

SISTEMAS ELETRÔNICOS PARA LÂMPADAS DE VAPOR DE SÓDIO DE ALTA PRESSÃO

Anderson Soares André e Arnaldo José Perin

INEP – Instituto de Eletrônica de Potência

Departamento de Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Santa Catarina

CEP 88040-970, C.P. 5119, Florianópolis - SC

Brasil

E-mail: pindotiba@hotmail.com - arnaldo.perin@inep.ufsc.br

Resumo - O objetivo deste artigo é apresentar aspectos relevantes para projeto e desenvolvimento de reatores eletrônicos que operem lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão em alta frequência, sem excitar o fenômeno da ressonância acústica. Apresentar-se-á um breve estudo a respeito da lâmpada e dos principais meios de excitação do fenômeno. Segue-se uma discussão sobre circuitos de ignição e circuitos inversores.

Palavras-Chave – lâmpada de vapor de sódio, reator eletrônico, ressonâncias acústica.

HIGH-PRESSURE SODIUM LAMPS ELECTRONIC BALLASTS

Abstract – The objective of this paper is shown relevant aspects about electronic ballasts for high-pressure sodium lamps design procedure eliminating acoustic resonance excitation. A study about lamp and acoustic resonance phenomenon is presented. Electronic circuits able to ignite and supply a suitable current to the lamp are presented.

Keywords – acoustic resonance, electronic ballast, high-pressure sodium lamp.

I. INTRODUÇÃO

As lâmpadas de descarga elétrica são aquelas em que o fluxo luminoso é gerado a partir da passagem da corrente elétrica em um gás, mistura de gases ou vapores. Este tipo de lâmpada é normalmente mais eficiente que as lâmpadas incandescentes porque a sua radiação é obtida em regiões de espectro de temperatura maior que àquelas que se pode obter com filamentos sólidos. Além disso, a emissão do corpo negro, que é a máxima possível, está mais voltada para as radiações ultravioleta que para as radiações infravermelhas (IR). As descargas emitem de forma mais seletiva que o tungstênio e menos energia é desperdiçada com emissão da IR [1].

Uma das lâmpadas de descargas mais comuns na atualidade é a lâmpada fluorescente, que nada mais é que uma lâmpada de mercúrio de baixa pressão, na qual a maior

parte da luz é emitida por uma camada de material fluorescente que reveste o tubo internamente, excitada pela radiação ultravioleta gerada pela descarga [2]. Nessas lâmpadas, a quase totalidade de seu comprimento é ocupada por um plasma muito uniforme chamado coluna positiva e é esta a região que produz radiação com alta eficiência.

Caso a pressão da lâmpada seja aumentada, a temperatura do gás também sobe e, eventualmente em pressões próximas a uma atmosfera, a temperatura do gás aproxima-se da temperatura do elétron, o que leva a um grande gradiente de temperatura. O fluxo de calor gerado limita a eficiência da radiação em torno de 60% [1]. Lâmpadas com estas características formam uma segunda categoria, denominadas de alta pressão, e englobam as lâmpadas de mercúrio, sódio e vapores múltiplos (vapor metálico). Devido à alta temperatura existente, a descarga precisa ser contida em um invólucro refratário.

Os estudos que levaram especificamente ao desenvolvimento da lâmpada de vapor de sódio de alta pressão começaram somente em 1920, quando a descarga em vapor de sódio a baixa pressão foi obtida. O aumento da pressão é interessante porque melhora a luz amarela emitida por esta lâmpada. O principal problema para obter a lâmpada de sódio de alta pressão foi encontrar um material para o tubo de descarga transmissor de luz e resistente ao ataque do sódio nas altas temperaturas envolvidas. A primeira lâmpada prática foi construída no início dos anos 60 nos Estados Unidos. A contínua pesquisa nesta área resultou no aparecimento de lâmpadas com melhor eficiência luminosa, extensa gama de potências e diversificação de modelos [2].

A melhora desses sistemas de iluminação é feita através de diversas abordagens como: produção de lâmpada utilizando vapores com diferentes composições, lâmpadas que evitam o fenômeno do reacendimento cíclico no fim da vida útil [3], operação pulsada para controle da cor da lâmpada [4] e operação em alta frequência utilizando reatores eletrônicos. A operação destas lâmpadas em alta frequência apresenta-se como um grande desafio devido ao fenômeno conhecido como ressonância acústica.

A. Ressonância Acústica

Operando em altas frequências, o aumento na eficiência da lâmpada não é observado segundo [5], embora alguns autores afirmem que este aumento possa ocorrer [6]. Porém, a operação de lâmpadas de alta pressão em alta frequência pode resultar no surgimento de instabilidades dentro dos pequenos tubos de descarga, ou seja, a ressonância acústica, geralmente dentro da faixa de 1kHz a 300kHz.

Tais instabilidades são decorrência de ondas estacionárias de pressão, que podem levar a distorções no formato do arco. A flutuação periódica na potência da lâmpada resulta em uma flutuação na pressão do gás de mesma frequência. Se esta frequência for igual a frequência de ressonância acústica particular do tubo de descarga, ondas estacionárias são geradas e estas ondas estacionárias são normalmente assumidas como a causa principal da ressonância acústica [7]. As oscilações na densidade do gás podem distorcer o caminho da descarga que, por sua vez, distorce a entrada de calor que alimenta as ondas de pressão. Esta interação determina a possibilidade ou não de se observar a ressonância experimentalmente [8]. Em tubos de descarga, essas oscilações de pressão, superpostas a pressão média do gás, são produzidas pela modulação da potência de entrada local, causando ondas de pressão, que refletem nas paredes do tubo de descarga, produzindo ondas de pressão estacionárias, o que pode levar a distorções visíveis no arco. Em alguns casos o arco pode curvar-se até tocar o tubo de descarga, provocando um aquecimento local que pode levar a sua quebra e conseqüente destruição da lâmpada [5].

A Tabela I mostra um conjunto de frequências consideradas críticas, com relação à ressonância acústica, para operação das lâmpadas de vapor de sódio.

TABELA I

Frequências Críticas Para Ressonância Acústica [8]

Potência da Lâmpada	400W	250W	150W
Tipo de Ressonância	Frequência da Potência		
Longitudinal	3,0 ~ 3,8	3,8 ~ 4,5	7,75 ~ 8,5
Azimutal	36,6 ~ 46	37 ~ 48	50 ~ 60
Radial	83 ~ 87	80 ~ 91	110 ~ 116

Além do fenômeno da ressonância acústica, outros dois fatores de grande relevância para o desenvolvimento de reatores eletrônicos para este tipo de lâmpada são a variação da tensão de arco com a vida útil e a amplitude de tensão necessária para prover a ignição da mesma.

B. Variação da Tensão de Arco

Ao contrário das lâmpadas de vapor de mercúrio e de vapor metálico que apresentam tensão de arco relativamente constante com a variação da potência, a tensão de arco das lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão varia com a potência. Em geral, devido a esta característica, a lâmpada de vapor de sódio de alta pressão mantém sua resistência equivalente praticamente constante, mesmo quando ocorre uma variação na potência de operação.

Por outro lado, a tensão de arco da lâmpada aumenta lentamente durante sua vida útil, devido principalmente ao enegrecimento das extremidades do tubo de descarga pelo material arrancado dos eletrodos e pela mudança da pressão do gás. Este é um fator limitante para a vida útil da mesma e deve ser levado em consideração no projeto do reator.

C. Tensão de Ignição

Durante o processo de ignição da lâmpada de vapor de sódio de alta pressão, a descarga passa por uma seqüência de estágios. Em [5] é proposto um modelo simples, constituído de duas placas paralelas. A figura 1 mostra a característica de

tensão versus corrente do modelo para uma dada pressão do gás, na qual podem ser identificadas sete regiões distintas.

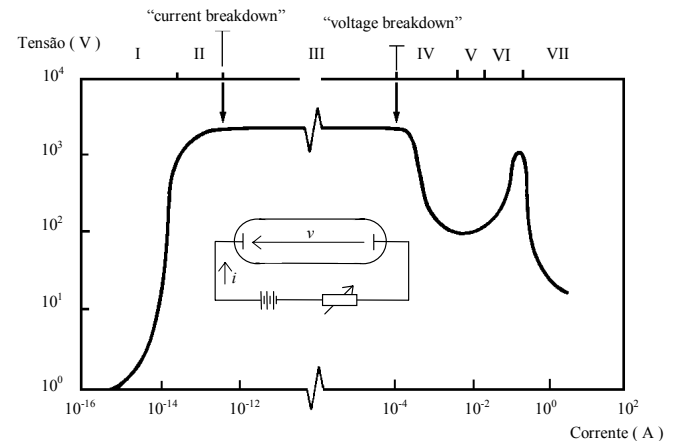


Fig. 1. Característica Elétrica da Descarga Entre Duas Placas Planas Paralelas [9].

A região de “Geiger” (I) é caracterizada por valores reduzidos de tensão entre os eletrodos e pela circulação de uma corrente residual e intermitente. Os elétrons primários são acelerados por um campo elétrico homogêneo em direção ao ânodo e ionizam os átomos do gás. O valor médio da corrente depende da taxa de elétrons primários gerados por unidade de tempo e da energia adquirida pelos mesmos.

Na região de “Townsend” (II), a corrente permanece intermitente, porém o seu valor médio aumenta sensivelmente para pequenos incrementos de tensão.

Quando a corrente alcança o seu valor de ruptura, a descarga deixa de ser intermitente (III), isto é, cada elétron primário consegue gerar pelo menos um novo elétron. Nesta região a tensão cresce lentamente com a corrente até se alcançar o ponto de ruptura por tensão (“voltage breakdown”). Nesta condição a derivada da tensão torna-se negativa e a diferença de potencial entre os eletrodos cai abruptamente, dando início a um tipo de descarga pré-luminescente denominado “subnormal glow discharge” (IV).

A descarga entra na fase de luminescência (V) quando a derivada da tensão em relação à corrente volta a se tornar positiva e a diferença de potencial entre os eletrodos se mantém praticamente constante. À medida que a corrente cresce, a tensão volta a subir significativamente e a descarga entra em uma fase denominada de “abnormal glow” (VI).

A maioria das lâmpadas de vapor de sódio utiliza xenônio como gás de ignição. Apesar da elevada tensão de ruptura, o xenônio possui baixa condutibilidade térmica e forma uma atmosfera protetora que reduz a sublimação do material dos eletrodos, resultando numa elevada eficácia luminosa e no aumento do tempo de vida útil da lâmpada.

Na prática, a ignição da lâmpada é realizada através de um pulso, cuja forma de onda de tensão pode ser aproximada por um retângulo e, através de resultados experimentais apresentados [3], se pode concluir que para pulsos com tempos de subida reduzidos a ignição da descarga pode ser realizada com tensões menores. A partir do que foi exposto até este ponto fica claro, que esta lâmpada necessita de um elevado valor de tensão para obtenção da ignição.

II. INTRODUÇÃO

Como acontece na maioria dos reatores eletrônicos, para que se possa fornecer energia de maneira controlada para a lâmpada, a tensão contínua proveniente de um retificador deve ser invertida em alta frequência, e aplicada à lâmpada através de algum tipo de elemento “ballast”.

O elemento “ballast” é utilizado também como filtro, transformando a forma de onda de tensão quadrada em uma tensão mais próxima de uma senóide. Nos estudos realizados deu-se especial atenção ao filtro LC série.

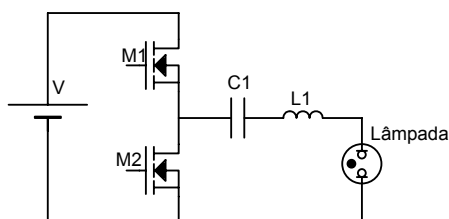


Fig. 2. Inversor com “ballast” Indutivo.

Esta estrutura deve operar com frequência de comutação superior à frequência natural de oscilação do par L1 C1 para garantir comutação ZVS nos interruptores. Entretanto, a fim de diminuir o fator de crista da corrente na lâmpada e a energia reativa circulante, deve-se utilizar valores de L1 e C1 de tal forma que a frequência de ressonância destes componentes esteja próxima da frequência de comutação.

III. ESTUDO DE CIRCUITOS IGNITORES

Pode-se encontrar na literatura uma série de diferentes circuitos utilizados como ignitores, mas a maioria deles utiliza circuitos ressonantes [10 – 12] ou que apliquem pulsos de tensão em um transformador ou autotransformador [13 – 15] com relação de transformação adequada. Através dos dados encontrados na literatura, foi possível implementar alguns destes circuitos ignitores.

A. Circuito Utilizando Capacitor Auxiliar

A primeira técnica de ignição analisada utiliza um capacitor auxiliar associado a um pequeno número de espiras do enrolamento do indutor “ballast”, para gerar a sobretensão desejada. O circuito de potência incluindo o ignitor é mostrado separadamente na figura 3.

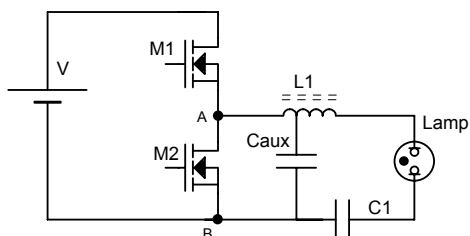


Fig. 3. Ignitor Com Capacitor Auxiliar.

O princípio de funcionamento do ignitor pode ser assim sumariado: enquanto a lâmpada não estiver em funcionamento, sua alta impedância faz com que haja circulação de corrente apenas entre o capacitor Caux e o primeiro trecho do enrolamento do indutor “ballast”. A tensão aplicada a este trecho do indutor oscila de acordo com

a frequência de ressonância dada pelos valores de indutância e capacitância envolvidos, induzindo no restante do enrolamento uma alta tensão suficiente para permitir a ignição da lâmpada. Após a ignição, a circulação de corrente em todo o enrolamento do indutor faz com que o nível da corrente que circula através de Caux seja suficientemente pequeno de modo que sua influência na tensão da lâmpada seja praticamente eliminada.

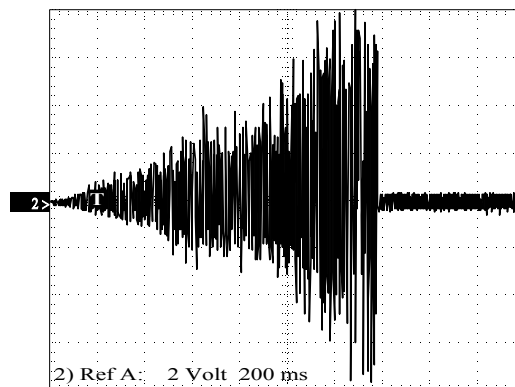


Fig. 4. Transitório de Ignição Utilizando Capacitor Auxiliar (2kV/div).

A partir destes resultados, foi implementado um protótipo em laboratório, cujos resultados de ensaios são apresentados na figura 4, onde se observa a tensão aplicada na lâmpada durante o transitório de ignição. Com tal estrutura obteve-se a ignição rápida da lâmpada, mesmo quando esta ainda encontrava-se quente, sendo necessário um pequeno intervalo de resfriamento.

B. Circuito Utilizando Pulso de Tensão Por “Spark Gap”

A segunda técnica explorada, aqui chamada de pulso de tensão, é baseada na rápida aplicação de um alto nível de tensão com a ajuda de um circuito que utiliza um transformador ou autotransformador.

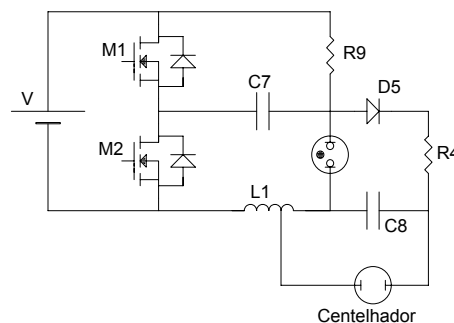


Fig. 5. Circuito Utilizando “Spark Gap”.

A figura 6 apresenta as formas de onda do transitório de partida da lâmpada; onde o canal Ch1 mostra a tensão no capacitor C8 e o canal Ch2 mostra a tensão aplicada à lâmpada; que serão utilizadas para descrever o funcionamento do circuito. Quando o inversor é alimentado, a impedância da lâmpada é alta, o que faz com que toda a tensão aplicada pelo inversor apareça sobre a mesma. Tal tensão carrega o capacitor C8 via D5 e R4. Quando a tensão no capacitor C8 atinge a tensão de ruptura do centelhador (“spark gap”), o mesmo entra em condução, aplicando tal

tensão sobre um pequeno número de espiras do indutor “ballast” L1 que, devido à relação de transformação, induz uma alta tensão no restante do enrolamento, gerando a sobretensão necessária para a ignição. Caso a lâmpada não entre em funcionamento, C8 volta a se carregar e o processo se repete indefinidamente até que se obtenha a ignição da lâmpada ou o sistema seja desligado. Uma vez estabelecido o arco, a tensão sobre a lâmpada é inferior à tensão de ruptura do centelhador, o que inibe naturalmente a aplicação de novos pulsos de tensão.

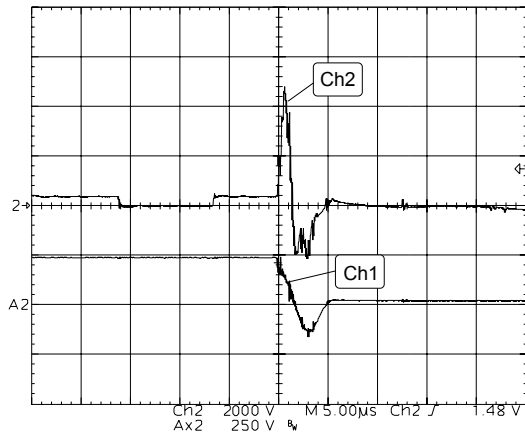


Fig. 6. Transítório de Ignição Utilizando “Spark Gap”.

C. Circuito Utilizando Pulso de Tensão Por SIDAC

Uma segunda opção para a técnica de ignição por pulsos de tensão é apresentada na figura 7. Esta estrutura de ignição é baseada num componente chamado SIDAC.

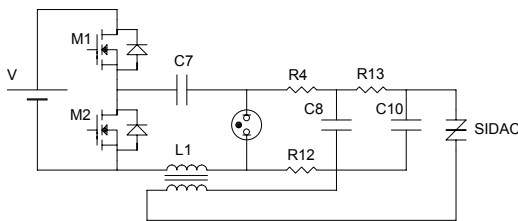


Fig. 7. Circuito Utilizando SIDAC.

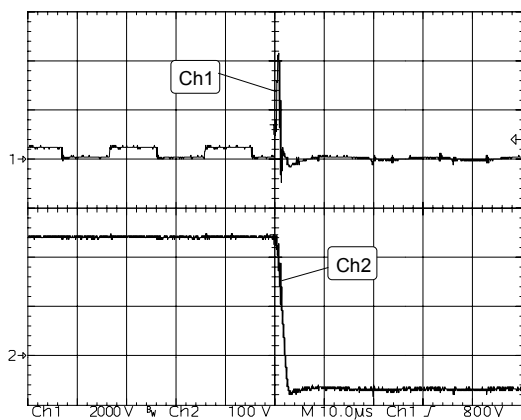


Fig. 8. Transítório de Ignição Utilizando SIDAC.

O princípio de funcionamento do circuito com SIDAC é o mesmo do circuito com centelhador. Utiliza a energia armazenada nas placas de C10 para gerar uma sobretensão

nos enrolamentos do indutor “ballast”. As formas de onda, relativas ao transítório de ignição do circuito, utilizando SIDAC são apresentadas na figura 8.

D. Circuito Utilizando Ressonância

O circuito de ignição baseado no fenômeno da ressonância utiliza o filtro LCC tradicionalmente encontrado nos reatores eletrônico destinados às lâmpadas fluorescentes ou um filtro LLC. Na figura 9 pode-se observar o diagrama esquemático do circuito de potência simplificado de um inversor utilizando o filtro LCC.

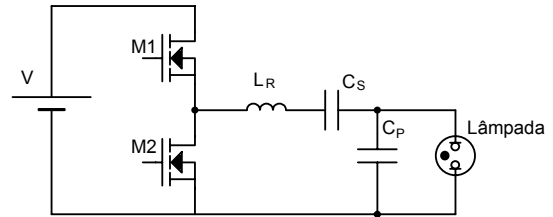


Fig. 9. Circuito Utilizando Ressonância.

O filtro LCC pode ser utilizado como ignitor porque, ao contrário do filtro LC, pode fornecer em seus terminais de saída uma tensão muito maior que a aplicada em seus terminais de entrada, ou seja, pode desempenhar três funções, filtrar e limitar a corrente circulante, além de propiciar o nível de tensão necessário à ignição da lâmpada.

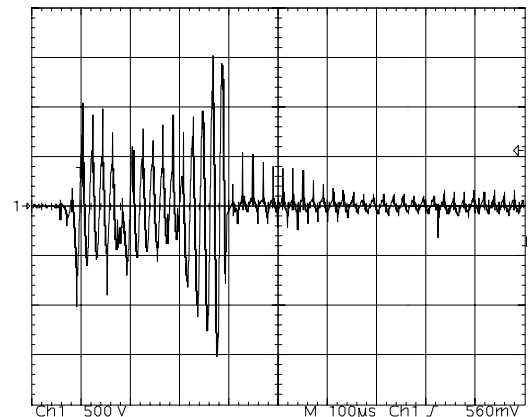


Fig. 10. Transítório de Ignição Utilizando Ressonância.

Vale lembrar, porém, que os esforços de corrente nos transistores durante a ignição são bastante grandes, quando comparados com aqueles que ocorrem nos circuitos anteriormente estudados.

IV. ANÁLISE PRÁTICA DA RESSONÂNCIA ACÚSTICA

A fim de se comprovar a existência do fenômeno da ressonância acústica e obter dados sobre as variações impostas à lâmpada quando da ocorrência da mesma, optou-se pela operação da lâmpada em algumas das frequência críticas indicadas na tabela I. Como as frequências de potência relacionadas com a excitação das ressonâncias no modo longitudinal estavam na faixa de 3,0kHz a 3,8kHz, optou-se por não observá-las.

A faixa de frequência de potência que excita as ressonâncias no modo azimutal é compreendida entre 36,6kHz e 46kHz. Com a ajuda de um inversor com

frequência ajustável, foi possível varrer toda a faixa de frequências de comutação de 18kHz a 24kHz. Nesta faixa de frequências as ressonâncias mais pronunciadas, tanto para lâmpadas fabricadas pela OSRAM como para lâmpadas fabricadas pela Philips, situa-se entre 20kHz e 21kHz. Na figura 11 apresenta-se uma das fotos obtidas com a lâmpada OSRAM NAVT E40 de 400W alimentada com corrente em 20,6kHz.



Fig. 11. Foto da Ressonância Em Lâmpada OSRAM - 20,6kHz.

O efeito visual causado pela ressonância acústica seria certamente desagradável para um eventual usuário de uma via iluminada por uma lâmpada nestas condições, pois ocorrem sensíveis oscilações no nível de iluminamento.

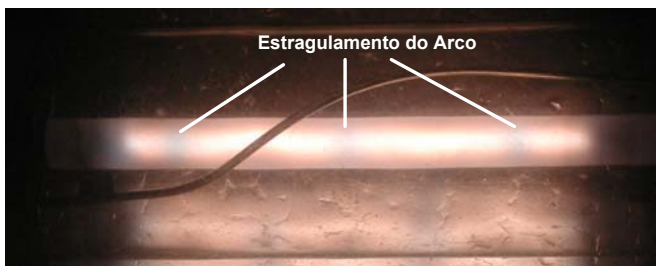


Fig. 12. Foto da Ressonância Em Lâmpada OSRAM - 20,4kHz.

Na figura 12 apresenta-se uma segunda fotografia da lâmpada operando com corrente em 20,4kHz, onde é possível observar que ocorrem “estrangulamentos” do arco.



Fig. 13. Foto da Ressonância Em Lâmpada OSRAM - 40,1kHz.

A faixa de frequência básica para a ocorrência das ressonâncias do tipo radial, situada na faixa de frequência de potência entre 83kHz e 87kHz, também foi explorada, porém não apresentou efeitos visuais tão significativos (Fig. 13) como aqueles encontrados anteriormente.

Tais resultados foram utilizados para nortear a escolha de uma frequência de comutação considerada crítica para testar técnicas capazes de evitar a ocorrência da ressonância.

V. TÉCNICAS PARA EVITAR A RESSONÂNCIA ACÚSTICA

A partir deste item serão apresentadas técnicas que permitem a operação de lâmpadas de vapor de sódio de alta

pressão em alta frequência, sem que se excite o surgimento de ressonâncias. Todos os estudos foram realizados utilizando 20,6kHz como frequência principal de comutação.

A. Variação de Frequência [1]

Usando um microcontrolador foi possível variar a frequência da corrente da lâmpada ciclicamente. Para analisar o comportamento da lâmpada quando da aplicação desta técnica, foram utilizados diferentes números de passos de frequência e números de períodos entre cada passo. Esta técnica é considerada interessante porque promove o espalhamento do espectro de potência, fazendo com que a lâmpada seja operada com densidade de potência das harmônicas individuais minimizada. Devido à resolução do microcontrolador utilizado, cada passo corresponde a uma mudança de 300Hz na frequência de comutação. O número de passos testado variou entre 2 e 15 e o número de períodos entre cada mudança de frequência variou entre 2 e 5.

Para entender o funcionamento do programa desenvolvido, pode-se tomar como exemplo o caso da operação 2/5 (dois passos a cada 5 períodos). Nessa situação o inversor inicia operando com frequência de comutação de 20,6kHz durante cinco períodos da alta frequência, quando então comuta para 20,9kHz. Depois de mais cinco períodos a frequência comuta para 21,2kHz (frequência máxima). A cada novos cinco períodos consecutivos a frequência muda para 20,9kHz; 20,6kHz; 20,3kHz e 20,0kHz, que é a mínima frequência de comutação. Uma vez atingido este valor mínimo, a frequência começa subir novamente e fica variando entre 20kHz e 21,2kHz.

Para comprovar a eficiência da modulação estudada, o software desenvolvido permite que se opere a lâmpada sem modulação especial, ou seja, razão cíclica e frequência fixas, ou com a modulação com variação de frequência (MVF) através de uma chave conectada ao microcontrolador.

Em todos os teste da modulação MVF a frequência central de comutação foi 20,6kHz e, em todas as quatro lâmpadas, a ressonância foi extinta sempre que a MVF foi aplicada, voltando a ocorrer quando as lâmpadas passavam a ser novamente alimentadas com a modulação tradicional.

B. Modulação por Mudança de Fase

Esta técnica é baseada na idéia de que uma variação constante na fase da corrente da lâmpada perturba a excitação da ressonância acústica, pois também promove o espalhamento do espectro de potência. Tal técnica foi inicialmente proposta em [16] como uma forma de evitar a ocorrência da ressonância acústica em lâmpadas com tubos de descarga relativamente pequenos, como os das lâmpadas de vapor metálico, usando um ângulo de inversão de 90°.

No estudo aqui apresentado foram testadas diversas configurações em que o número de períodos entre cada inversão de fase variou entre cinco e vinte. Além disso, dois diferentes ângulos de inversão foram utilizados: 180° e 90°.

Os resultados obtidos mostraram que o número de períodos entre cada inversão de fase não afetou o desempenho da técnica. Por outro lado, o ângulo de 90°, inicialmente proposto para lâmpadas com pequenos tubos de descarga não se mostrou tão eficiente com as lâmpadas de vapor de sódio de 400W.

Assim como ocorreu no caso do protótipo MVF, o software desenvolvido permite que se escolha a operação do inversor com modulação tradicional ou com modulação por mudança de fase (MMF) através de uma chave conectada a um dos pinos do microcontrolador. Com o inversor operando com a modulação tradicional, todas as lâmpadas ensaiadas apresentaram ressonâncias violentas, que eram totalmente eliminadas quando a MMF de 180° era aplicada.

A figura 14 mostra a tensão de gate aplicada aos transistores do inversor, a fim de se obter a inversão de 180° na corrente da lâmpada.

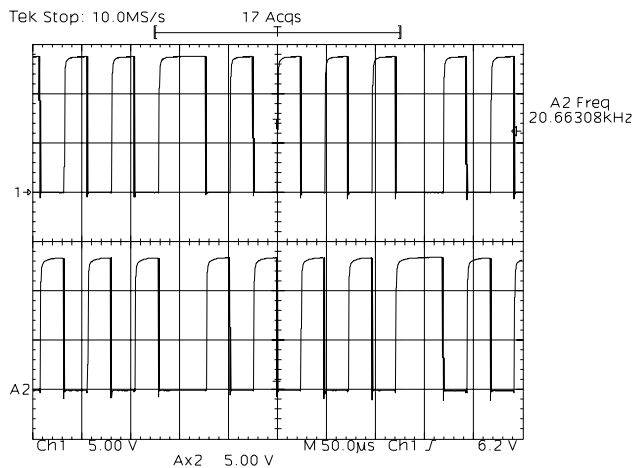


Fig. 14 Tensões de Gate dos Transistores do Inversor.

Já a figura 15 apresenta a tensão de gate em um dos transistores e a corrente na lâmpada, onde se pode observar a inversão de fase da mesma.

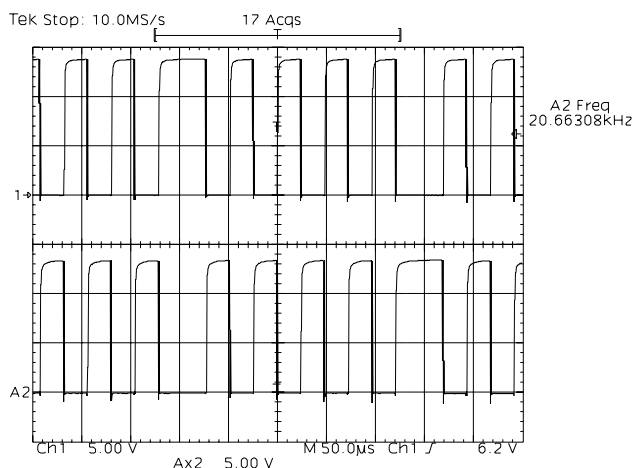


Fig. 15 Tensão de Gate e Corrente na Lâmpada.

Embora a inversão de 90° não tenha eliminado totalmente a ressonância acústica em todas as amostras de lâmpadas testadas, é importante observar que, mesmo naquela em que a ressonância persistiu, houve uma redução bastante significativa na curvatura do arco.

Outro aspecto importante a ser considerado é que com aplicação das modulações especiais, com a frequência central de 20,6kHz, um ruído audível é gerado. Entretanto, tal ruído pode ser eliminado com a elevação da frequência central de comutação.

C. Controle em Tempo Real Utilizando Microcontrolador

A terceira técnica testada foi classificada como solução de tempo real e consiste na utilização de um microcontrolador que analisa a tensão e a corrente da lâmpada a fim de alterar o ponto de operação do inversor caso a ressonância seja detectada. O programa pode ser explicado com a ajuda do fluxograma da figura 16:

- **Inicialização do Sistema:** quando o reator é energizado, o microcontrolador mantém o sistema de potência (inversor e ignitor) desabilitado por 15 segundos. O inversor inicia um funcionamento com uma frequência inferior a nominal a fim de facilitar a ignição e diminuir o tempo de aquecimento da lâmpada.

- **Teste de Ignição:** o microcontrolador mantém o sistema habilitado por 60 segundos. Se após este tempo a lâmpada não entrar em funcionamento, o sistema é desabilitado por 60 segundos. Este processo é repetido cinco vezes. Se ao término da quinta tentativa a lâmpada não entrar em funcionamento, o sistema é definitivamente desativado.

- **Rotina de Controle de Corrente:** como o sistema é inicializado com uma frequência inferior à nominal, é necessário que se controle a corrente dentro de certos limites através da frequência de comutação do inversor. Uma vez atingido o valor correto da corrente na lâmpada, o programa segue para a próxima rotina.

- **Rotina de Controle de Potência:** Com sinais provenientes de sensores de corrente o microcontrolador age sobre a frequência de comutação até estabilizar a potência na lâmpada em torno de 400W. Uma vez atingida a potência nominal, o microcontrolador segue para a próxima rotina.

- **Rotina de Controle da Ressonância Acústica:** depois de atingida a potência nominal, os sinais dos sensores de corrente e de tensão são utilizados para calcular a impedância da lâmpada. Este valor é utilizado, através de algumas comparações, para detectar a ocorrência da ressonância. Se a ressonância for detectada, a frequência de comutação do inversor é alterada em ambas as direções ($\pm 5\text{kHz}$), a fim de encontrar uma região livre de ressonância. Enquanto a impedância da lâmpada não retorna ao seu valor correto, a frequência do inversor permanece variando. A cada 60 segundos o programa volta para a rotina de controle de potência para fazer os ajustes necessários.

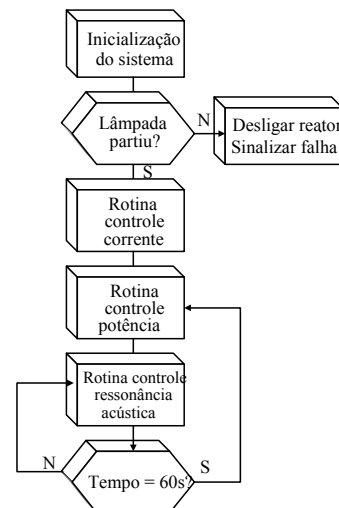


Fig. 16 Fluxograma Simplificado do Software Desenvolvido.

Resultados obtidos com esta técnica mostraram que, devido às características do microcontrolador utilizado, somente ressonância em que ocorre o estrangulamento do arco são efetivamente detectadas, o que comprometeu o desempenho do sistema. Isto acontece porque somente nesses casos a variação nos parâmetro elétricos da lâmpada são suficientemente grandes para sensibilizar o circuito implementado. A figura 17 mostra uma foto do protótipo implementado.



Fig. 17 Foto do Protótipo.

A figura 18 mostra o envelope de corrente na lâmpada durante a ocorrência de ressonância com estrangulamento do arco. A ondulação de 120Hz, natural deste tipo de forma de onda, não é nítida nesta aquisição, confirmando os dados de que a frequência de ressonância situa-se entre 5Hz e 10Hz.

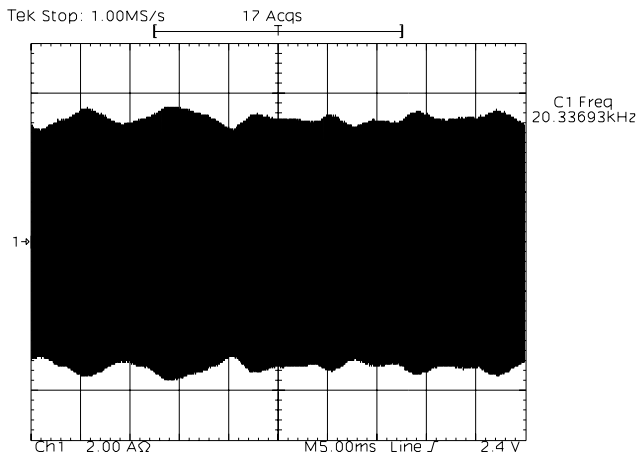


Fig. 18 Corrente na Lâmpada Durante Ocorrência da Ressonância.

Uma alternativa ao protótipo desenvolvido, utilizando esta técnica é proposta em [17].

D. Operação em Baixa Frequência

A última técnica estudada para alimentar a lâmpada de vapor de sódio a partir de um reator eletrônico sem que se excite o fenômeno da ressonância acústica é a aplicação de uma forma de onda de corrente quadrada de baixa frequência. Neste caso a potência entregue à lâmpada deixa de ser pulsada, como ocorre no caso da aplicação de uma corrente alternada, e passa a ser praticamente constante. Além disso, com a corrente em baixa frequência, a

ressonância acústica não é excitada [18].

A estrutura utilizada nos ensaios é mostrada abaixo e tem como principal vantagem a possibilidade de modular a corrente em alta frequência, permitindo a redução dos componentes reativos apesar de fornecer uma corrente de baixa frequência para a lâmpada.

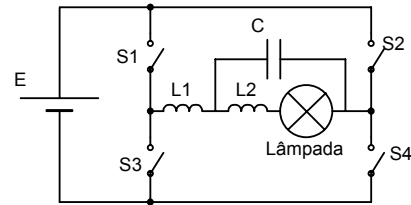


Fig. 19 Inversor Baixa Frequência.

Na figura 20 apresenta-se a modulação aplicada aos transistores da estrutura em baixa frequência. A fim de obter uma modulação dois níveis na carga, os transistores superiores da cada braço do inversor são comutados em alta frequência, enquanto os transistores inferiores são comutados em baixa frequência.

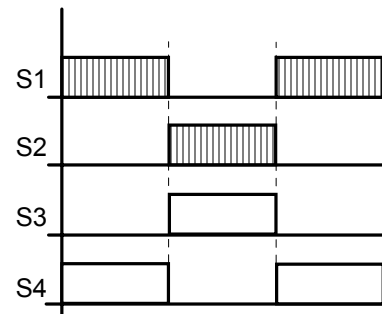


Fig. 20 Modulação Para o Reator Baixa Frequência.

Na figura 21 é apresentada a corrente em regime na lâmpada com a modulação proposta. Como se pode observar, devido ao filtro utilizado, a transição entre cada semiciclo da corrente não é instantânea, como seria desejável. Isto faz com que a potência na lâmpada não seja de fato constante durante todo o tempo, resultando no aparecimento de uma ondulação na potência. Entretanto, tal ondulação não causou o aparecimento da ressonância acústica, já que apresentava baixa frequência.

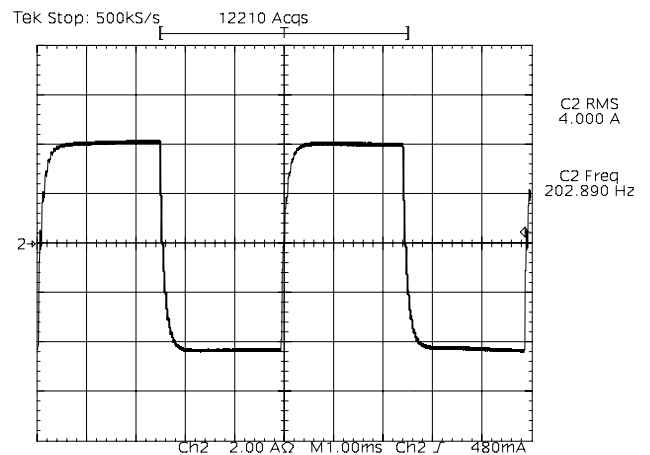


Fig. 21 Corrente na Lâmpada.

VI. CONCLUSÕES

Foram apresentados diversos dados a respeito da lâmpada de vapor de sódio e sua operação com reatores eletrônicos. Este estudo descreveu o fenômeno conhecido como ressonância acústica, seus modos de excitação e possíveis conseqüências. A partir dos dados relacionados com as formas de excitação da ressonância acústica, foram estudados circuitos que se propõem a impedir a sua manifestação mesmo quando a lâmpada é alimentada por um circuito eletrônico em alta frequência.

As duas primeiras técnicas estudadas são baseadas em modulações especiais que promovem o espalhamento espectral da potência entregue à lâmpada, enquanto a terceira uso como princípio a detecção da ocorrência da ressonância através dos parâmetros elétricos da lâmpada. Nos circuitos com modulação especial obteve-se êxito na extinção da ressonância acústica em todas as frequências testadas. Já a técnica de controle através do cálculo da impedância não se mostrou tão eficiente quando a frequência central de comutação estava situada em uma região de fortes ressonâncias como em torno dos 20kHz.

Finalmente, a técnica de operação com uma forma de onda quadrada de baixa frequência também se mostrou interessante por não representar risco potencial para excitação da ressonância acústica, embora o circuito demande componentes magnéticos maiores que aqueles utilizados nas três primeiras abordagens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Coato, J. R. Marsden, A. M.. *Lamps and Lighting*. Arnold and Contributors, 4ª Edição, 1997. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 26, nº. 4, pp. 832-840, July/August 1990.
- [2] André, A. S. *Sistema Eletrônico Para Lâmpadas de Descarga de Alta Pressão Para Iluminação de Exteriores*. Exame de qualificação – UFSC, 2001.
- [3] Ingellas, P. Dolan, R. Plumb, J. Zhu, H. Wyner, E. “A Noncycling High Pressure Sodium Lamp”, *Journal of the Illuminating Engineering Society – Summer 1995*. pp. 19-25.
- [4] Kaiser, W. *Alimentação Pulsada de Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão*. Tese (livre docência), USP, São Paulo - 2002.
- [5] Groot, J. J.; Vliet, J.A. J. M. *The High-Pressure Sodium Lamp*. Philips Technical Library, 1986.
- [6] Stormberg, H. P.; Schafer, R. *Excitation of acoustic instabilities in discharge lamps with pulsed supply voltage*. *Lighting & Research Technology*, vol 15, nº 3, 1983.
- [7] Denneman, J. W. *Acoustic resonances in high frequency operated low wattage metal halide lamps*. *Phillips Journal of research*, vol. 38, pp:263-272 – 1983.
- [8] Witting, H. L. *Acoustic resonances in cylindrical high-pressure arc discharges*. *Philips Journal of Research*, 1978. pp. 2680 – 2683.
- [9] Correa, F. A. *Estudo de ignitores de pulsos superpostos para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão*. Dissertação de mestrado submetida à Escola Politécnica de USP – São Paulo, 2000.
- [10] Zhou, J. *A novel method for testing acoustic resonance of HID lamps*. *APEC’99* pp: 480 – 485.
- [11] Alonso, J. M.; Ferrero, J. M. e outros. *A unity power factor electronic ballast for HPS lamps, resonant current controlled*. *IECON’98* pp: 2054 – 2061.
- [12] Gulko, M.; Medini, D.; Ben-Yaakov, S. *Inductor-controlled current-sourcing resonant inverter and its applications as a high pressure discharge lamp driver*. *IEEE – 94*, pp: 434-440.
- [13] Ben-Yaakov, S.; Gulko, M.; Medini, D. *Design and performance of an electronic ballast for high-pressure sodium (HPS) lamp*. *IEEE Transaction on Industrial electronics*, vol 44, 1997 pp: 486 – 491.
- [14] Redl, R.; Paul, J. D. *A new high-frequency and high-efficiency electronic ballast for HID lamps: topology, analysis, design and experimental results*. *APEC’99* pp: 486 – 492.
- [15] Application Notes AN-995A. *Electronic ballasts using the cost-saving IR215x drivers*. International Rectifier.
- [16] Ganser, H. G. and Kersten, R., Schäfer, R. and Stormberg, H. P., *Method of operating a high-pressure metal vapor discharge lamp and circuit arrangement for carrying out this method*. U.S. Patent number 4,705,991, November 1987.
- [17] Caldeira, P., Bourdillon, L., Holtslag, A. H. and Qian, J., “Controller for a gas discharge lamp with variable inverter frequency and with lamp power and bus voltage control”. U.S. Patent number 5,623,187, 1997
- [18] Shen, M; Qian, Z; Peng, F. Z.; *A novel two stage acoustic resonance free electronic ballast for HID lamps*. *IEEE Industry Applications Society Meeting 2002* pp: 1869 - 1874.

DADOS BIOGRÁFICOS

Anderson Soares André, nascido em 04/02/1972 em Tubarão é engenheiro eletricista (1995) pela Universidade Regional de Blumenau, mestre (1997) pela Universidade Federal de Santa Catarina, onde está cursando doutorado em engenharia elétrica. Atualmente é professor da Universidade do Sul de Santa Catarina e do SENAI/CTAI. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, reatores eletrônicos, qualidade do processamento da energia elétrica, sistemas de controle eletrônicos e microcontroladores.

Arnaldo José Perin, nascido em Nova Prata-RS em 18/12/53. Formado em Engenharia Eletrônica em 1977 na PUC-RS, Mestrado em Engenharia Elétrica em 1980 na UFSC e Doutorado em Eng. Elétrica em 1984 no Institut National Polytechnique - Toulouse - França. Desde 1980 é Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina com o cargo de Professor Titular. Atua junto ao grupo de pesquisadores do INEP – Instituto de Eletrônica de Potência, onde já participou em projetos em conjunto com a indústria, orientou 27 dissertações de Mestrado e duas teses de doutorado e publicou em torno de 70 trabalhos em congressos no país e no exterior e é co-autor de um livro. Sua área de atuação é Eletrônica de Potência com interesse em conversores estáticos de frequência e técnicas de modulação em corrente alternada.