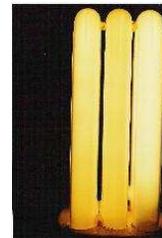
As lâmpadas existentes no comércio utilizam preponderantemente reatores eletrônicos. Os motivos para isso são o tamanho e o custo dos reatores magnéticos, maiores que os dos reatores eletrônicos. Além disso, para lâmpadas tubulares (que em geral possuem maior potência e alimentam grandes ambientes com muitas lâmpadas) o fator de potência deve ser corrigido, dependendo do uso e da potência, para um valor mínimo de forma a cumprir a legislação brasileira (norma NBR14418:1999 – Reatores eletrônicos alimentados em corrente alternada para lâmpadas fluorescentes tubulares – Prescrição de desempenho) e o que está sendo amplamente utilizado nesses casos são reatores eletrônicos com circuitos de correção de fator de potência.

Além de apresentar custos e tamanhos maiores, as lâmpadas magnéticas podem apresentar efeito estroboscópico decorrente da quase extinção do arco 120 vezes por segundo (para a frequência de rede de 60Hz). Esse efeito pode ser analisado em fotografias feitas com máquina com obturador de plano focal. O percurso completo do obturador da máquina Olympus OM-1 dura entre 1/60 e 1/125 de segundo. Isto significa que, para um tempo de exposição de 1/1000 de segundo (o menor possível para esta máquina) o obturador percorre o negativo (de 36 mm) em um tempo entre 1/60 e 1/125 de segundo, com uma fresta aproximadamente entre 2 e 4 mm.

A fotografia mostrada na Figura 5 mostra então, de forma aproximada, a variação de intensidade luminosa emitida pela lâmpada com reator magnético OSRAM DULUX-S durante o tempo de percurso do obturador. Aparece um efeito estroboscópico, pouco pronunciado. Por outro lado, a lâmpada FLC25W, 127 V, com reator eletrônico, mostrada na Figura 6, não apresenta esse efeito.



**Figura 5 – Fotografia da lâmpada com reator magnético.**



**Figura 6 – Fotografia de lâmpada de reator eletrônico.**

## 2.2. Reatores Magnéticos

Os reatores magnéticos foram amplamente utilizados. Foram os primeiros reatores a serem desenvolvidos e apresentam circuito muito simples.

### 2.2.1. Configuração dos Reatores Magnéticos

Os reatores eletromagnéticos apresentam configurações básicas. Eles são constituídos, basicamente, de uma bobina de fio de cobre esmaltado envolvendo um núcleo com chapas de ferro-silício que, além de limitar a corrente em regime permanente, proporciona sua ignição, como foi explicado na seção 1.2.

## 2.2.2. Fator de Potência dos Reatores Magnéticos

O fator de potência de todas as lâmpadas à venda no comércio é muito baixo, da ordem de 0,4 ou 0,5.

Entretanto, a partir de experimentos em laboratório, verificou-se que para lâmpadas magnéticas compactas, o fator de potência pode ser muito melhorado simplesmente ligando-se um capacitor em paralelo ao conjunto da lâmpada em série com seu reator. Isso porque a corrente nesta lâmpada é muito próxima de senóide e o baixo fator de potência decorre de atraso da corrente em relação à tensão.

No experimento da lâmpada compacta de reator magnético OSRAM DULUX-S em paralelo com capacitores em uma tensão de 127V, medimos as seguintes correntes eficazes:

Correntes eficazes

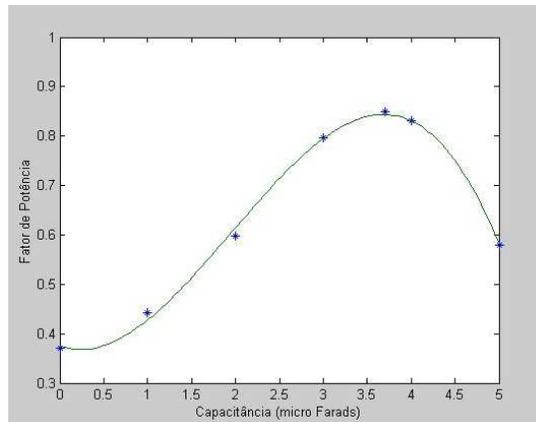
Sem capacitores:	202mA.	
Com $1\mu F$ :	169mA.	
Com $2\mu F$ :	125mA.	
Com $3\mu F$ :	94mA.	
Com $3,7\mu F$ :	88mA.	– Valor mínimo de corrente
Com $4\mu F$ :	90mA.	
Com $5\mu F$ :	129mA.	

A potência ativa consumida pela lâmpada e seu reator foi de 9,5W. Em consequência, o fator de potência é calculado pela expressão:

$$f_p(C) = \frac{\text{Potência Ativa}}{\text{Potência Aparente}} = \frac{P}{V_{ef} \cdot I_{ef}} = \frac{9,5}{127 \cdot I(C)} \quad (1)$$

E pode ser representado no gráfico da Figura 7.

O fator de potência atinge o valor máximo de 0,85 com capacitor de  $3,7\mu F$ . Não é possível aumentá-lo ainda mais com capacitores devido à distorção presente na corrente.



**Figura 7 – Fator de potência em função da capacitância do capacitor em paralelo.**

Pode-se notar que essa mesma solução não pode ser aplicada em lâmpadas eletrônicas compactas.

No laboratório, experimentou-se ligar a lâmpada compacta de reator eletrônico em paralelo com capacitores na mesma tensão de 127V, da mesma forma que foi feito para o reator magnético.

Obtiveram-se as seguintes correntes com os respectivos valores de capacitâncias:

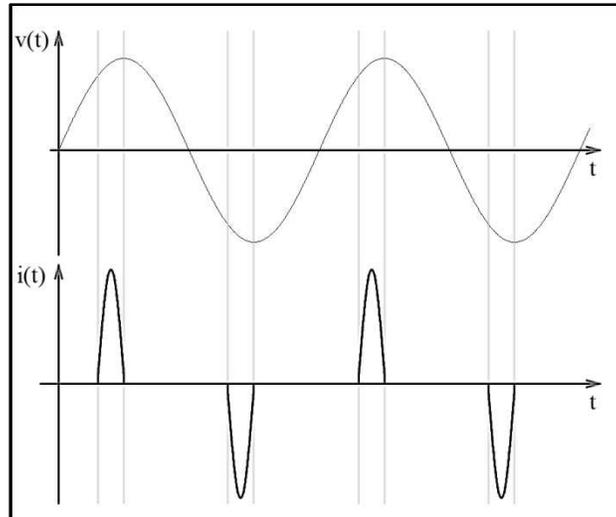
Sem capacitores: 123mA.

Com  $1\mu F$ : 158mA.

Com  $2\mu F$ : 200mA.

Portanto, o aumento da capacitância piora o fator de potência.

Como será visto oportunamente, esse efeito pode ser explicado pela análise do gráfico de tensão e da corrente consumida pelo reator eletrônico da lâmpada, mostrados na Figura 8.



**Figura 8 – Tensão e corrente nas lâmpadas eletrônicas.**

A corrente está um pouco adiantada em relação à tensão, representada em vermelho (efeito capacitivo). Portanto, um capacitor adicionado em paralelo só adiantaria ainda mais a corrente, reduzindo o fator de potência.

A tentativa de melhorar o fator de potência com indutores de pequena susceptância (grande indutância), para atrasar um pouco a corrente, em paralelo não apresentou resultados conclusivos, além de anular qualquer vantagem de custo ou tamanho.

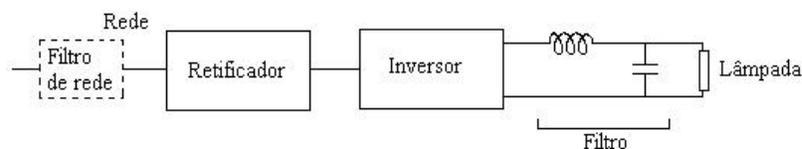
### 2.3. Reatores Eletrônicos

O reator eletrônico é um circuito que converte a frequência de alimentação da lâmpada, de 60 Hz, para uma frequência mais elevada, na faixa de dezenas de kHz. Nesta faixa de frequências, o reator em série com a lâmpada pode ser muito menor que os reatores usados em 60 Hz (cerca de 2,4 mH em lugar de 1,6 H nas lâmpadas analisadas). Adicionalmente, trabalhando-se em alta frequência (cerca de 40 kHz), a lâmpada apresenta comportamento resistivo.

### 2.3.1. Circuito dos Reatores Eletrônicos

Foram estudados alguns reatores eletrônicos de lâmpadas fluorescentes compactas comerciais: Sylvania 15W/127V, Sylvania 25W/127V, STLTEK 11W/110-130V, ECOLight 11W/127V, FREECOM 9W/127V, OSRAM 5W/220V, FLC11W/127V. Com exceção do reator da lâmpada Philips 23W/127 V, que inclui um chip que dificulta o estudo do circuito, todos os demais são bem parecidos e semelhantes ao circuito padrão conhecido na bibliografia [2].

O reator eletrônico pode ser separado em três módulos, o retificador, o inversor e o reator, dispostos da forma mostrada na Figura 9. Em pontilhado aparece um filtro de rede que só encontramos na lâmpada Sylvania 15W/127V.



**Figura 9 – Esquema de módulos do reator ligado à lâmpada.**

#### 2.3.1.a. Filtro de Rede

O filtro de rede presente numa das lâmpadas mais antiga que estudamos, apresentado na Figura 10, é um filtro passa baixas convencional, constituído por um indutor e dois capacitores. Este filtro possivelmente tem a finalidade de impedir que transitórios elétricos da rede de energia elétrica danifiquem os semicondutores (diodos e transistores) e/ou impedir que ruídos de alta frequência produzidos pela lâmpada se propaguem pela rede. Talvez para reduzir o custo dos reatores este filtro não é muito frequente, embora ele possa ter também o efeito de impedir a cintilação de lâmpadas desligadas analisada no Capítulo 4 deste trabalho.

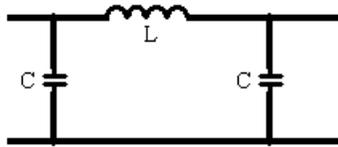


Figura 10 – Filtro de rede.

### 2.3.1.b. Retificador / Dobrador de Tensão

O retificador pode ser uma ponte de diodos com filtro com capacitor (da ordem de dezenas de  $\mu\text{F}$  ). O circuito está ilustrado na Figura 11.

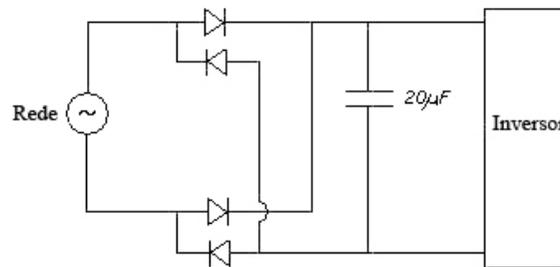


Figura 11 – Circuito do retificador.

Em muitas lâmpadas os fabricantes usam, no lugar do retificador de ponte de diodos, um circuito dobrador de tensão como o da Figura 12. Lâmpadas praticamente iguais, diferindo apenas no circuito retificador podem ser produzidas para funcionar em duas tensões: 110V e 220V.

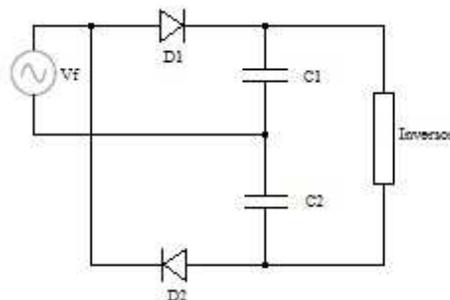


Figura 12 – Circuito dobrador de tensão.

### 2.3.1.b\*. Ondulação residual da tensão retificada

A tensão retificada e filtrada pelo capacitor possui uma ondulação residual da forma mostrada na Figura 13 pela curva em marrom.

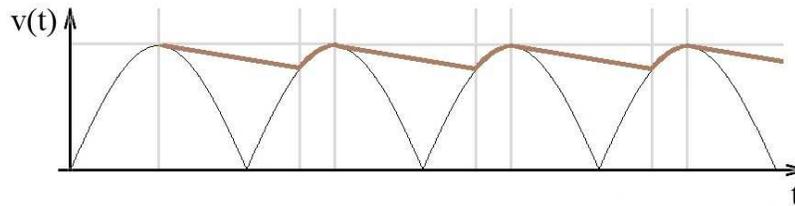


Figura 13 – Tensão na carga.

A curva em preto é a tensão fornecida pela ponte de diodos, ou seja, o módulo da função  $\text{sen}(\omega t)$ . A curva em marrom representa a tensão do capacitor, que se carrega e descarrega um pouco até próxima subida de tensão. No caso de lâmpadas utilizando dobradores de tensão, a tensão retificada e filtrada tem também o mesmo comportamento pois, embora os capacitores sejam carregados alternadamente a cada meio ciclo da tensão de alimentação, o capacitor equivalente à associação em série se descarrega de forma semelhante. A Figura 14 apresenta a tensão retificada observada na lâmpada ECOLight 11W/127V que utiliza dobrador de tensão. A ondulação pico a pico medida é de 68 V.

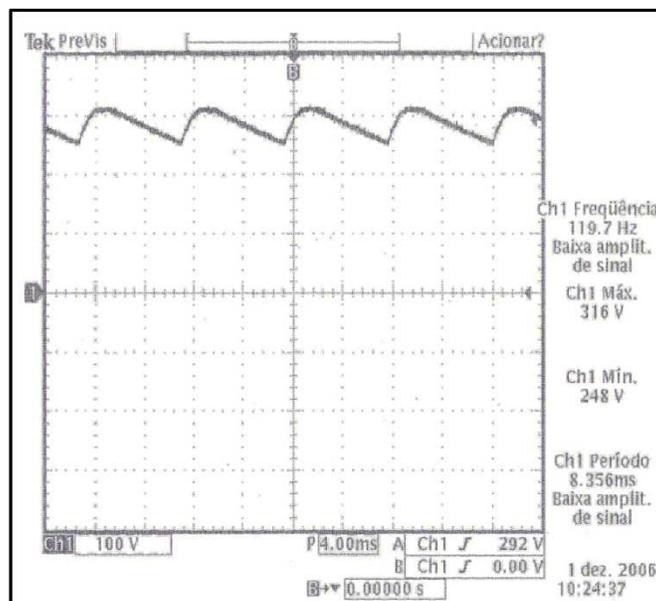


Figura 14 – Tensão retificada.

A ondulação residual na tensão retificada pode significar oscilação na intensidade luminosa emitida pela lâmpada, mas este fato não foi investigado.

É possível fazer uma estimativa da ondulação da tensão retificada admitindo-se que o inversor consome uma corrente constante, igual à potência da lâmpada dividida pela tensão retificada média. A queda de tensão durante o tempo em que os diodos não conduzem pode ser estimada a partir das expressões:

$$I \cdot \Delta t = \Delta Q \quad (2)$$

$$\Delta Q = C \cdot \Delta V \quad (3)$$

E, portanto,

$$\Delta V = \frac{1}{C} \cdot I \cdot \Delta t \quad (4)$$

A ondulação residual da tensão retificada é inversamente proporcional à capacitância  $C$ . Como se trata de uma estimativa, em lugar de calcular o tempo  $\Delta t$  a partir das formas de onda, vamos utilizar o valor de  $1/120$  de segundo. Esta aproximação levará a queda de tensão para um valor maior que o observado.

A capacitância de filtro equivalente para a lâmpada ECOLight (dois capacitores de  $6,8 \mu F$  em série, uma vez que esta lâmpada utiliza um dobrador de tensão) é de  $3,4 \mu F$ . A ondulação residual da tensão retificada estimada seria de  $96 V$ .

Uma estimativa melhor do intervalo  $\Delta t$  obtido a partir da Figura 14 levaria a ondulação residual estimada a  $64V$ , valor muito próximo do encontrado.

### 2.3.1.c. Inversor

A função do inversor é fornecer à lâmpada uma tensão alternada. O princípio de funcionamento do inversor pode ser ilustrado por chaves ligando a lâmpada a fontes de tensão em sentidos opostos, em paralelo, como é mostrado na Figura 15. As chaves se fecham alternadamente fornecendo uma tensão quadrada de  $+E/2$  ou  $-E/2$  a lâmpada.

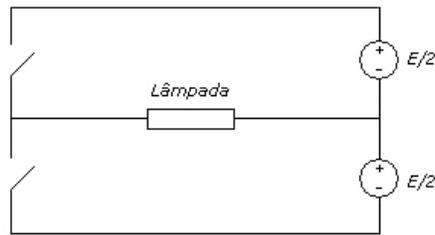


Figura 15 – Circuito primitivo do inversor.

Se adicionarmos um capacitor de valor elevado em série com a lâmpada, evita-se a necessidade das duas fontes de tensão, e o circuito fica como na Figura 16.

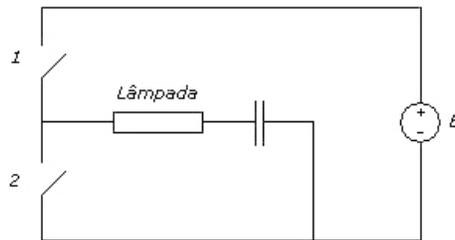
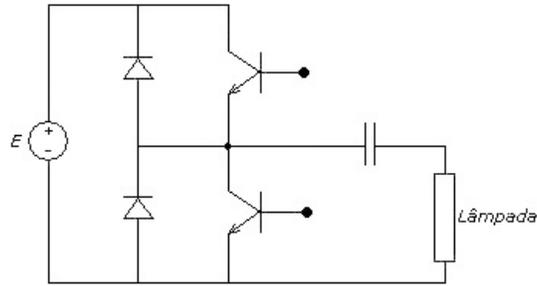


Figura 16 – Retirada de uma fonte.

Uma explicação intuitiva para o funcionamento do circuito com o capacitor é a de que quando a chave 1 se fecha o capacitor se carrega através da carga (lâmpada) e, quando a chave 2 se fecha (e a chave 1 abre), o capacitor se descarrega através da carga, com corrente no sentido contrario. A carga é percorrida por uma corrente alternada.

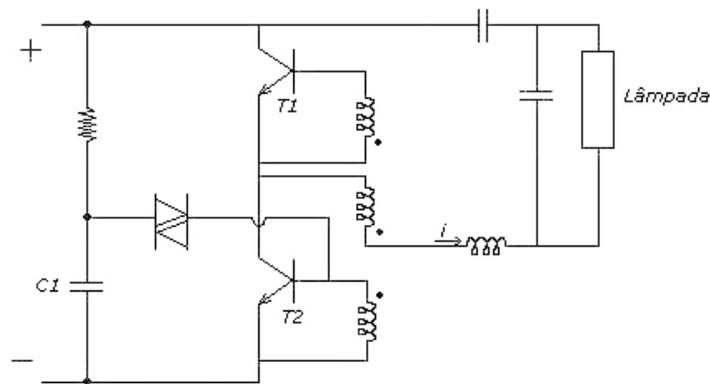
A função das chaves é exercida por transistores bipolares ou transistores a efeito de campo, como mostra a Figura 17.



**Figura 17 – Circuito do inversor.**

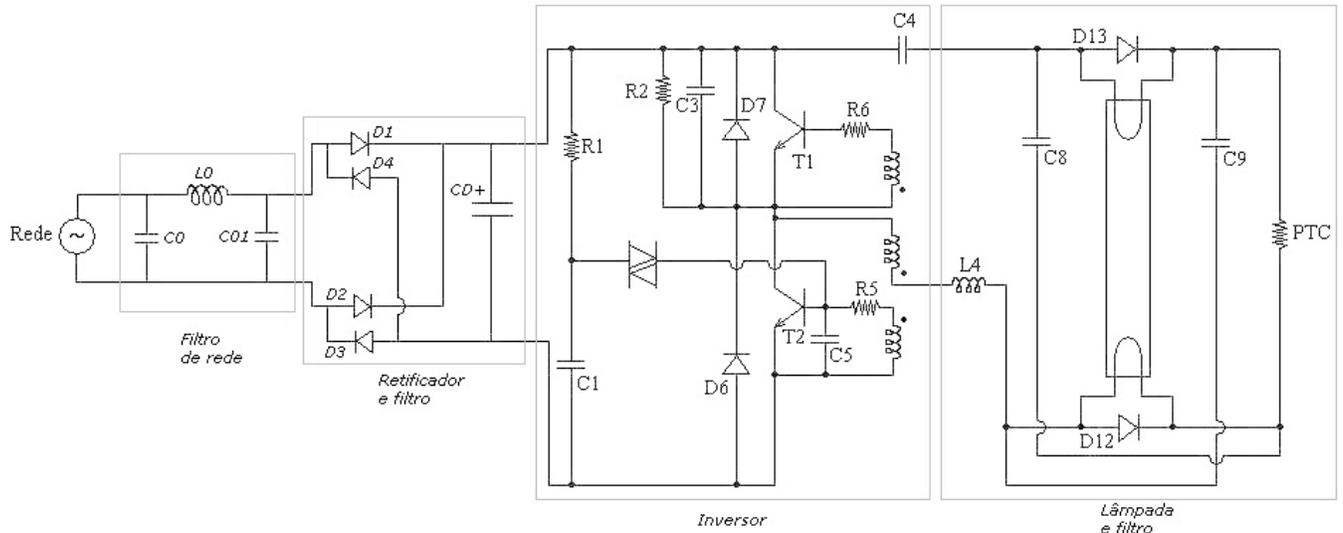
Os transistores conduzem alternadamente. Como a carga é indutiva é necessário assegurar um percurso para a corrente quando os transistores deixam de conduzir. Este percurso é assegurado pelos diodos de circulação acrescentados ao circuito.

Embora seja possível utilizar um circuito que forneça alternadamente a corrente de base para cada transistor, em todas as lâmpadas que analisamos era utilizado transformador para comutação auto-oscilante. O funcionamento deste circuito, reproduzido na Figura 18, é descrito na bibliografia. O Diac tem o papel de iniciar as oscilações.



**Figura 18 – Transformador para comutação auto-oscilante.**

O circuito completo do reator eletrônico da lâmpada Sylvania 15W/127 V está reproduzido na Figura 19.



**Figura 19 – Circuito completo do reator eletrônico.**

**Legenda: Valores dos parâmetros do circuito da Figura19.**

**CAPACITORES:**

- $C0 = 195pF$
- $C01 = 19nF$
- $C1 = 22nF$
- $CD+ = 22\mu F$
- $C3 = 1,48nF$
- $C4 = 220nF$
- $C5 = 23nF$
- $C7 = 21,9nF$
- $C8 = 4,7nF$
- $C9 = 4,65nF$

**RESISTORES:**

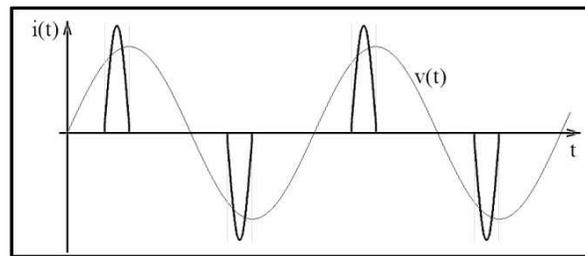
- $R1 = 386k\Omega$
- $R2 = 163k\Omega$
- $R5 = 6,9k\Omega$
- $R6 = 6,9k\Omega$
- PTC =  $800\Omega$

**INDUTORES:**

- $L0 = 1,35mH$
- $L4 = 2,4mH$

### 2.3.2. Fator de potência dos Reatores Eletrônicos

O circuito do retificador consome uma forma de corrente como mostra a Figura 20, pois só passa corrente quando o capacitor está se carregando. A figura apresenta também a tensão senoidal da rede.



**Figura 20 – Corrente fornecida pelo circuito.**

O fator de potência é definido como a relação entre a potência média consumida e o produto da tensão e corrente eficazes, como mostra a bibliografia [5]. Como a forma de onda da corrente se afasta muito da forma de onda da tensão, o fator de potência apresentado à rede é baixo. Para a lâmpada estudada ele é fornecido pelo fabricante e vale 0,5.

Pode-se notar que a redução do valor da capacitância do capacitor de filtro, que aumenta a ondulação da tensão retificada, leva a um aumento da duração dos intervalos em que os diodos conduzem e, em consequência, aumenta o fator de potência. Existe então um compromisso entre a ondulação residual da tensão retificada e o fator de potência apresentado à rede.

A bibliografia apresenta sugestões para melhorar o fator de potência apresentado pelos reatores eletrônicos [6, 7].

# CAPÍTULO 3:

## Características do Arco Elétrico

### 3.1. Característica Estática Tensão-Corrente do Arco

Em regime permanente, tensão e corrente de um arco elétrico se relacionam através de uma curva fortemente não-linear [8], de forma mostrada na Figura 21.

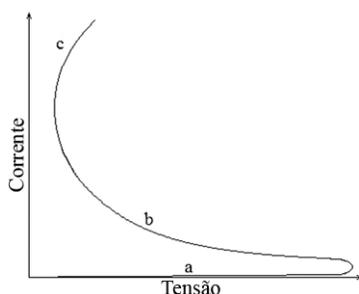


Figura 21 – Curva de funcionamento do arco elétrico.

O arco pode ser considerado, do ponto de vista estático, controlado por corrente: para cada corrente só existe um ponto de funcionamento.

Aparece na região (b) uma resistência dinâmica negativa. Esta é a região de funcionamento normal da lâmpada.

No trecho (a) a lâmpada não está acesa (a corrente é da ordem de microAmpères).

No trecho (c) a lâmpada seria rapidamente destruída.

Na região de funcionamento normal da lâmpada a tensão decresce com o aumento da corrente [5, 9]. A lâmpada apresenta resistência incremental negativa. Este comportamento pode ser interpretado fisicamente como decorrente do aumento do número de íons portadores de carga no gás ionizado em função do aumento da corrente.

Para a região de interesse aparecem, na bibliografia, expressões aproximadas para a curva, entre as quais uma linear e uma hiperbólica.

1) Expressão linear de acordo com [9]:  $v = V_s - R_s \cdot i$ . (5)

2) Expressão hiperbólica de acordo com [5]:  $v \cdot i^\alpha = K$ . (6)

Outras aproximações são possíveis, por exemplo, acrescentando termos de grau superior à curva linear. Nesse caso a tensão passaria a ser representada por um polinômio de grau maior que um em corrente.

### 3.2. Circuito Utilizado para Obtenção da Curva Estática

A Figura 22 mostra o circuito utilizado para se obter a característica estática tensão corrente de uma lâmpada fluorescente compacta. A lâmpada era prevista para funcionar na tensão da rede alternada. Foram mantidos o reator L (que limita a corrente quando a lâmpada é alimentada pela rede alternada) e o starter (que, em conjunto com o reator, inicia a descarga). O resistor R de valor suficientemente elevado foi acrescentado para limitar a corrente quando a lâmpada é alimentada com tensão contínua. Esta forma de alimentar a lâmpada, utilizada para obter sua característica estática tensão-corrente, não é adequada para uma utilização normal da lâmpada, uma vez que uma das principais vantagens deste tipo de lâmpada, a economia de energia, é perdida.

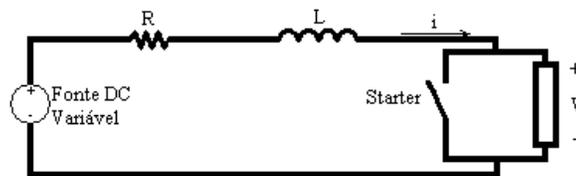


Figura 22– Circuito montado para determinar característica estática.

### 3.3. Análise da Estabilidade do Ponto de Equilíbrio Estático

A análise da estabilidade da posição de equilíbrio para este circuito é simples e é apresentada em textos clássicos [10].

Sendo  $v$  e  $i$  a tensão e a corrente da lâmpada, a característica estática tensão-corrente para a lâmpada pode ser descrita por uma função  $f(v, i) = 0$ .

A equação diferencial que descreve o comportamento do circuito usado para obtenção da característica estática da lâmpada e mostrado na Figura 22 é:

$$L \frac{di}{dt} + R \cdot i + v = E. \quad (7)$$

Nesta equação  $E$  é a tensão da fonte.

Sendo  $v_0$  e  $i_0$  respectivamente a tensão e a corrente em um ponto de equilíbrio, a condição de estabilidade local deste ponto é dada por:

$$R + \left. \frac{dv}{di} \right|_{i=i_0} > 0. \quad (8)$$

A resistência dinâmica do arco  $dv/di$  na região de funcionamento da lâmpada é negativa. Para a estabilidade do ponto de operação, a resistência em série  $R$  deve ser maior que o módulo da resistência dinâmica do arco. Este resultado parece estar de acordo com a experiência. Para estabilidade é necessário que a resistência  $R$  seja maior que o módulo da resistência dinâmica negativa da lâmpada. E o resultado não depende do valor da indutância  $L$ . Se o reator tiver sido retirado do circuito, as indutâncias parasitas, sempre presentes, levam ao mesmo resultado [11].

Na prática existe um capacitor de pequeno valor em paralelo com a lâmpada (e destinado a proteger o starter, evitando a ocorrência de faíscas quando ele abre).

Acrescentando uma capacitância  $C$  em paralelo com a lâmpada, a corrente  $i_L$  através do indutor deixa de ser apenas a corrente através da lâmpada. Ela inclui agora a corrente através do capacitor. O comportamento do circuito passa a ser descrito pelo sistema de equações diferenciais:

$$\begin{aligned} L \frac{di_L}{dt} + R \cdot i_L + v &= E, \\ C \frac{dv}{dt} + i &= i_L. \end{aligned} \quad (9)$$

No ponto de operação,

$$i = i_L = i_0.$$

A estabilidade local desta posição de equilíbrio depende agora de duas condições. Chamando a resistência dinâmica da lâmpada na posição de equilíbrio de

$$r = \left. \frac{dv}{di} \right|_{i=i_0} \quad (10)$$

estas condições (obtidas por exemplo pelo critério de Hurwitz, [12, 13]) são:

$$\begin{aligned} 1 + \frac{R}{r} &> 0, \\ \frac{R}{L} + \frac{1}{r.C} &> 0. \end{aligned} \quad (11)$$

A resistência dinâmica  $r$  da lâmpada, na região de funcionamento da lâmpada, é negativa. Então, a primeira destas condições exige um menor valor para  $R$  que o módulo da resistência dinâmica da lâmpada. Este resultado contradiz a condição (8) anteriormente obtida, independentemente do valor da capacitância  $C$ .

A análise de estabilidade do ponto de operação com este capacitor inverte a condição de estabilidade: a resistência  $R$  deve ser menor que o módulo da resistência dinâmica negativa da lâmpada. Novamente este resultado não depende do valor da capacitância em paralelo com a lâmpada. Capacitâncias parasitas, sempre presentes, são suficientes.

Entretanto este resultado contradiz a experiência. Para funcionamento estável, a resistência em série com a lâmpada deve ser grande. Esta é a condição correta.

A análise da estabilidade apresentada na bibliografia que leva em consideração apenas o circuito externo à lâmpada não é suficiente para concluir a condição de estabilidade.

### 3.3.1. Dinâmica do Arco

A contradição entre os resultados do item anterior exige uma análise levando em consideração a dinâmica do arco elétrico.

A corrente elétrica (de condução) corresponde a uma movimentação ordenada de cargas elétricas. Nos metais, por exemplo, a densidade de cargas é constante e sua velocidade média depende de um parâmetro chamado mobilidade e é proporcional ao campo elétrico. Em consequência, a corrente é proporcional à tensão, valendo a lei de Ohm.

Em descargas em gases as cargas são associadas a íons. Os íons são formados por vários mecanismos e desaparecem por recombinação. A relação entre tensão e corrente é então muito mais complexa que em metais [14]. A tensão e a corrente através do arco são relacionadas, em regime estático, por uma função  $f(v, i) = 0$ . Pode-se definir, a partir desta função, uma condutância estática  $G$  como a relação entre a corrente e a tensão em regime permanente. Uma hipótese que pode ser feita é que a densidade de íons em regime permanente é função da corrente através do arco. A tensão é uma função da corrente e a condutância estática  $G$  definida por

$$G(i) = \frac{i}{v} \quad (12)$$

é, também uma função  $G(i)$  da corrente. Quando a corrente e a tensão estão variando, em regime dinâmico, a relação entre elas é a condutância dinâmica linear  $g$ ,

$$g = \frac{i(t)}{v(t)}. \quad (13)$$

A bibliografia [5] propõe um modelo em que a condutância dinâmica  $g$  se relaciona com a condutância estática  $G(i)$  por uma equação diferencial de primeira ordem, a equação de Hochreiner:

$$T \frac{dg}{dt} + g = G(i). \quad (14)$$

A bibliografia [9] propõe que a resistência linear equivalente para o arco em alta frequência varia segundo uma equação de primeira ordem com constante de tempo da ordem de 0,001s. Então este valor pode ser considerado representativo para a constante de tempo do arco.

### 3.3.2. Análise da Estabilidade Considerando apenas a Dinâmica do Arco

A estabilidade da lâmpada alimentada por uma fonte de tensão  $E$  através de uma resistência  $R$  pode ser analisada combinando a equação (14) com a equação da reta de carga a seguir

$$i = \frac{E-v}{R}. \quad (15)$$

As equações (13) e (15) permitem expressar a corrente em função da condutância dinâmica  $g$ :

$$i = \frac{E.g}{1+R.g}. \quad (16)$$

A estabilidade local da posição de equilíbrio correspondente a uma corrente  $i_0$  através da lâmpada pode ser analisada linearizando a equação diferencial (14) nas proximidades desta corrente.

Escrevendo

$$g = g_0 + \delta g \quad (17)$$

onde  $g_0$  é a condutância dinâmica de equilíbrio quando a corrente é  $i_0$ , a equação linearizada fica:

$$T \frac{d\delta g}{dt} + \left[ 1 - \frac{dG}{dg} \Big|_{g=g_0} \right] \delta g = 0 \quad (18)$$

ou

$$T \frac{d\delta g}{dt} + \left[ 1 - G' \frac{di}{dg} \Big|_{g=g_0} \right] \delta g = 0. \quad (19)$$

Nesta equação  $G'$  representa a derivada da função  $G$  (12) em relação à corrente, calculada no ponto  $i_0$ . Esta derivada pode ser expressa como:

$$G' = \left( v(i_0) - i_0 \frac{dv}{di} \Big|_{i=i_0} \right) \frac{1}{v(i_0)^2}. \quad (20)$$

A derivada da corrente (16) em relação à condutância dinâmica é:

$$\left. \frac{di}{dg} \right|_{g=g_0} = \left. \frac{d}{dg} \left( \frac{E \cdot g}{1 + R \cdot g} \right) \right|_{g=g_0} = \frac{E}{(1 + R \cdot g_0)^2}. \quad (21)$$

A equação linearizada (19) pode ser escrita como:

$$T \frac{d\delta g}{dt} + \frac{i_0}{E} \left[ R + \left. \frac{dv}{di} \right|_{i=i_0} \right] \delta g = 0. \quad (22)$$

A condição para estabilidade local da posição de equilíbrio é o coeficiente de  $\delta g$  na equação (22) ser positivo. Esta condição pode ser escrita como:

$$R + \left. \frac{dv}{di} \right|_{i=i_0} > 0. \quad (23)$$

Esta condição é a mesma condição (8) obtida na análise admitindo para o arco uma característica estática, mas, agora, ela não depende de uma indutância em série com o arco e concorda com a experiência.

### 3.3.3. Dinâmica Local do Arco

Para incluir na análise da estabilidade o efeito de uma indutância em série e de um capacitor em paralelo, é necessário descrever a dinâmica do arco nas proximidades do ponto de operação por uma equação diferencial linear relacionando as grandezas tensão e corrente. Para isto a condutância dinâmica  $g$  é substituída, na equação de Hochreiner, pela relação  $i/v$  e a equação é linearizada nas proximidades de uma posição de equilíbrio  $(v_0, i_0)$ .

Escrevendo:

$$v = v_0 + \delta v \quad (24)$$

$$i = i_0 + \delta i \quad (25)$$

obtém-se, após feitos os cálculos,

$$v_0 T \frac{d\delta i}{dt} + v_0(1 - v_0 G') \delta i = i_0 T \frac{d\delta v}{dt} + i_0 \delta v \quad (26)$$

ou ainda, substituindo a derivada  $G'$  como feito acima,

$$v_0 T \frac{d\delta i}{dt} + i_0 \left. \frac{dv}{di} \right|_{i=i_0} \delta i = i_0 T \frac{d\delta v}{dt} + i_0 \delta v. \quad (27)$$

A partir desta equação pode-se ver que o arco é controlado por corrente. Dada uma perturbação na corrente  $\delta i$ , a equação permite obter a perturbação causada na tensão  $\delta v$ .

A equação característica desta equação é:

$$i_0 T \lambda + i_0 = 0. \quad (28)$$

E a raiz dessa equação característica

$$\lambda = -\frac{1}{T} \quad (29)$$

é negativa, portanto a tensão é estável.

Entretanto, dada uma perturbação  $\delta v$  na tensão, a equação permite obter a perturbação causada na corrente  $\delta i$ .

A equação característica é:

$$v_0 T \lambda + i_0 \left. \frac{dv}{di} \right|_{i=i_0} = 0. \quad (30)$$

E a condição de estabilidade é:

$$\left. \frac{dv}{di} \right|_{i=i_0} > 0. \quad (31)$$

Como a resistência dinâmica do arco é negativa, a condição não é satisfeita. O arco não é controlado por tensão.

Na situação analisada no item 3.3.3, em que o arco é alimentado por uma fonte de tensão em série com uma resistência  $R$ , a tensão e a corrente obedecem à equação da reta de carga (15). Nas proximidades da posição de equilíbrio esta equação leva a:

$$\delta v + R \delta i = 0. \quad (32)$$

É possível eliminar a tensão (ou a corrente) entre as equações (27) e (32), obtendo-se uma equação diferencial com apenas a corrente (ou a tensão):

$$ET \frac{d\delta i}{dt} + i_0 \left[ R + \frac{dv}{di} \Big|_{i=i_0} \right] \delta i = 0. \quad (33)$$

Esta equação leva, naturalmente, à mesma condição de estabilidade (8) já encontrada.

### 3.3.4. Efeito de uma Indutância em Série

A equação diferencial que descreve o comportamento do arco em série com uma indutância é novamente a equação (7). Nas proximidades de uma posição de equilíbrio esta equação pode ser escrita como

$$L \frac{d\delta i}{dt} + R\delta i + \delta v = 0. \quad (34)$$

Combinando esta equação com a equação (27), que descreve a dinâmica local do arco, obtém-se (pelo critério de Hurwitz) as duas condições de estabilidade para a posição de equilíbrio

$$R + \frac{dv}{di} \Big|_{i=i_0} > 0, \quad (35)$$

$$(Ri_0 + v_0)T + Li_0 > 0. \quad (36)$$

A segunda destas condições é sempre satisfeita. E a primeira reproduz a condição já encontrada (8) (considerado o arco estático em série com uma indutância) ou (23) (considerado o comportamento dinâmico do arco, sem indutância em série). Qualquer que seja seu valor, a indutância em série não altera a condição de estabilidade obtida considerando a dinâmica do arco.

### 3.3.5. Efeito da Inclusão de uma Capacitância em Paralelo com o Arco

Nas proximidades de uma posição de equilíbrio, o comportamento dinâmico do arco associado a um capacitor em paralelo e uma indutância em série é descrito pela equação (27) e pelas equações (9). Nesta situação e fazendo ainda:

$$i_L = i_0 + \delta i_L \quad (37)$$

Estas equações ficam escritas como:

$$v_0 T \frac{d\delta i}{dt} + i_0 \left. \frac{dv}{di} \right|_{i=i_0} \delta i = i_0 T \frac{d\delta v}{dt} + i_0 \delta v, \quad (27)$$

$$L \frac{d\delta i_L}{dt} + R \delta i_L + \delta v = 0, \quad (38)$$

$$C \frac{d\delta v}{dt} + \delta i = \delta i_L. \quad (39)$$

A equação característica correspondente a esta posição de equilíbrio é:

$$LCT \frac{v_0}{i_0} \lambda^3 + \left[ LC \left. \frac{dv}{di} \right|_{i=i_0} + RCT \frac{v_0}{i_0} + LT \right] \lambda^2 + \left[ RC \left. \frac{dv}{di} \right|_{i=i_0} + \frac{v_0}{i_0} T + RT + L \right] \lambda + \left[ R + \left. \frac{dv}{di} \right|_{i=i_0} \right] = 0. \quad (40)$$

Esta equação sintetiza todos os casos já estudados:

- Uma condição de estabilidade é o termo independente  $R + \left. \frac{dv}{di} \right|_{i=i_0}$  ter o mesmo sinal do coeficiente de maior grau;

- Se a constante de tempo  $T$  e a capacitância  $C$  forem ambas nulas (arco estático e indutor em série) a equação característica para análise da estabilidade da lâmpada é de primeiro grau

$$L\lambda + \left[ R + \left. \frac{dv}{di} \right|_{i=i_0} \right] = 0 \quad (41)$$

e a condição de estabilidade é (8);

o Com capacitância  $C$  não nula, continuando a supor a constante de tempo nula, a equação característica permanece de primeiro grau se a indutância for nula e passa a ser de segundo grau se a indutância for não nula:

$$LC \left. \frac{dv}{di} \right|_{i=i_0} \lambda^2 + \left[ RC \left. \frac{dv}{di} \right|_{i=i_0} + L \right] \lambda + \left[ R + \left. \frac{dv}{di} \right|_{i=i_0} \right] = 0. \quad (42)$$

Em ambos os casos a condição de estabilidade se inverte, em desacordo com a experiência;

o A condição de estabilidade volta a ser (8) ou (23), portanto de acordo com a experiência, ao se considerar a constante de tempo da lâmpada  $T$ , independentemente de  $L$  ser nula (quando a equação característica fica de segundo grau) ou não (equação característica de terceiro grau);

o A análise das demais condições de estabilidade quando a equação característica é de grau superior a 1 não é muito simples, mas, adotando para os diversos parâmetros valores típicos, é possível concluir que elas são, em geral, satisfeitas.

A consideração da dinâmica do arco é então necessária para a análise de sua estabilidade.

### 3.3.6. Considerações a respeito da dinâmica do dispositivo

A definição de um resistor como resistência controlada por tensão ou controlada por corrente aparece em geral na bibliografia como uma propriedade global do dispositivo, ligada à sua característica estática. Ora, parece haver mais sentido em considerar esta qualificação como uma propriedade local, ligada à dinâmica do dispositivo. Desta forma, inclusive, o dispositivo pode ter regiões em que esta propriedade seja diferente.

Assim, antes do aparecimento da descarga luminosa, aparece, em gases a descarga Townsend (ou descarga escura). Neste fenômeno moléculas ionizadas (por razões diversas)

são aceleradas por aplicação de campos elétricos e originam correntes. A corrente é função da tensão: para tensões baixas, a corrente é função crescente da tensão. A partir de certa tensão a corrente praticamente fica constante. Com tensões suficientemente elevadas, os íons atingem velocidades suficientes para produzir outros íons em choques com moléculas neutras de gás e a corrente sobe novamente. Gradualmente se passa ao regime de descarga luminosa, agora com tensões decrescentes com a corrente.

Outros exemplos de resistências negativas são descritos no APÊNDICE - Outras Resistências Negativas

### 3.4. Curva Estática Encontrada Experimentalmente

Foram medidos valores de corrente e tensão de lâmpadas fluorescentes compactas em regime estático. Uma dificuldade encontrada nestas medidas foi o fato de, com corrente constante, a tensão sofre oscilações periódicas não senoidais relativamente grandes, de frequência da ordem de 10 kHz e com amplitude de até uma dezena de volts. A Figura 23 mostra a tensão e a corrente observadas na lâmpada OSRAM DULUX-S, 5W em uma das medidas feitas. Estas oscilações, chamadas oscilações de anodo, são analisadas na referência [15].

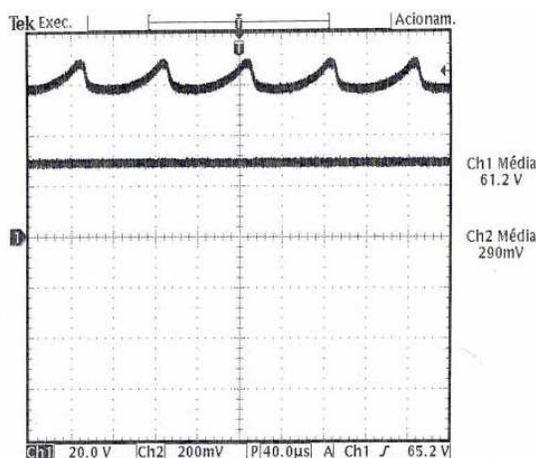
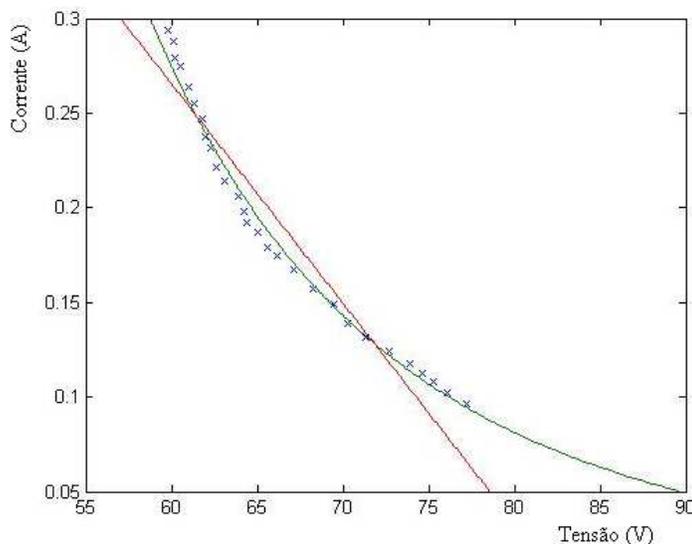


Figura 23 – Oscilação na tensão (CH1) e corrente constante (CH2).

Outras dificuldades decorrem possivelmente do efeito da temperatura e possivelmente do acelerado envelhecimento da lâmpada quando alimentada com tensões contínuas. Cada sessão de medidas levava a valores diferentes e depois de poucas horas de funcionamento a lâmpada queimou. Possivelmente, em corrente constante, os filamentos se deterioram rapidamente devido ao bombeamento de íons nos eletrodos desgastando-os de forma desigual. Em corrente alternada há recuperação quando se inverte a polaridade em cada meio ciclo.

Qualitativamente o resultado experimental é sempre o mesmo, mas quantitativamente as medidas variam devido às dificuldades mencionadas. Tais dificuldades não foram o tema do presente trabalho, cuja preocupação é uma análise geral e ampla do funcionamento da lâmpada.

Foi feito o gráfico com os pontos experimentais de tensão e corrente. Um resultado típico é apresentado na Figura 24 em que são mostrados os pontos experimentais e as aproximações. Para as medidas a oscilação da tensão foi desprezada, isto é, a tensão registrada foi a tensão média sobre a lâmpada.



**Figura 24 – Medidas experimentais e aproximações linear e hiperbólica.**

Observa-se que aquela que mais se aproxima dos resultados obtidos experimentalmente é aquela da referência [5] que sugere adotar para a descarga luminosa uma característica estática hiperbólica. Para esta aproximação e este conjunto de medidas obtêm-se os parâmetros da lâmpada  $K$  e  $\alpha$  ( $K = 43,777$ ;  $\alpha = 0,244$ ).

### 3.5. Simulações em Baixa Freqüência

Foi desenvolvido o sistema de equações que descreve o funcionamento da lâmpada com o reator alimentada pela rede de distribuição de energia elétrica. O reator é representado por indutância e resistência em série, desprezando o capacitor em paralelo. O sistema de segunda ordem foi obtido a partir da equação do circuito (7) e da equação de Hochreiner (14) que descreve a dinâmica da lâmpada. Foi substituída na segunda equação (44) a condutância estática pela aproximação hiperbólica (6), que se mostrou bastante boa para a região de interesse.

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{i}{g} = e(t), \quad (43)$$

$$T \frac{dg}{dt} + g + \frac{|i|^\varepsilon}{K}. \quad (44)$$

Em que:

$L$  - indutância do reator;

$i$  - valor da corrente;

$R$  - resistência do reator;

$g$  - condutância instantânea da lâmpada;

$e(t)$  - tensão fornecida pela fonte de tensão;

$K, \varepsilon$  - parâmetros da lâmpada.

Sendo:  $\varepsilon = \alpha + 1$

As equações (43) e (44) foram simuladas em Matlab, utilizando os parâmetros abaixo:

$$L = 1,6\text{H}; \quad R = 76\Omega; \quad K = 30; \quad T = 0,0001; \quad \varepsilon = 1,108;$$

e, a alimentação foi suposta ser a rede de energia elétrica, portanto

$$e(t) = E \cos(\omega t).$$

A tensão de pico  $E$  é 180V (127V eficazes) e a freqüência  $\omega$  de 377rad/s (60Hz).

O valor da constante de tempo  $T$  adotado é o mesmo do utilizado no artigo de Ben-Yaakov [9] para uma lâmpada produzida pelo mesmo fabricante.

Com a inclusão do capacitor em paralelo com a lâmpada, as equações que descrevem o comportamento da lâmpada passam a ser de terceira ordem

$$T \frac{dg}{dt} + g = \frac{(gv)^\varepsilon}{K}, \quad (45)$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri + v = E \cos(\omega t), \quad (46)$$

$$C \frac{dv}{dt} = i - gv. \quad (47)$$

Em que:

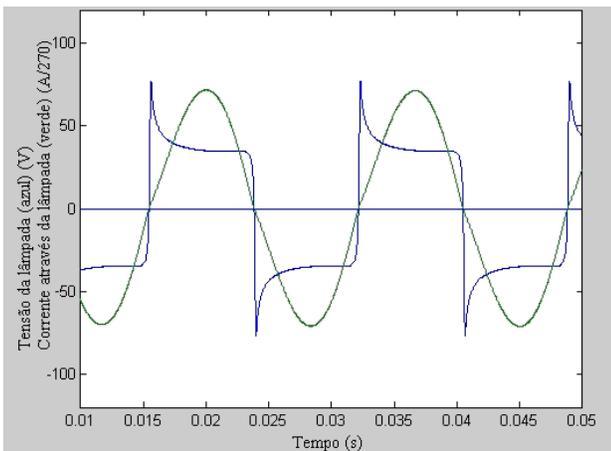
$C$ - capacitância do capacitor;

$i$  - valor da corrente no reator;

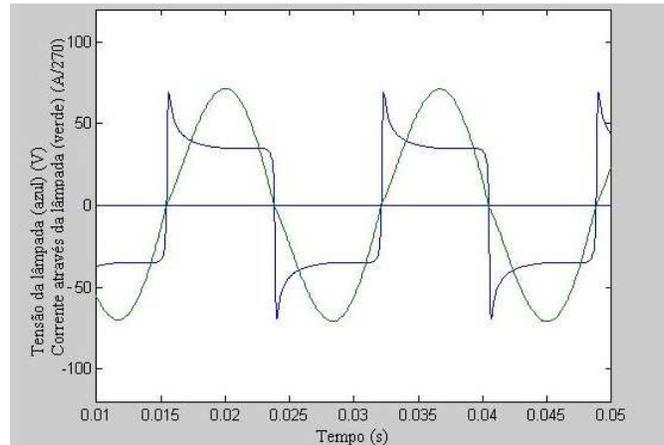
$v$  - tensão na lâmpada.

A corrente  $i$  é, neste modelo, a corrente através do reator. A corrente através da lâmpada é dada pelo produto  $g.v$ . Para a simulação foram usados os mesmos parâmetros da simulação anterior, acrescentando, para o capacitor, o valor medido 3,5 nF.

Os resultados das simulações sem e com o capacitor, mostrados respectivamente nas Figuras 25 e 26 são muito semelhantes, mostrando que a pequena capacitância em paralelo com a lâmpada quando sua dinâmica é descrita pela equação de Hochreiner não afeta nem a estabilidade de funcionamento em regime estático nem o comportamento simulado da lâmpada em frequência baixa.



**Figura 25 – Gráfico tensão (V), em azul, e corrente (A/270), em verde, ambos em função do tempo, da simulação de segunda ordem.**



**Figura 26– Gráfico tensão (V), em azul, e corrente (A/270), em verde, ambos em função do tempo, da simulação de terceira ordem.**

### 3.6. Verificação Experimental em Baixa Freqüência

Foi então determinada a curva tensão e corrente em função do tempo, experimentalmente, para que fosse possível comparar o comportamento de uma lâmpada com o proposto pelos dois modelos (com e sem o capacitor).

Para isso, foi montado um circuito composto por uma lâmpada comercial (OSRAM DULUX-S, 5W) em série com o reator indicado pelo fabricante e com um resistor de resistência  $2,7\Omega$ . Esse resistor foi acrescentado para que o valor da corrente pudesse ser medido pelo osciloscópio que fornece a tensão desse resistor, cuja relação com a corrente é linear. A figura obtida através do osciloscópio está representada pela Figura 27.

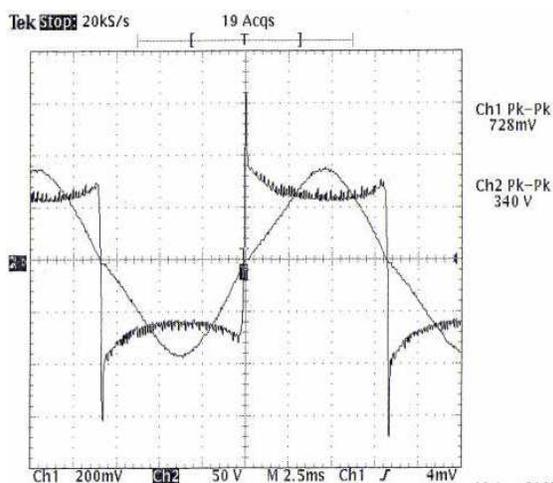
A concordância qualitativa com o resultado da simulação foi muito boa. Tendo em vista a imprecisão na determinação dos parâmetros em regime estático, os valores dos parâmetros na simulação foram ajustados para a melhor concordância quantitativa.

### 3.7. Constante de Tempo

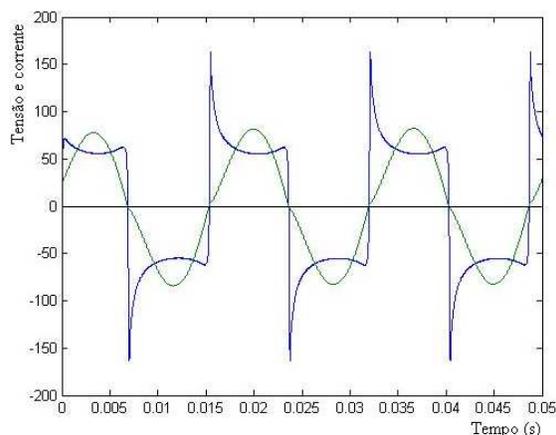
A constante de tempo  $T$  da lâmpada pode ser determinada aproximadamente a partir de seu comportamento em freqüências baixas, como as freqüências de distribuição de energia elétrica. Para isto a lâmpada é ligada a uma tensão alternada de 60 Hertz e aplica-se o modelo de funcionamento da lâmpada descrito pelo sistema de equações (45), (46) e (47).

A partir da comparação gráfica dos resultados da simulação com os resultados experimentais, mostrados respectivamente nas Figuras 27 e 28, foi possível ajustar o valor da constante de tempo  $T$  de forma a aproximar os dois gráficos. O valor encontrado para a constante de tempo que torna estes resultados mais próximos é  $T = 0,0008$ .

Cabe observar que a tensão na lâmpada observada experimentalmente apresenta as oscilações em alta frequência já relatadas anteriormente, e que não aparecem no comportamento simulado.



**Figura 27–** Curvas tensão (CH 2) e corrente (CH 1) em função do tempo, determinadas experimentalmente.



**Figura 28 –** Simulação: voltagem ( $V/50$ ), em azul, e corrente ( $A/(200m \times 1, 15)$ ), em verde, pelo tempo.

### 3.8. Simulação em Frequências Mais Elevadas

A bibliografia [9] sugere que em frequências elevadas a lâmpada se comporta como resistor linear, ou seja, com tensão proporcional à corrente. A explicação física é que a alteração da corrente acontece de forma mais rápida do que tempo necessário para alteração do número de íons e assim a corrente é proporcional ao campo elétrico.

Foi simulado o comportamento da lâmpada em altas frequências, utilizando-se as equações (45), (46) e (47) e aumentando o valor da frequência para 3770rad/s (600Hz), mostrada na Figura 29, e para 251000rad/s (40kHz), na Figura 30. Esta última frequência é, aproximadamente, a frequência utilizada nas lâmpadas alimentadas com reator eletrônico.

Para essas simulações em alta frequência, a indutância do reator foi diminuída para que a reatância fosse mantida constante.

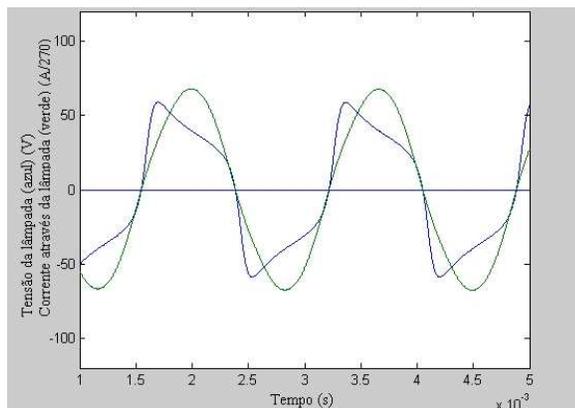


Figura 29 – Gráfico tensão (V), em azul, e corrente (A/270), em verde, em função do tempo, com a frequência aumentada para 3770rad/s.

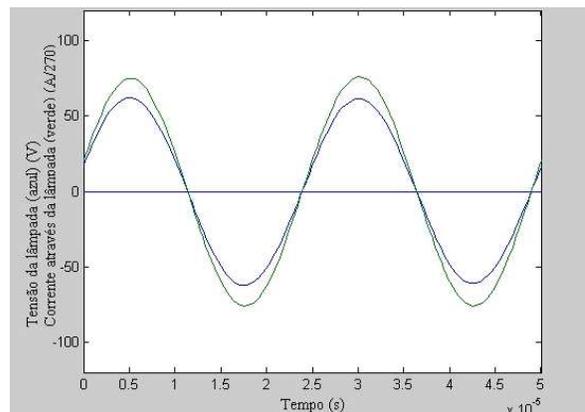


Figura 30 – Gráfico tensão (V), em azul, e corrente (A/270), em verde, em função do tempo, com a frequência aumentada para 251000rad/s.

Percebe-se que à medida que a frequência aumenta a tensão e corrente tornam-se cada vez mais próximas de curvas senoidais, confirmando que também com este modelo o comportamento da lâmpada tende a ser o de uma resistência linear se a frequência é elevada.

Plotou-se, então, o gráfico tensão por corrente para o ultimo caso com alta frequência (251.000rad/s). O resultado, mostrado na Figura 31, foi algo próximo a uma reta, indicando que o comportamento dinâmico da lâmpada em altas frequências é efetivamente resistivo, como antecipado. Entretanto, mantém-se a propriedade de ser um dispositivo controlado por corrente: se alimentado a partir de uma fonte de tensão, é necessário ter uma impedância (reator) em série. De fato, a indutância a ser utilizada pode ter um valor pequeno (alguns mili Henries) pelo fato da frequência ser elevada.

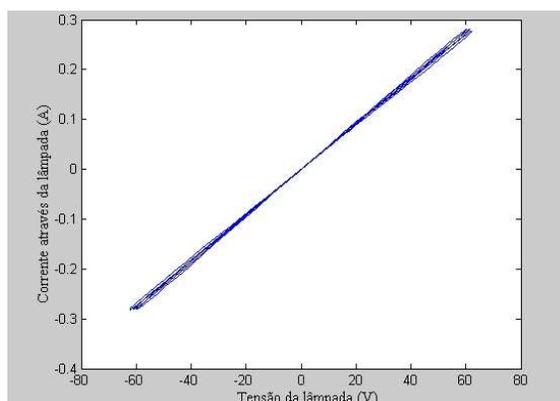


Figura 31 – Gráfico corrente (A) por tensão (V) para a frequência 251.000rad/s.

### 3.9. Resultados Experimentais em Alta Frequência

Como não existe disponível na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação gerador que possa fornecer tensões e correntes senoidais em frequências da ordem de 50 kHz e com amplitudes necessárias para acender a lâmpada, foi usada para as medidas uma lâmpada alimentada através do seu reator eletrônico, construído por um inversor e um indutor em serie. O retificador (no caso desta lâmpada, um circuito dobrador de tensão) foi substituído por uma fonte DC externa, em razão do ‘ripple’ muito elevado observado na tensão retificada que dificultaria a observação de um regime permanente na lâmpada. Foram observadas no osciloscópio a tensão e a corrente na lâmpada (Figura 32). Como se pode ver, a tensão e a corrente medidas são aproximadamente proporcionais, confirmando o caráter resistivo da lâmpada em altas frequências. Nota-se que a corrente apresenta irregularidades em dois pontos de cada ciclo.

Observa-se que a corrente é aproximadamente triangular, isso ocorre, pois a tensão de saída do inversor é quadrada e muito maior que a tensão na lâmpada e o filtro é aproximadamente um indutor em serie. Assim, a corrente é proporcional à integral da tensão quadrada.

Aparece ainda um efeito não encontrado em nossa pesquisa bibliográfica. A curva tensão-corrente para a lâmpada, representada na Figura 33, mostra que, na verdade, a tensão e a corrente não estão em fase: a corrente está um pouco adiantada. Este comportamento corresponde ao efeito de uma pequena capacitância em paralelo com a lâmpada, de valor aproximadamente 2 nF. É importante lembrar que existe um capacitor de valor próximo a este (na lâmpada estudada 2,33 nF) em paralelo com a lâmpada, mas a corrente medida e representada nas Figura 32 e 33 não inclui a corrente através deste capacitor.

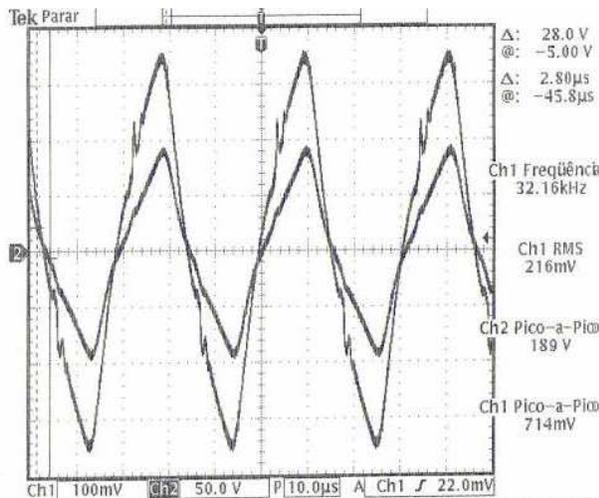


Figura 32 – Corrente (CH1) e tensão (CH2) na lâmpada pelo tempo.

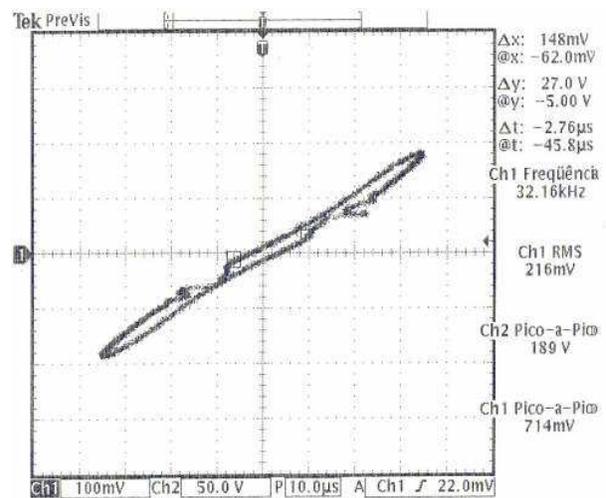


Figura 33 – Gráfico XY para corrente (X) tensão (Y).

Excluindo as irregularidades e o pequeno efeito capacitivo, é possível aproximar a lâmpada por uma resistência. A sua condutância depende da corrente.

# Capítulo 4:

## Cintilações

### 4.1. Cintilações em lâmpadas fluorescentes

Durante o trabalho verificamos a ocorrência de emissão de lampejos de luz de baixa intensidade e curta duração por algumas lâmpadas fluorescentes compactas desligadas. O intervalo entre os episódios é da ordem de um minuto. O fenômeno pode ser causado por capacitâncias elétricas parasitas existentes na instalação elétrica, em particular nas ligações com dois ou mais interruptores para uma lâmpada (interruptores usualmente designados como paralelos).

### 4.2. Capacitâncias Parasitas em Instalações Elétricas

A Figura 34 representa o circuito de comando de uma lâmpada com dois interruptores. Na posição representada na figura a lâmpada se encontra apagada. A alteração na posição de um dos interruptores acende a lâmpada e uma nova alteração, em qualquer um dos interruptores, apaga novamente a lâmpada.

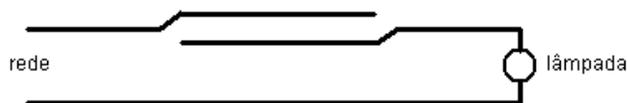


Figura 34 – Circuito de comando da lâmpada com dois interruptores.

As normas para instalações elétricas exigem que os condutores de um mesmo circuito sejam instalados dentro de um mesmo conduto [16]. Em consequência disto, os dois fios ligando os dois interruptores estarão próximos entre si, fazendo aparecer uma capacitância entre eles.

Algumas medidas em instalações domiciliares normais mostraram que esta capacitância é da ordem de nanofarads. Assim uma lâmpada desligada está, na realidade, ligada à rede de energia elétrica em série com esta capacitância.

A impedância da capacitância série, da ordem de Megohms, é suficientemente elevada para garantir que seu efeito em grande número de casos (por exemplo, com lâmpadas incandescentes) possa ser desprezado.

A Figura 35 mostra um circuito retificador com ponte de diodos e dotado de um filtro constituído apenas por um capacitor (cuja capacitância é da ordem de dezenas de microfarads). Este circuito alimenta o inversor que alimenta a lâmpada em alta frequência.

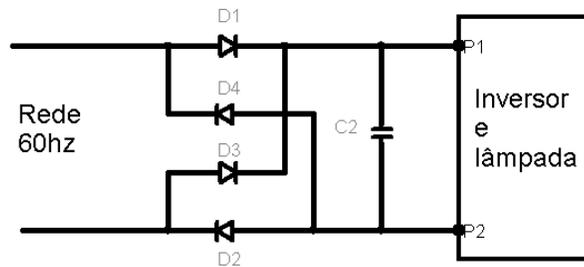


Figura 35 – Circuito retificador.

Se a tensão no capacitor de filtro for baixa, o circuito inversor não consome corrente. Os transistores do circuito do inversor (Figura 19) estão cortados. A Figura 36 representa o circuito do retificador e filtro ligado à rede através de um capacitor na situação em que o inversor não consome corrente.

Supondo diodos ideais, a relação entre a tensão  $v$  e a corrente  $i$  consumida pela ponte retificadora pode ser traduzida por uma curva no plano  $(v,i)$  [17] como representado na Figura 37.

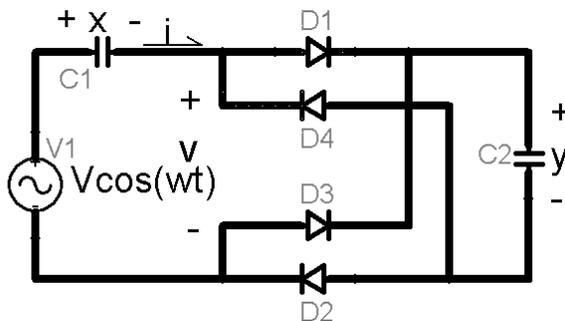


Figura 36 – Circuito do retificador e filtro.

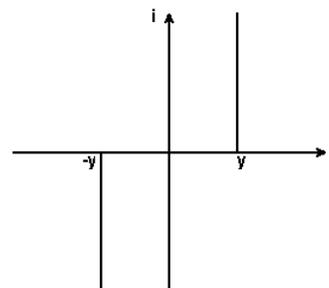


Figura 37 – Curva  $v \times i$ .

Enquanto a tensão  $v$  estiver no intervalo  $(-y, y)$ , a corrente  $i$  é nula. Para corrente  $i$  positiva, a tensão  $v$  é igual a  $y$  e, para corrente  $i$  negativa, a tensão  $v$  vale  $-y$ .

As tensões  $x$  e  $y$  permanecem constantes enquanto a corrente  $i$  for nula.

Para analisar o comportamento do circuito é possível supor uma condição inicial na qual a corrente  $i$  seja positiva. Os diodos D1 e D2 conduzem.

Em consequência:

$$v = y > 0. \quad (48)$$

O comportamento do circuito representado pela Figura 36 é o mesmo do circuito representado pela Figura 38, na qual os diodos em condução foram substituídos por curto-circuitos e os diodos cortados por circuitos abertos.

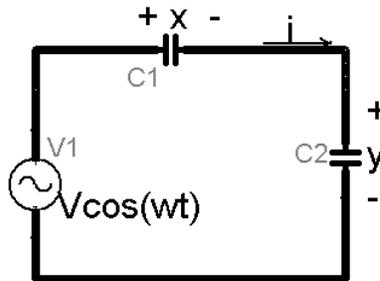


Figura 38 – Circuito equivalente para D1 e D2 conduzindo.

Como a corrente  $i$ , dada por

$$i = C_{eq} \frac{d}{dt} (V \cos(\omega t)) > 0 \quad (49)$$

com

$$C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (50)$$

ou

$$i = -\omega C_{eq} V \sin(\omega t) > 0 \quad (51)$$

é supostamente positiva, a tensão da rede  $V \cos(\omega t)$  é crescente.

No instante em que a tensão da rede atinge o máximo  $V$ , a corrente se anula.

Os valores das tensões  $x$  e  $y$  nos capacitores  $C_1$  e  $C_2$  neste instante são chamados, respectivamente,  $x_n$  e  $y_n$ .

A partir da relação entre tensão e corrente consumida pela ponte retificadora, vem:

$$x_n + y_n = V. \quad (52)$$

A corrente  $i$  assume novamente valores diferentes de zero, e agora negativos, quando a tensão  $v$  dada por:

$$v = V\cos(\omega t) - x \quad (53)$$

fica igual a  $-y_n$ . Nesta situação os diodos D3 e D4 conduzem e o circuito da Figura 36 pode ser representado na forma da Figura 39.

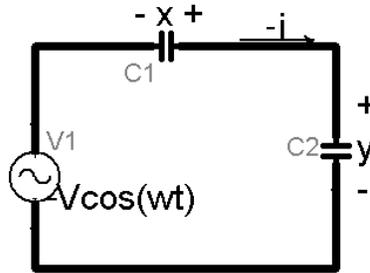


Figura 39 – Circuito equivalente para D3 e D4 conduzindo.

As alterações nas convenções de sinais nesta figura evidenciam sua semelhança com a Figura 38. As diferenças aparecem nos sinais da tensão  $x$ , no capacitor  $C_1$ , e da fonte.

A corrente  $-i$ , dada por:

$$-i = \omega C_{eq} V \sin(\omega t) > 0 \quad (54)$$

se anula novamente, agora quando a tensão da rede passa por um mínimo.

Os valores das tensões  $x$  e  $y$  nos capacitores  $C_1$  e  $C_2$  neste instante são chamados, respectivamente,  $x_{n+1}$  e  $y_{n+1}$ .

A partir da relação entre tensão e corrente consumida pela ponte retificadora, vem:

$$-x_{n+1} + y_{n+1} = V. \quad (55)$$

O circuito quando conduzindo corrente diferente de zero se alterna entre os modelos representados pelas Figuras 38 e 39. Em cada instante em que a corrente se anula valem (52) ou (55).

A carga que atravessa os dois capacitores  $C_1$  e  $C_2$  durante cada intervalo de condução é a mesma (uma vez que enquanto a corrente  $i$  é diferente de zero, os capacitores estão em série). Esta carga é dada, para cada capacitor, pela variação da tensão em cada capacitor. Esta carga corresponde à variação da carga em cada capacitor e pode ser escrita, respectivamente, para  $C_2$  e para  $C_1$ :

$$Q = C_2(y_{n+1} - y_n) \quad (56)$$

e

$$Q = -C_1(x_{n+1} - x_n). \quad (57)$$

Em consequência pode-se escrever:

$$C_1(x_{n+1} - x_n) = -C_2(y_{n+1} - y_n) \quad (58)$$

ou, levando em conta (52) e (55),

$$(C_1 + C_2)y_{n+1} = (C_2 - C_1)y_n + 2C_1V. \quad (59)$$

A solução desta equação recorrente linear de primeira ordem [18] pode ser escrita, com  $y_0$  sendo o valor da tensão  $y$  no instante da primeira comutação,

$$y_n = (y_0 - V) \left( \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} \right)^n + V. \quad (60)$$

Isto significa que a tensão no capacitor  $C_2$ , considerada nos instantes de extremos da tensão da rede, tende para a tensão de pico da rede  $V$ . De mesma forma pode-se concluir que a tensão no capacitor  $C_1$  é alternadamente positiva e negativa e tende, em módulo, a zero.

Pode-se observar que as hipóteses feitas para escrever (60) implicam em faixas permitidas para as tensões iniciais nos capacitores. Por exemplo, uma tensão muito elevada no capacitor  $C_2$  poderia impedir qualquer corrente de circular pelo circuito. Entretanto, nas condições de interesse prático, pode-se admitir sempre que as hipóteses são satisfeitas.

### 4.3. Simulações

O circuito da Figura 36 foi simulado no SPICE para  $C_1$  e  $C_2$  com valores de  $1\eta F$  e  $10\mu F$ , respectivamente, e tensões iniciais nulas, até que a tensão  $y$  atinja um valor próximo ao valor de pico da rede. O intervalo de simulação foi de dois minutos.

Entretanto, a visualização das curvas de tensão de  $x$  e  $y$  ficou prejudicada devido ao espaço de tempo ser muito longo, como mostra a Figura 40.

Para facilitar a visualização das curvas foi alterada a relação das capacitâncias  $C_1$  e  $C_2$ . A tensão  $y$  cresce mais rapidamente e as oscilações na tensão  $x$  ficam mais visíveis. Assim usando  $C_1$  igual a  $100\eta F$  obtivemos o gráfico da Figura 41.

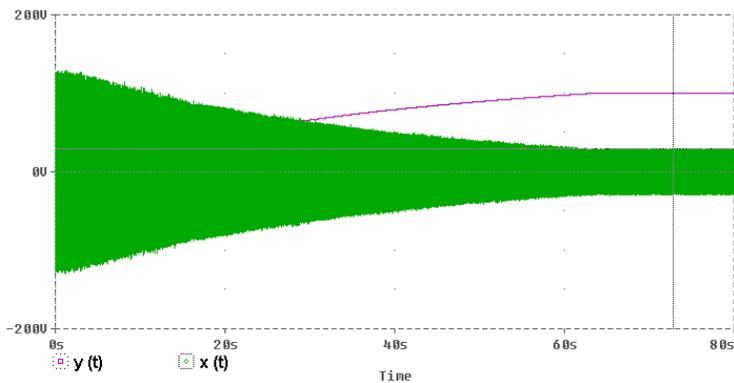


Figura 40 – Simulação do circuito da Figura 38.

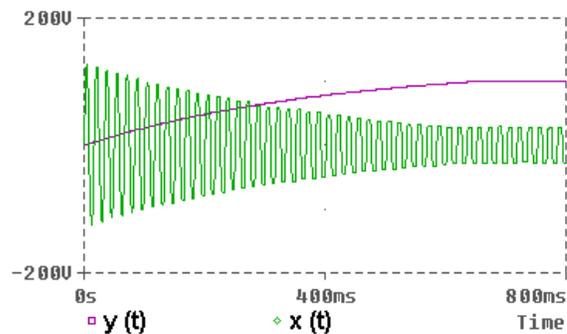


Figura 41 – Gráfico obtido com  $C_1$  igual a  $100\eta F$ .

#### 4.4. Constante de Tempo de Carga do Capacitor

Para avaliar a ordem de grandeza dos tempos envolvidos nesta análise pode-se admitir para  $C_1$  e  $C_2$  valores de 1 nF e 10  $\mu F$ . O resultado da simulação na Figura 40 mostra que em 1 minuto (que corresponde a 7200 meios períodos da tensão da rede) o capacitor  $C_2$ , suposto inicialmente descarregado, atinge uma tensão da ordem de 72% do valor de pico da tensão da rede. E em dois minutos esta tensão será da ordem de 94% do valor de pico da tensão da rede. Nestas condições, em algum instante o capacitor terá tensão suficiente para acender a lâmpada, que emite um lampejo de luz, descarrega parcialmente o capacitor, e apaga. E o processo continua. Aparecem na lâmpada desligada oscilações de relaxação.

Tanto a análise teórica como a simulação sugerem que a tensão de capacitor  $C_2$ , enquanto o inversor não consome corrente, segue um comportamento aproximadamente exponencial. De fato, a expressão para a tensão  $y$  nos instantes em que os diodos interrompem a condução pode ser aproximada por uma expressão para  $y$  como função contínua do tempo. Substituindo  $y_n$  por  $y$  e exprimindo  $n$  em função do tempo

$$n=2ft \quad (61)$$

onde  $f$  é a frequência de alimentação e  $y_0 = y(0)$  é o valor inicial, vem:

$$y = [y(0) - V] \left( \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} \right)^{2ft} + V \quad (62)$$

$$y = [y(0) - V] \exp(-\lambda t) + V. \quad (63)$$

Onde:

$$\lambda = 2f \ln \left( \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} \right) \quad (64)$$

ou, aproximadamente, como  $C_1 \ll C_2$ :

$$\lambda = 4f \frac{C_1}{C_2}. \quad (65)$$

Este comportamento para a tensão no capacitor  $C_2$  poderia ser obtido se, em lugar de ser carregado através de uma fonte alternada e retificada, ele fosse carregado por uma fonte de corrente contínua de tensão  $V$  (igual ao valor de pico da fonte AC) em série com uma resistência  $R_{eq}$  dada por:

$$\lambda = \frac{1}{R_{eq} C_2} = 4f \frac{C_1}{C_2} \Rightarrow R_{eq} = \frac{1}{4f C_1}. \quad (66)$$

#### 4.5. Capacitor Chaveado

A inversão periódica das conexões de um capacitor em um circuito permite a circulação de uma corrente média proporcional à tensão aplicada [19]. Esta corrente  $I$  é dada por:

$$I = \frac{2EC}{T}. \quad (67)$$

Nesta expressão  $E$  é a tensão aplicada,  $T$  é o tempo durante o qual o capacitor fica em cada posição e  $C$  é a capacitância do capacitor. Esta expressão permite concluir que o capacitor é equivalente a um resistor de resistência:

$$R = \frac{T}{2C}. \quad (68)$$

Esta propriedade pode ser empregada na medida de capacitâncias, como proposto em [19], e tem sido utilizada para construção de resistores em circuitos microeletrônicos.

Comparando as Figura 38 e Figura 39, nota-se que a diferença entre elas pode ser atribuída a uma inversão das conexões do capacitor  $C_1$ . As correntes,  $i$  na Figura 38 e  $-i$  na Figura 39 são positivas e as tensões  $V \cos(\omega t)$  na Figura 38 e  $-V \cos(\omega t)$  na Figura 39 são também positivas. A tensão  $x$  entre os terminais do capacitor oscila entre os valores positivos e negativos,  $(V - y)$  e  $(-V + y)$ . A equação (66) mostra que o capacitor  $C_1$ , no circuito

analisado, é equivalente a uma resistência com o valor previsto em [19]. O tempo  $T$  é metade do período da alimentação.

Mas é interessante observar que a corrente média através desta resistência depende do valor de pico e não do valor médio da tensão.

#### 4.6. Verificações Experimentais

Foi escolhida para as verificações experimentais uma lâmpada fluorescente compacta Avant de 30W, 127V. Nesta lâmpada o capacitor  $C_2$  é de 33 microfarads. Alimentada pela rede de 127V, 60Hz, através de capacitâncias de 0,1 até 1 nF, foi observada a ocorrência de oscilações de relaxação caracterizadas pela emissão de lampejos de luz de baixa intensidade e curta duração.

Esta lâmpada emite lampejo de luz quando a tensão do capacitor  $C_2$  atinge 32,5V. Após a emissão a tensão cai para 3V.

O intervalo  $T_e$  de emissão dos lampejos pode ser calculado a partir de (63), adotando uma tensão inicial de 3V e final de 32,5V. Obtém-se (em unidades do Sistema Internacional):

$$T_e = \frac{2,43}{C_1} 10^{-8}. \quad (69)$$

A Figura 42 mostra o intervalo calculado em função da capacitância  $C_1$  e os pontos experimentais obtidos. A concordância é boa, mas parece haver um pequeno erro sistemático, que pode ser atribuído à dificuldade encontrada na medição das tensões no capacitor  $C_2$ .

Foram também feitas medidas substituindo o capacitor  $C_1$ , a fonte de tensão alternada e a ponte de diodos por uma fonte de tensão contínua em série com um resistor. Neste caso, o intervalo de emissão dos lampejos calculado a partir de (66) é dado (em unidades do Sistema Internacional) por:

$$T_e = 5,83 \cdot 10^{-6} R_{eq}. \quad (70)$$

A Figura 43 permite comparar o intervalo calculado com o intervalo medido em função da resistência  $R_{eq}$ . Novamente a concordância é boa.

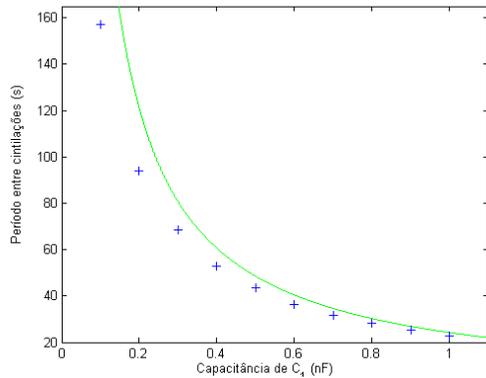


Figura 42 – Gráfico da capacitância de  $C_1$  pelo período entre as cintilações.

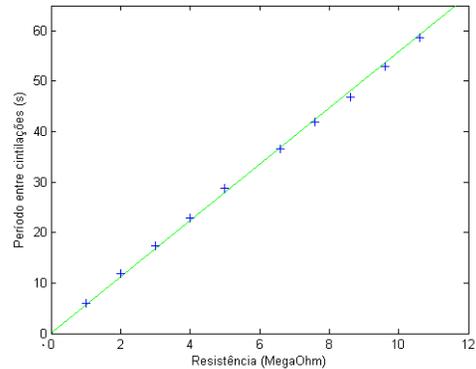


Figura 43 – Gráfico da resistência  $R_{eq}$  pelo período entre as cintilações.

#### 4.7. Solução

Não sendo possível ou desejável alterar as instalações elétricas onde ocorre o fenômeno, ele pode ser impedido com a colocação de um pequeno capacitor  $C_3$ , de alguns nanoFarads, em paralelo com a lâmpada. O capacitor pode integrar o reator eletrônico da lâmpada (e em algumas lâmpadas este capacitor existe, constituindo o filtro de linha passivo) ou pode ser colocado no receptáculo da lâmpada. A Figura 44 representa o circuito da lâmpada desligada com este capacitor acrescentado e a Figura 45 seu equivalente de Thévenin.

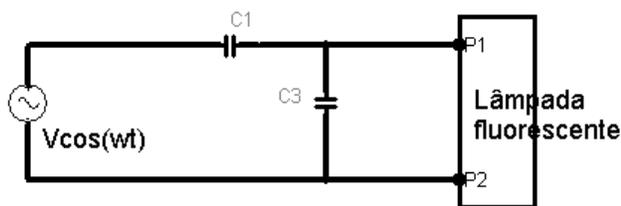


Figura 44 – Circuito com a lâmpada desligada e  $C_3$ .

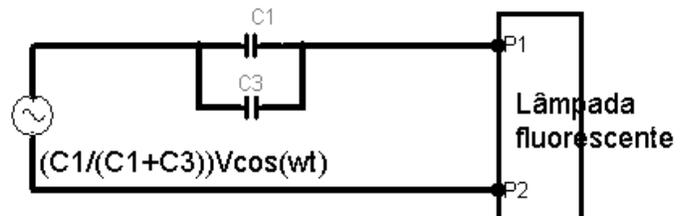


Figura 45 – Equivalente de Thévenin do circuito.

Embora a capacitância em série com a lâmpada desligada tenha aumentado, a tensão que aparece no capacitor  $C_2$  nesta situação tende agora a um valor menor que  $V$ . Se esta tensão for suficientemente reduzida o fenômeno deixa de ocorrer.

## Conclusão e Trabalhos Futuros

O foco do trabalho foi estudar a lâmpada fluorescente de forma ampla abordando diversos temas que despertaram o interesse. Assim, inicialmente abordamos o tema de forma prática verificando os circuitos dos reatores eletrônicos comerciais e magnéticos e quais são as razões que motivam o uso dos reatores eletrônicos. Verificamos que o efeito estroboscópico não é muito pronunciado nas lâmpadas fluorescentes com reator eletrônico e que esse tipo de lâmpada é menor e mais barato que as lâmpadas com reator magnético. Vimos ainda que é possível corrigir o fator de potência das lâmpadas com reator magnético com o simples uso de capacitor em paralelo, o que não é possível para a lâmpada com reator magnético, em que é necessário um circuito corretor de forma e defasagem da corrente para correção do fator de potência.

Em seguida, foi feita a análise da estabilidade da lâmpada fluorescente em regime permanente. Essa análise é importante, pois trouxe resultados diferentes daqueles mostrados em todas as bibliografias encontradas que concluem a condição de equilíbrio estático apenas levando em consideração o circuito externo, supondo o efeito de indutâncias parasitas e ignorando o efeito de capacitâncias parasitas. Já a análise de estabilidade do presente trabalho vai além e mostra que as capacitâncias parasitas, sempre presentes no circuito, destroem a condição de estabilidade e que é necessário levar em consideração a dinâmica do arco para chegar a condições de estabilidade não conflitantes.

Para essa análise da estabilidade é considerada a equação de Hochreiner para descrever a dinâmica do arco elétrico. E com os pontos experimentais da característica estática tensão-corrente foi possível obter uma equação hiperbólica que descreve a condutância estática da lâmpada. Assim, com as equações da condutância dinâmica e estática da lâmpada e com as equações do circuito externo, foi criado um modelo matemático para descrever o funcionamento do sistema da lâmpada alimentada por fonte de tensão através de reator. Através de experimentos e simulações mostramos que o modelo é bastante coerente.

Por último, foi constatado o efeito de emissão de lampejos de luz por lâmpadas fluorescentes desligadas. O efeito foi investigado e foi possível mostrar, através de análise teórica, simulações e experimentos, que o causador do efeito são as capacitâncias parasitas presentes nas instalações elétricas entre os fios que ligam dois interruptores em paralelo. Foi

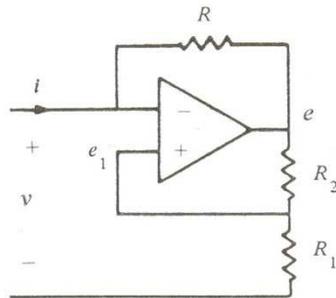
sugerido ainda um procedimento para evitar essas cintilações a partir da adição de um capacitor em paralelo com a lâmpada, diminuindo o valor da tensão máxima vista pela lâmpada desligada. Esse estudo sobre cintilações emitidas por lâmpadas fluorescentes desligadas é um resultado novo para o acervo científico e foi transformado em experimento de laboratório do curso de eletromagnetismo da Unicamp. Recebemos ainda um convite para publicar o artigo sobre esse tema, apresentado no Induscon [4], na revista Eletricidade Moderna.

Como propostas para trabalhos futuros poderia ser feito um estudo aprofundado a respeito das oscilações de anodo vistas na Figura 23, que não foram analisadas em outros trabalhos. No livro 'Electric Discharge Lamps' J. F. Waymouth analisa as regiões do plasma e suas quedas de tensão, mas não analisa essa situação em alta frequência para lâmpadas com reator eletrônico. Outra análise que poderia ser feita é a respeito do fator de potência das lâmpadas fluorescentes, assunto que não foi foco do presente trabalho.

# APÊNDICE:

## Outras Resistências Negativas

Existem outros exemplos de resistências negativas, com a qualificação de controlados por corrente ou controlados por tensão desde que, respectivamente, a tensão entre seus terminais seja função unívoca da corrente que o atravessa ou a corrente seja função unívoca da tensão [17]. A estabilidade das posições de equilíbrio para circuitos com estes dispositivos é usualmente analisada considerando elementos externos ao dispositivo de resistência negativa.



**Figura 46 – Resistência negativa controlada por corrente.**

A Figura 46 representa um circuito realizado com amplificador operacional e que apresenta, na região linear, resistência negativa. Admitindo que o amplificador operacional seja ideal, enquanto ele não satura, ele define uma relação algébrica entre a tensão de saída  $e$  e as entradas  $v$  e  $e_1$

$$e = A(e_1 - v). \quad (71)$$

Nesta equação  $A$  é o ganho do amplificador operacional. Um valor representativo para  $A$  é 100.000.

É possível ainda escrever para o circuito as equações

$$e_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} e \quad (72)$$

$$i = \frac{v - e_1}{R}. \quad (73)$$

Destas equações decorre a relação entre a tensão  $v$  e a corrente  $i$

$$v = -\frac{AR_1 - (R_1 + R_2)}{AR_2 + (R_1 + R_2)} Ri \quad (74)$$

ou, considerando o ganho  $A$  muito grande,

$$v = -\frac{R_1}{R_2} Ri \quad (75)$$

O circuito apresenta resistência negativa.

A análise do circuito pode facilmente ser estendida para as situações em que o amplificador operacional está saturado [11]. A Figura 47 mostra a característica tensão-corrente para este circuito. A tensão é uma função de valor único da corrente. O circuito tem uma resistência negativa controlada por corrente.

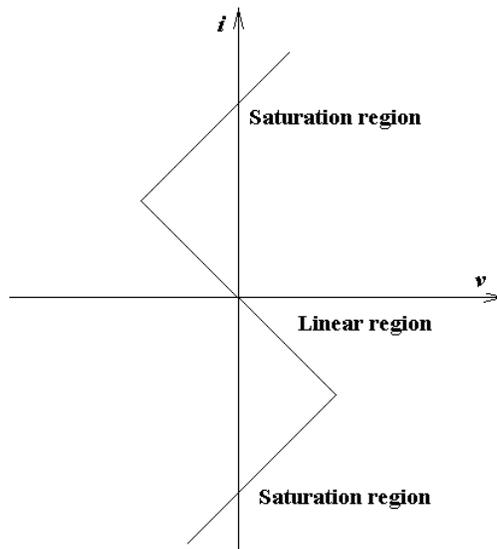


Figura 47 – Resistor não-linear controlado por corrente.

Amplificadores operacionais reais não apresentam resposta em frequência plana como definida pela equação (71).

Admitindo para o amplificador uma resposta com um pólo dominante (isto é, caindo a 6dB por oitava a partir de uma frequência de corte), a relação (71) é substituída por uma equação diferencial de primeira ordem

$$T \frac{de}{dt} + e = A(e_1 - v). \quad (76)$$

Nesta equação a constante de tempo  $T$  é o inverso da frequência angular de corte.

Com esta alteração, a relação entre a tensão  $v$  e a corrente  $i$  no circuito passa também a ser descrita por uma equação diferencial

$$T(R_1+R_2)R \frac{di}{dt} - [(A-1)R_1 + R_2]Ri = T(R_1+R_2) \frac{dv}{dt} + [R_1 + (A+1)R_2]v. \quad (77)$$

A determinação das grandezas  $v$  e  $i$  depende, naturalmente, de uma segunda relação entre elas, estabelecida pelo circuito externo ligado ao amplificador operacional. Mas algumas conclusões podem ser obtidas a partir da equação (72).

Se o circuito externo for uma fonte de corrente, o primeiro membro da equação (72) é conhecido, a equação é uma equação para a tensão  $v$  e essa tensão é estável. Os coeficientes da tensão e da derivada da tensão são ambos positivos. Entretanto, se o circuito externo for uma fonte de tensão, o segundo membro de (73) é conhecido, a equação é uma equação para a corrente. Se o ganho  $A$  for grande, o coeficiente de  $i$  nessa equação é negativo. A equação é instável. A corrente cresce e o amplificador sai da região linear.

Pode-se afirmar que, para este circuito, a corrente determina a tensão. A resistência negativa é controlada por corrente. Mas esta conclusão é independente da conclusão obtida a partir da curva estática  $(v, i)$  e, de fato, parece fazer mais sentido: a qualidade controlada por corrente ou controlada por tensão é uma propriedade local e depende da dinâmica do dispositivo.

Amplificadores operacionais também podem ser empregados para construir resistências negativas controladas por tensão. O circuito é muito semelhante ao representado na Figura 46, apenas sendo trocadas as entradas do amplificador operacional. A corrente é uma função de valor único da tensão [17] e, na região linear, a relação entre tensão e corrente é dada pela equação diferencial

$$T(R_1+R_2)R \frac{di}{dt} + [(A+1)R_1 + R_2]Ri = T(R_1+R_2) \frac{dv}{dt} + [R_1 - (A-1)R_2]v. \quad (78)$$

Agora se o circuito externo for uma fonte de corrente, o primeiro membro desta equação é conhecido, a equação é uma equação para a tensão  $v$  e, se o ganho  $A$  for grande, essa tensão é instável. Se o circuito externo for uma fonte de tensão, o segundo membro dessa equação é conhecido, a equação é uma equação para a corrente e a corrente é estável. A equação é instável. A corrente cresce e o amplificador sai da região linear.

## *Bibliografia*

[1] Diretiva 2009/125/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 21 de Outubro de 2009, relativa à criação de um quadro para definir os requisitos de concepção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia.

[2] M. Polonskii, A. R. Seidel, “Reatores Eletrônicos para Iluminação Fluorescente”, UNIJUÍ, Ijuí, 2008.

[3] A. C. C. Lyra, G. P. Siqueira, Y. Burian, “Oscilações de Relaxação em Lâmpadas Fluorescentes Compactas Desligadas”, Dincon 2008, 7th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications, Presidente Prudente, maio de 2008.

[4] A. C. C. Lyra, G. P. Siqueira, Y. Burian, “Cintilações Emitidas por Lâmpadas Fluorescentes Compactas Desligadas”, Induscon 2008, VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas, agosto de 2008.

[5] A.C.C. Carvalho, M.Portela, M. Lacorte e R. Colombo, “A Teoria do Arco Elétrico nos Disjuntores de Alta Tensão”, EDUF, Niteroi, Brasil, pp. 309-316, 1995.

[6] Brioschi, R. O.; Lamego, M. M.; Vieira, J.L.F.; “Reator eletrônico de baixo custo e alto fator de potência”; controle e automação; vol 9; número 5; setembro, outubro, novembro e dezembro de 1998.

[7] Biswas, S. K.; Dhanuka, R. P.; “Design considerations for economical electronic ballasts”; Power Electronics and Drive Systems, 1995., Proceedings of 1995 International Conference on Publication; IEEE.

[8] G. Zeveke, P.Ionkin, A. Netushil, S. Strakhov, “Analysis and Synthesis of Electric Circuits”, Editora MIR, 1979.

- [9] S. Ben-Yaakov, M. Shvartsas, and S. Glozman, "Static and Dynamics of Fluorescent Lamps Operating at High Frequency: Modeling and Simulation", IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC-99, pp. 467-472, 1999.
- [10] A.A.Andronov, A.A.Vitt, and S.E.Khaikin, "Theory of Oscillators", Pergamon Press, Oxford, pp. 219-222, 1966.
- [11] L.O.Chua, C.A.Desoer, and E.S.Kuh, "Linear and Nonlinear Circuits", McGraw-Hill, New York, pp. 417-421, 1987.
- [12] A.Netushil, "Theory of Automatic Control", MIR, Moscow, pp. 145-149, 1973.
- [13] R. C. Dorf, "Modern Control Systems", Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, 1974.
- [14] G.P.Siqueira, Y. Burian Jr., "Dynamic Electric Behavior of Compact Fluorescent Lamps", 12<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference, Portoroz, Slovenia, pp.1268-1270, 2006.
- [15] J.F. Waymouth, "Electric Discharge Lamps", MIT Press, 1971, pg. 109 e 110.
- [16] H. Creder, "Instalações Elétricas", 15<sup>a</sup> edição, editora LTC, 2006.
- [17] Y. Burian Jr. e A.C.C.Lyra, "Circuitos Elétricos", Pearson, São Paulo, 2006.
- [18] I. Gumowski, C. Mira, "Dynamique Chaotique, Transformations Ponctuelles, Transition Ordre-Désordre", Cepadues Edirions, Toulouse, 1980.
- [19] J. C. Maxwell, "A Treatise on Electricity & Magnetism", Vol.2, editora Dover, reprodução da terceira edição publicada por Clarendon Press em 1891.
- [20] U. Mader, P. Horn, "A dynamic model for the electrical characteristics of fluorescentlamps", Industry Applications Society Annual Meeting, 1992. Conference Record of the 1992 IEEE.