

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**REATOR ELETRÔNICO PARA LÂMPADA FLUORESCENTE COMPACTA
E SUA INFLUÊNCIA NA QUALIDADE DE ENERGIA**

Área de Iluminação

por

Felipe de Farias Nunes

Marcos Rosa dos Santos, Mestre
Orientador

Itatiba (SP), novembro de 2011

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**REATOR ELETRÔNICO PARA LÂMPADA FLUORESCENTE COMPACTA
E SUA INFLUÊNCIA NA QUALIDADE DE ENERGIA**

Área de Iluminação

por

Felipe de Farias Nunes

Relatório apresentado à Banca Examinadora do
Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia
Elétrica para análise e aprovação.
Orientador: Marcos Rosa dos Santos, Mestre

Itatiba (SP), novembro de 2011

*Este trabalho é dedicado a Deus, aos meus pais e irmãs,
aos meus familiares e amigos e à minha esposa, Daiane.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me abençoado com este curso de graduação e por ter me dado saúde e coragem para chegar até o fim.

De forma especial, agradeço aos meus pais, Pedro e Luzia que desde minha infância me incentivaram a estudar e me instruíram.

Aos meus amigos Ruy Sadao Yamamura e Roberval Machado dos Reis, os quais juntamente com meu pai me ensinaram a ser um bom profissional, não apenas no que tange a parte técnica, mas principalmente no caráter.

A todos aqueles que de alguma forma, seja direta ou indiretamente, me motivaram e contribuíram ao longo desses anos, principalmente a minha esposa Daiane Cristina Cahin Nunes, que me “aturou” com muita paciência no decorrer desses anos, aos amigos Eidy e Cherri, Lukãos, André, Samuca, Célio (Bonito), Flávia, Regagnin (Flávinho), Markinhos, Alciiiiindo (Xunior), Flavinha (instrutora) e Dani Souza.

E ao meu orientador Marcos Rosa dos Santos, que me instruiu com este trabalho.

*“Não para, não para, não para vai pra cima timão”
É nós mano, aqui é Curintia.*

*"Mas, buscai primeiro o Reino de Deus, e a sua justiça, e
todas essas coisas vos serão acrescentada" (Mt. 6,33).*

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE EQUAÇÕES	12
RESUMO	13
ABSTRACT.....	14
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. IMPACTOS	17
1.2. OBJETIVOS	18
2. ABORDAGEM GERAL SOBRE REATORES.....	19
2.1. DEFINIÇÃO	19
2.2. FUNÇÕES DO REATOR	19
2.3. TIPOS DE REATORES	19
2.3.1. Reatores Eletromagnéticos	20
2.3.2. Reatores Eletrônicos	22
2.4. FATOR DE POTÊNCIA.....	25
2.5. THD.....	32
2.6. REATORES DE BAIXO FATOR DE POTÊNCIA	34
2.7. REATORES DE ALTO FATOR DE POTÊNCIA	36
2.8. FUNCIONAMENTO BÁSICO DE UM REATOR ELETRÔNICO	38
2.9. REATOR ELETRÔNICO PARA LÂMPADA FLUORESCENTE COMPACTA.....	42
3. EFEITO DAS LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS NA QUALIDADE DE ENERGIA.....	44
4. METODOLOGIA	46
4.1. APRESENTAÇÃO DO LABORATÓRIO E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	46
4.2. AQUISIÇÃO DAS AMOSTRAS	47
4.3. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS AMOSTRAS	49
4.4. EXPERIMENTO	51
5. RESULTADOS.....	53
6. CONCLUSÃO	60
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
ANEXO 1 – FLICKER.....	64
ANEXO 2 – REATÂNCIA CAPACITIVA.....	66

ANEXO 3 – REATÂNCIA INDUTIVA	67
---	-----------

LISTA DE ABREVIATURAS

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
USF	Universidade São Francisco
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica de Iluminação
ABILUX	Associação Brasileira da Indústria de Iluminação
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
LFC	Lâmpada Fluorescente Compacta
THD	Distorção Harmônica Total
FP	Fator de Potência
CA	Corrente Alternada

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Lâmpada Incandescente Fonte: http://alessandroazuos.blogspot.com/2011/01/lampadas-incandescentes-tem-dias.html	16
Figura 2. Lâmpada Fluorescente Compacta	16
Figura 3. Esquema de ligação - Reator Convencional para uma lâmpada fluorescente tubular Fonte: Demape – Manual do Reator, disponível no site http://www.demape.com.br/pdf/manual_reator.pdf	20
Figura 4. Esquema de ligação - Reator Convencional para uma lâmpada fluorescente tubular Fonte: http://www.demape.com.br/pdf/manual_reator.pdf	21
Figura 5. Forma de onda de um reator eletromagnético Fonte: http://www.demape.com.br/pdf/manual_reator.pdf	21
Figura 6. Reatores Eletrônicos Fonte: http://www.cmd.com.br/ , http://www.forceline.com.br/novosite/ , http://www.osram.com.br/osram_br/	22
Figura 7. Ondas de tensão (V) e corrente (I) em fase. A carga possui característica resistiva (se senoidal perfeita, $FP=1$). Ângulo de fase $\phi=0^\circ$ Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Fator_de_pot%C3%A2ncia	25
Figura 8. Triângulo retângulo que representa a relação entre as potências aparente (S), ativa (P) e reativa (Q) Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Fator_de_pot%C3%A2ncia	26
Figura 9. Onda de corrente (I) atrasada em relação à onda de tensão (V). A carga possui característica indutiva. $FP<1$ (atrasado) Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Fator_de_pot%C3%A2ncia	27
Figura 10. Onda de corrente (I) adiantada em relação à onda de tensão (V). A carga possui característica capacitiva. $FP<1$ (adiantado) Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Fator_de_pot%C3%A2ncia	27
Figura 11. (a) Conteúdo harmônico da tensão e corrente; (b) Formas de onda em um reator eletrônico de baixo fator de potência e alto THD.....	35
Figura 12. (a) Conteúdo harmônico da tensão e corrente; (b) Formas de onda em um reator eletrônico de baixo fator de potência e alto THD.....	37
Figura 13. Circuito Ilustrativo de um reator eletrônico Bivolt (127/220V)	38
Figura 14. Reator Eletrônico para LFC Fonte: http://zeueletronica.blogspot.com/2011/05/esquema-de-lampada-fluorescente.html	42
Figura 15. Reator Eletrônico para LFC Fonte: http://acquaticos.blogspot.com/2010/06/lampada-fluorescente-compacta.html	42
Figura 16. Reator Eletrônico para LFC Fonte: http://adrenaline.uol.com.br/forum/papo-cabeca/326827-lampadas-de-led-acabarao-com-o.html	43
Figura 17. Bancada de desenvolvimento de reatores do laboratório da empresa Orion Lighting	47
Figura 18. Power Analyser 2551 - Xitron Technologies.....	47
Figura 19. LFC 25W – 127V, fabricante G-Light	48
Figura 20. LFC 25W – 220V, fabricante FLC.....	48
Figura 21. Medições realizada com a amostra de 25W – 127V	49
Figura 22. Medições realizada com a amostra de 25W – 220V	50
Figura 23. Esquema - Filtro passa-baixa, modelo π	52
Figura 24. (a) Circuito da amostra de 25W – 127V, (b) Esquema elétrica da fonte de alimentação.....	53
Figura 25. Esquema elétrico da fonte de alimentação com aplicação do filtro passa- baixa.	54
Figura 26. Adaptação do filtro passa-baixa no reator	54
Figura 27. (a) Características elétricas gerais, (b) Formas de onda – Tensão e Corrente, (c) Espectro harmônico de corrente	55

Figura 28. (a) Circuito da amostra de 25W – 220V, (b) Esquema elétrica da fonte de alimentação.	56
Figura 29. Esquema elétrico da fonte de alimentação com aplicação do filtro passa- baixa.	57
Figura 30. Adaptação do filtro passa-baixa no reator	57
Figura 31. (a) Características elétricas gerais, (b) Formas de onda – Tensão e Corrente, (c) Espectro harmônico de corrente	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparativo das Características Elétricas das Amostras de 25W – 127V	49
Tabela 2. Comparativo das Características Elétricas das Amostras de 25W – 220V	50
Tabela 3. Apresentação das melhorias nas características FP e THD com a aplicação do filtro.....	55
Tabela 4. Apresentação das melhorias nas características FP e THD com a aplicação do filtro.....	58

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	26
Equação 2	26
Equação 3	26
Equação 4	33
Equação 5	33
Equação 6	39
Equação 7	39
Equação 8	66
Equação 9	67

RESUMO

NUNES, Felipe. **Reator eletrônico para lâmpada fluorescente compacta e sua influência na qualidade de energia.** Itatiba, 2011. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade São Francisco, Itatiba, 2011.

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre a substituição das tradicionais lâmpadas incandescentes pelas lâmpadas fluorescentes compactas, onde inicialmente evidenciam-se as vantagens e a superioridade das mesmas, tendo como principais vantagens a eficiência elevada, tempo mais longo da vida útil da lâmpada e característica econômica do sistema de iluminação, no entanto, quando observamos os efeitos causados pelas lâmpadas fluorescentes compactas sobre a qualidade da energia, no que tange a injeção de harmônicos no sistema elétrico, o surgimento das distorções indesejadas na rede e queda do fator de potência, verificamos que existem sérias desvantagens, as quais precisam ser levadas em consideração. Todavia, para que as lâmpadas fluorescentes compactas funcionem, é necessário e indispensável o uso de um equipamento, denominado “reator eletrônico”, e para que as vantagens acima mencionadas sejam válidas, se faz necessário a utilização de reatores eletrônicos de “alto fator de potência”, uma vez que os reatores de alto fator de potência possuem filtros que eliminam os efeitos indesejados citados acima.

Palavras-chave: Lâmpada Incandescente. Lâmpada Fluorescente Compacta. Reator eletrônico. Qualidade de energia. Fator de Potência. Baixo Fator de Potência. Alto Fator de Potência. Distorção Harmônica Total. Filtro.

ABSTRACT

This paper presents a study on the replacement of traditional incandescent lamps for compact fluorescents lamps, which initially shows the advantages and superiority of the same, the main advantages to high efficiency, longer life lamp and character economical lighting system, however, when we observe the effects caused by compact fluorescents lamps on power quality, regarding the injection of harmonics in the electrical system, the appearance of unwanted distortions in the network and the fall of the power factor, we find that there are serious disadvantages, which must be taken into consideration. However, for compact fluorescent lamps work is necessary and indispensable to use an equipment called "electronic ballast," and that the advantages mentioned above are valid, it is necessary the use of electronic ballasts "high power factor", because the ballasts of high power factor have filters that eliminate the unwanted effects mentioned above.

Keywords: *Incandescent Lamp. Compact Fluorescent Lamp. Electronic Ballast. Power Quality. Power Factor. Low Power Factor. High Power Factor. Total Harmonic Distortion. Filter.*

1. INTRODUÇÃO

Em recente decreto do Governo Federal, as tradicionais lâmpadas incandescentes deverão ser substituídas por modelos mais econômicos no mercado nacional, até 30 de Junho de 2016, conforme portaria interministerial (MME/MCT/MDIC no 1.007/2010 de 31 de Dezembro de 2010) de Minas e Energia, da Ciência e Tecnologia e do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, publicada no Diário Oficial da União.

Segundo artigo originalmente publicado na revista Alemã “ep – Elektro Praktiker (2009) a medida segue uma tendência de países mais desenvolvidos. Por exemplo, a Comissão Europeia quer tornar as especificações cada vez mais severas, de modo que este tipo de lâmpada desapareça do mercado europeu até 2015. Na Austrália a utilização de lâmpadas incandescentes já foi proibida, e seus dias estão contados na Nova Zelândia e em algumas partes dos EUA.

Isto se deve, principalmente por três fatores, os quais são:

- A economia de energia obtida na substituição das lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes compactas (LFC*);
- Os programas de eficiência energética promovidos pelas concessionárias de energia;
- E a preservação do meio ambiente, uma vez que o gasto e o descarte das lâmpadas fluorescentes é bem menor.

De acordo com Marcos Ellert (2009), gerente de Marketing da empresa OSRAM, mesmo parecendo uma medida que ataca diretamente o bolso do consumidor final, já que os novos tipos de lâmpadas exigem um investimento inicial maior, atualmente os modelos fluorescentes conseguem ser mais viáveis financeiramente com o passar do tempo.

Por exemplo, uma lâmpada incandescente de 60 Watts custa em média R\$ 1,50 e possui uma vida média de 1.000 horas. Já uma lâmpada fluorescente de 15W, que substitui a incandescente de maneira equivalente, tem um preço de aproximadamente R\$ 7,50, mas com vida mediana de 8.000 horas (oito vezes mais longa que a anterior). Isto significa que, mesmo tendo o custo inicial mais alto, a incandescente precisaria ser trocada 8 vezes, enquanto a mesma lâmpada fluorescente continuaria a operar.

Assim, o custo da incandescente a longo prazo, considerando essas reposições, passa a ser de R\$ 12,00, além do maior gasto com a conta de luz.

Além disto, a lâmpada fluorescente compacta pode ser instalada em qualquer soquete E27 (o mesmo das incandescentes), independentemente da tensão 127V ou 220V, uma vez que dispõe de mesma tecnologia usada nos demais produtos eletrônicos, operando em 100-240V.



Figura 1. Lâmpada Incandescente

Fonte: <http://alessandroazuos.blogspot.com/2011/01/lampadas-incandescentes-tem-dias.html>



Figura 2. Lâmpada Fluorescente Compacta

Fonte: <http://momendereflexao.blogspot.com/2010/10/reflexoes-para-um-planeta-sustentavel.html>

* Definição de LFC de acordo com a Portaria INMETRO Nº 289/2006 – lâmpadas fluorescentes compactas, com reator eletromagnético ou eletrônico, integrado. São lâmpadas de descarga em versões compactas das fluorescentes tubulares. Seus tubos de vidro, em cujas extremidades se localizam eletrodos, são recobertos com camadas de pó fluorescentes, de cuja natureza depende a composição espectral do fluxo luminoso produzido. O meio interno é constituído por atmosfera de gases tendo uma quantidade de mercúrio. O reator é integrado a sua base constituindo uma peça única, não destacável.

1.1. IMPACTOS

De acordo com Roberto Wagner Lima Pereira (2009), consultor do Ministério de Minas e Energia (MME), para elaboração da portaria, foi realizada uma série de estudos prevendo os impactos e a economia de energia, que serão divulgados junto com a entrada em consulta pública do projeto.

Segundo dados fornecidos pela Eletrobrás (2009), as lâmpadas fluorescentes podem consumir até quatro vezes menos energia elétrica em comparação às incandescentes. A estatal tomou como exemplo o uso da lâmpada em 50 milhões de residências no Brasil, estimando cinco lâmpadas incandescentes de 60 watts para cada um desses lares, o que resulta em uma demanda de cerca de 15.000 megawatts. A substituição por lâmpadas incandescentes acarretaria em uma demanda de 3.750 megawatts, ou seja, uma diferença de 11.250 megawatts, demanda aproximada à capacidade instalada da hidrelétrica de Itaipu (14.000 megawatts).

Até então, a substituição das tradicionais lâmpadas incandescentes pelas fluorescentes compactas apresenta apenas vantagens, no entanto, tais vantagens, só serão obtidas se as lâmpadas fluorescentes compactas forem de alta qualidade.

Para que as lâmpadas fluorescentes compactas funcionem, é necessário e indispensável o uso de equipamento, denominado “Reator Eletrônico”.

Veremos que os impactos que a princípio aparentam ser só de vantagens, podem se transformar em sérios problemas em toda rede de energia, se o reator eletrônico não for de boa qualidade, ou seja, de alto fator de potência.

1.2. OBJETIVOS

Apresentar a importância da utilização de reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes compactas de alto fator de potência em substituição das lâmpadas incandescentes em sistemas de iluminação.

Minimizar e/ou solucionar os problemas gerados pela utilização de reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes compactas de baixo fator de potência em sistemas de iluminação, aplicando nos circuitos dos reatores, filtros que elevem o fator de potência (FP) e diminuam a distorção harmônica total (THD).

2. ABORDAGEM GERAL SOBRE REATORES

2.1. DEFINIÇÃO

Segundo Roberval M. dos Reis (2006), reatores são equipamentos auxiliares necessários e indispensáveis na iluminação com lâmpadas de descarga (Fluorescentes tubulares, circulares e compactas ou HID).

São considerados indispensáveis, porque diferentemente da lâmpada incandescente, a qual foi projetada para ser ligada diretamente na rede elétrica, se ligarmos uma lâmpada de descarga na rede elétrica sem o reator, a mesma irá queimar, pois a rede elétrica não fornece características (tensão, corrente) ideais para o seu acendimento/funcionamento.

E de acordo com o artigo publicado na revista SBA Controle & Automação – Reator eletrônico de baixo custo e alto fator de potência (1998), a lâmpada fluorescente apresenta impedância negativa, o que requer dispositivos que atuem limitando a sua corrente, para evitar a sua destruição por corrente excessiva.

2.2. FUNÇÕES DO REATOR

- Fornecer um nível de tensão adequado para a ignição/acendimento, afim de, proporcionar uma partida firme e estabilizada da(s) lâmpada(s) sem cintilação (Flicker¹);

- Limitar a corrente elétrica a valores ideais para a(s) lâmpada(s), tanto na partida quanto em funcionamento (regime);

- Fornecer características elétricas (tensão, corrente e potência) a valores ideais para que a lâmpada forneça boa luminosidade.

2.3. TIPOS DE REATORES

Podem ser eletromagnéticos ou eletrônicos.

¹ Flicker – Vide anexo 1.

2.3.1. Reatores Eletromagnéticos

De acordo com o artigo apresentado no periódico (Lume Arquitetura, 2006), os reatores eletromagnéticos fazem parte da primeira geração de reatores. São constituídos por um núcleo de aço silício (com baixas perdas) e bobinas de fio de cobre esmaltado, impregnados com resina de poliéster adicionado com carga mineral, tendo grande poder de isolamento e dissipação térmica.

Basicamente são constituídos por uma bobina de fio de cobre enrolada ao redor de um núcleo de material ferro-magnético.

Conhecidos como reatores “pesados”, são divididos em duas categorias por princípio de funcionamento:

- **Partida convencional:** precisa de um starter (chave elétrica bi-metálica), o qual é um contato que no início do funcionamento está fechado, mas com o aquecimento dos filamentos da lâmina se abre e produz uma sobre-tensão, que auxilia o reator na fase de ignição/acendimento da lâmpada.

Indicados para locais úmidos, de baixa temperatura ou sem condições de aterramento.

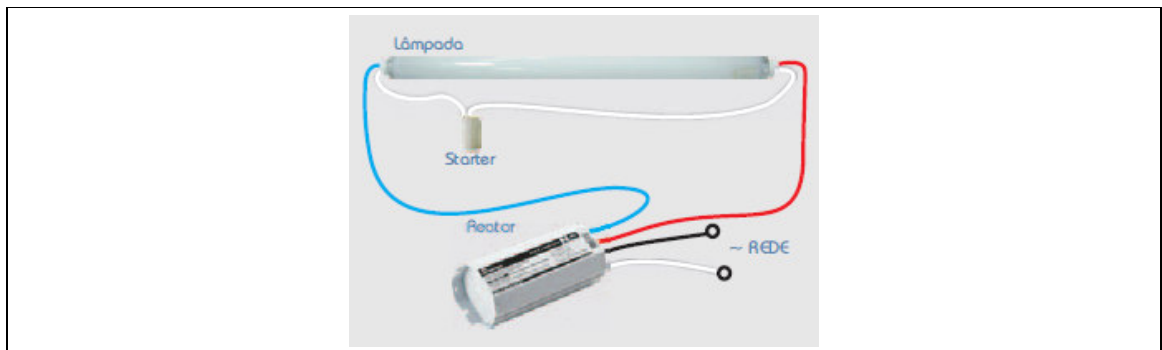


Figura 3. Esquema de ligação - Reator Convencional para uma lâmpada fluorescente tubular

Fonte: Demape – Manual do Reator, disponível no site

http://www.demape.com.br/pdf/manual_reator.pdf

- **Partida rápida:** não há necessidade de starter, pois no momento em que o reator é ligado, já se produz a tensão suficiente à partida da lâmpada. Neste tipo, os filamentos são aquecidos constantemente pelo reator, o que facilita o acendimento da lâmpada em curto espaço de tempo.

Indicados para ambientes agressivos como, por exemplo, em locais onde se faz galvanoplastia.

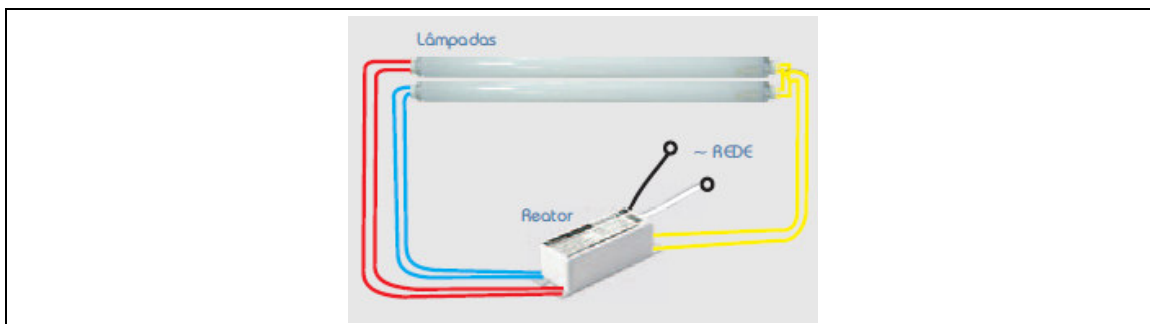


Figura 4. Esquema de ligação - Reator Convencional para uma lâmpada fluorescente tubular
Fonte: http://www.demape.com.br/pdf/manual_reator.pdf

Nos reatores eletromagnéticos a tensão e a corrente possuem a mesma frequência da fonte de alimentação, ou seja, no Brasil, 60Hz. O reator eletromagnético é uma carga passiva e é visto pela fonte como sendo um grande indutor. A corrente solicitada aproxima-se de uma senóide, porém defasada em relação à tensão, e possui um baixo fator de potência. Em alguns reatores são utilizados capacitores para a correção do fator de potência.

Durante a operação em regime permanente, com frequência de rede a 60Hz, a tensão passa pelo valor zero duas vezes por ciclo, possibilitando a desionização do gás e o apagamento da lâmpada a 120 Hz, originando uma cintilação. Maior nível de perdas, peso elevado e presença de ruído audível são algumas das deficiências dos reatores eletromagnéticos. A Figura 5 ilustra a forma de onda de um reator eletromagnético típico.

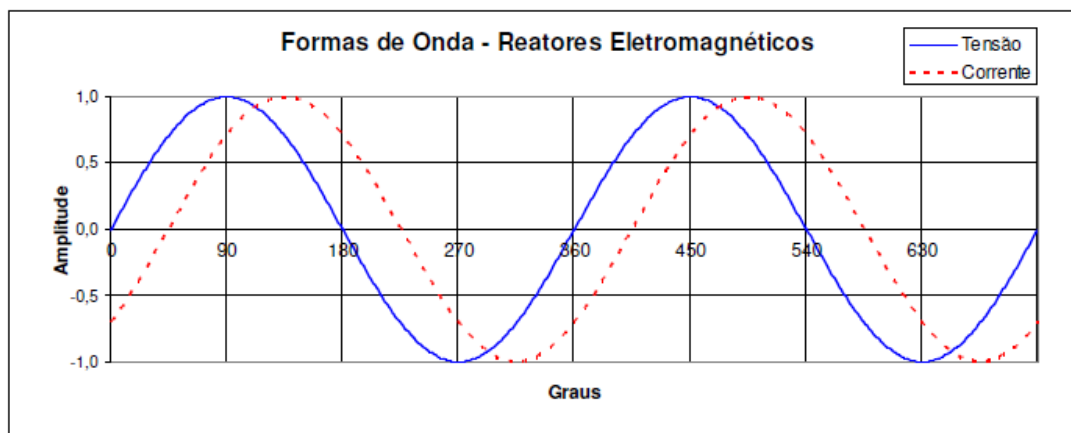


Figura 5. Forma de onda de um reator eletromagnético
Fonte: http://www.demape.com.br/pdf/manual_reator.pdf

2.3.2. Reatores Eletrônicos

De acordo com o artigo apresentado no periódico (Lume Arquitetura, 2006), com o advento da eletrônica no setor de iluminação e também atendendo a uma exigência do mercado, desenvolveram em meados dos anos 80 os reatores eletrônicos, e que hoje é o que há de mais moderno em termos de reatores para lâmpadas de descarga (Fluorescente ou HID).

São conhecidos como reatores leves, compactos, de fácil instalação e principalmente que obtêm maior economia de energia, pois os reatores eletrônicos têm menores perdas elétricas (maior rendimento), comparados com os reatores eletromagnéticos.

Os reatores eletrônicos são constituídos por componentes eletrônicos (capacitores, indutores, resistores, diodos, circuitos integrados, entre outros).

Operam em altas frequências (20kHz a 60kHz), o que elimina a intermitência conhecida como cintilação e o efeito estroboscópico. O acendimento das lâmpadas é feito de modo mais suave, o ruído audível a 120Hz comum nos reatores eletromagnéticos é totalmente eliminado.

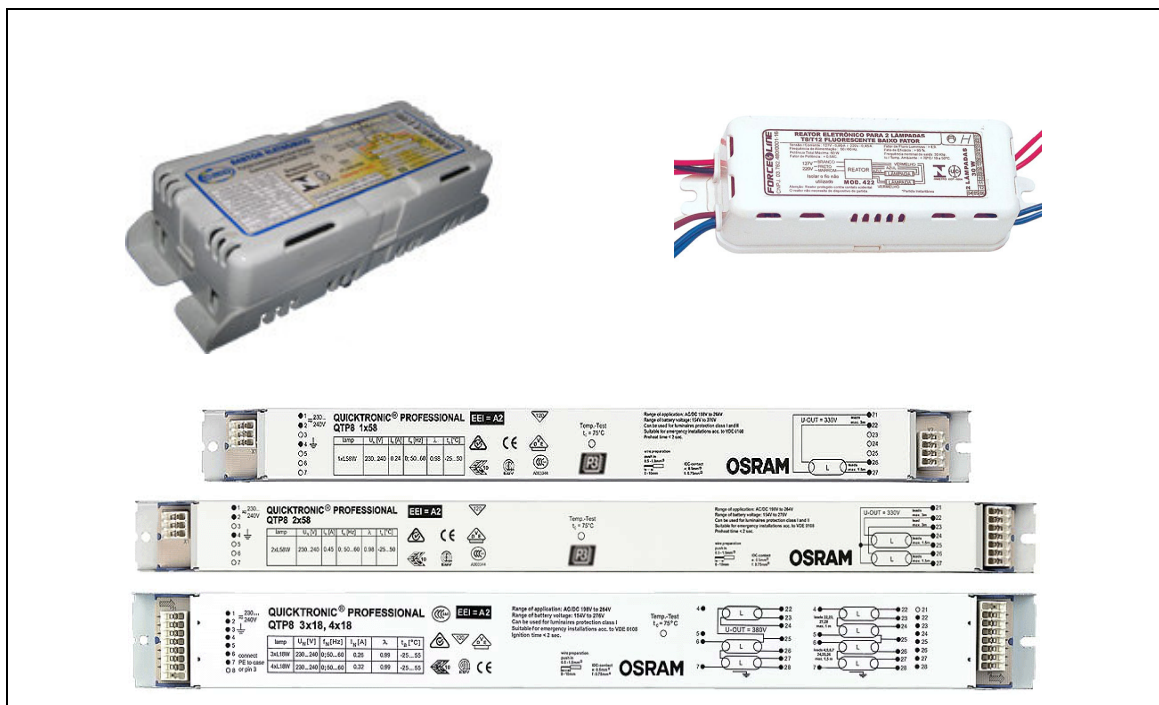


Figura 6. Reatores Eletrônicos

Fonte: <http://www.cmd.com.br/>, <http://www.forceline.com.br/novosite/>,
http://www.osram.com.br/osram_br/

Os Reatores Eletrônicos apresentam inúmeras vantagens em relação aos eletromagnéticos, entre as quais:

- São mais compactos;
- Mais leves;
- Consomem menos energia;
- Aumentam a vida útil das lâmpadas;
- Eliminam efeitos estroboscópicos;
- São mais eficazes;
- Apresentam versões diferenciadas de acendimento;
- Proporcionam uma luz com cor mais estável;
- Melhor manutenção lumínica.

Principais características

- Alto fator de potência (os de qualidade superior);
- Alta frequência (elimina o efeito estroboscópico e o de cintilação);
- Baixa carga térmica, que resulta em economia de energia;
- Aumento de vida útil da lâmpada;
- Economia de energia;
- Possibilidade de dimerização e utilização de sistemas inteligentes, com redução no consumo de energia de até 70% na comparação com os eletromagnéticos.

Obs.: Tais características dependem, entretanto, da qualidade de projeto e fabricação do produto. O fato de o reator ser eletrônico, não significa, necessariamente, que corresponderá a todas as vantagens que se espera de um modelo desta tecnologia.

Por serem equipamentos eletrônicos de alta frequência, podem causar interferências que vão desde ruídos no rádio ou estremelecimento de imagem da TV, até o colapso de sistemas de computadores, de comunicação, segurança, monitores hospitalares, entre inúmeros outros, caso não possuam filtros contra estas interferências.

Quando se deseja um sistema elétrico de qualidade, como instalações em bancos, lojas, indústrias, hospitais, escritórios e grandes obras, convém optar por reatores de alto fator de potência.

Os reatores eletrônicos se dividem em baixo fator de potência (ou fator de potência natural) e alto fator de potência.

Abaixo trataremos das diferenças entre estes dois modelos de reatores, no entanto, para que haja um bom entendimento sobre tais diferenças, é necessário entendermos antes duas características fundamentais, as quais praticamente definem e dividem os reatores. São elas:

- Fator de potência (FP);
- Total Harmonic Distortion ou Distorção Harmônica Total (THD).

2.4. FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência (FP) de um sistema elétrico qualquer, que está operando em corrente alternada (CA), é definido pela razão da potência real ou potência ativa pela potência total ou potência aparente.

Em circuitos de corrente alternada (CA) puramente resistivos, as ondas de tensão e de corrente elétrica estão em fase, ou seja, mudando a sua polaridade no mesmo instante em cada ciclo. Quando cargas reativas estão presentes, tais como capacitores ou condensadores e indutores, o armazenamento de energia nessas cargas resulta em uma diferença de fase entre as ondas de tensão e corrente. Uma vez que essa energia armazenada retorna para a fonte e não produz trabalho útil, um circuito com baixo fator de potência terá correntes elétricas maiores para realizar o mesmo trabalho do que um circuito com alto fator de potência.

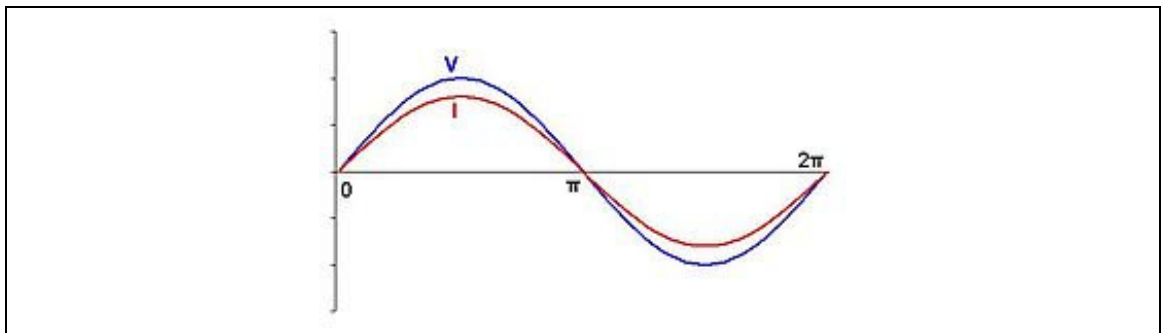


Figura 7. Ondas de tensão (V) e corrente (I) em fase. A carga possui característica resistiva (se senoidal perfeita, $FP=1$). Ângulo de fase $\phi=0^\circ$

Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Fator_de_pot%C3%Aancia

O fluxo de potência em circuitos de corrente alternada tem três componentes: potência ativa (P), medida em watts (W); potência aparente (S ou N), medida em volt-ampères (VA); e potência reativa (Q), medida em var,(var), grafado sempre em letras minúsculas.

A potência ativa é a capacidade do circuito de produzir trabalho em um determinado período de tempo. Devido aos elementos reativos da carga, a potência aparente, que é o produto da tensão pela corrente do circuito, será igual ou maior do que a potência ativa.

A potência reativa é a medida da energia armazenada que é devolvida para a fonte durante cada ciclo de corrente alternada. É a energia que é utilizada para produzir os campos,

elétrico e magnético necessários para o funcionamento de certos tipos de cargas como, por exemplo, retificadores industriais e motores elétricos.

O fator de potência pode ser expresso como:

$$FP = \frac{P}{S} \quad \text{Equação 1}$$

No caso de formas de onda perfeitamente senoidais, P, Q e S podem ser representados por vetores que formam um triângulo retângulo, também conhecido como triângulo de potências, sendo que:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad \text{Equação 2}$$

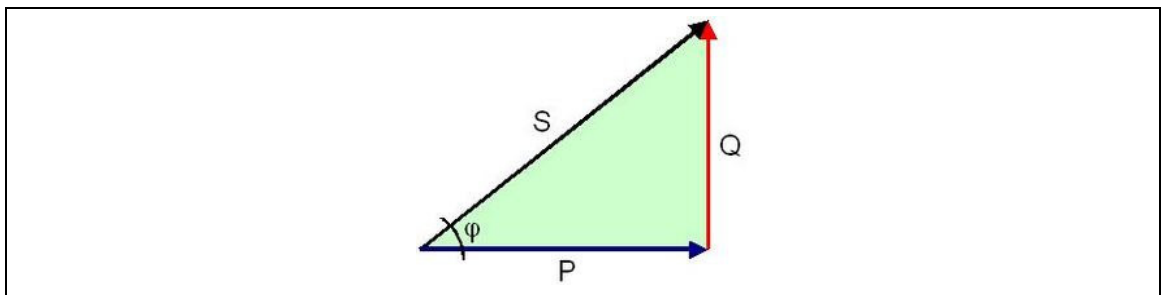


Figura 8. Triângulo retângulo que representa a relação entre as potências aparente (S), ativa (P) e reativa (Q)

Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Fator_de_pot%C3%Aancia

Se ϕ é o ângulo de fase entre as ondas de corrente e tensão, então o fator de potência é igual a $|\cos \phi|$, e:

$$P = S |\cos \phi| \quad \text{Equação 3}$$

Por definição, o fator de potência é um número adimensional entre 0 e 1. Quando o fator de potência é igual a zero (0), o fluxo de energia é inteiramente reativo, e a energia armazenada é devolvida totalmente à fonte em cada ciclo. Quando o fator de potência é 1, toda a energia fornecida pela fonte é consumida pela carga. Normalmente o fator de potência

é assinalado como atrasado ou adiantado para identificar o sinal do ângulo de fase entre as ondas de corrente e tensão elétricas.

O fator de potência é determinado pelo tipo de carga ligada ao sistema elétrico, que pode ser:

- Resistiva
- Indutiva
- Capacitiva

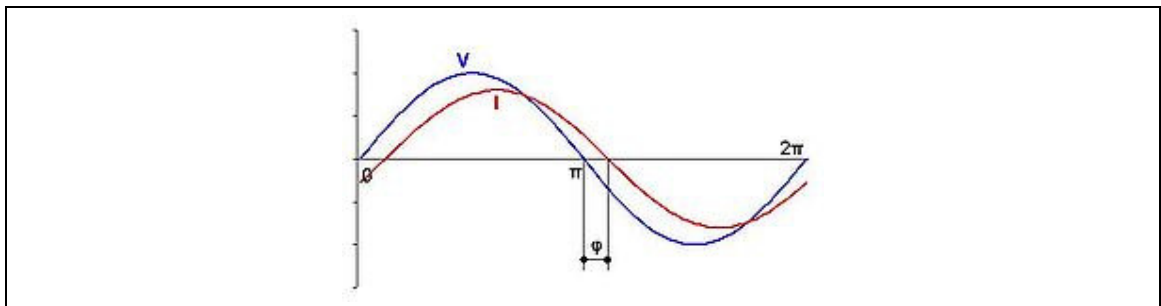


Figura 9. Onda de corrente (I) atrasada em relação à onda de tensão (V). A carga possui característica indutiva. $FP < 1$ (atrasado)

Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Fator_de_pot%C3%A2ncia

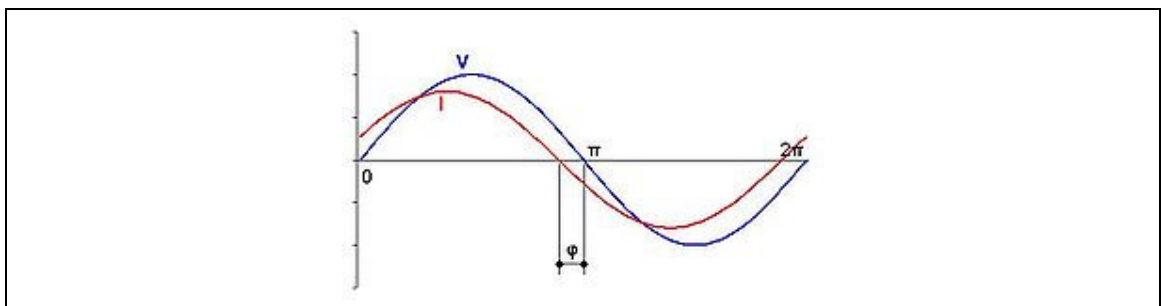


Figura 10. Onda de corrente (I) adiantada em relação à onda de tensão (V). A carga possui característica capacitiva. $FP < 1$ (adiantado)

Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Fator_de_pot%C3%A2ncia

Se uma carga puramente resistiva é conectada ao sistema, a corrente e a tensão mudarão de polaridade em fase, nesse caso o fator de potência será unitário (1), e a energia elétrica flui numa mesma direção através do sistema em cada ciclo. Cargas indutivas tais como motores e transformadores (equipamentos com bobinas) produzem potência reativa com

a onda de corrente atrasada em relação à tensão. Cargas capacitivas tais como bancos de capacitores ou cabos elétricos enterrados produzem potência reativa com corrente adiantada em relação à tensão. Ambos os tipos de carga absorverão energia durante parte do ciclo de corrente alternada, apenas para devolver essa energia novamente para a fonte durante o resto do ciclo.

Por exemplo, para se obter 1 kW de potência ativa quando o fator de potência é unitário (igual a 1), 1 kVA de potência aparente será necessariamente transferida ($1 \text{ kVA} = 1 \text{ kW} \div 1$). Sob baixos valores de fator de potência, será necessária a transferência de uma maior quantidade de potência aparente para se obter a mesma potência ativa. Para se obter 1 kW de potência ativa com fator de potência 0,2 será necessário transferir 5 kVA de potência aparente ($1 \text{ kW} = 5 \text{ kVA} \times 0,2$).

Frequentemente é possível corrigir o fator de potência para um valor próximo ao unitário. Essa prática é conhecida como correção do fator de potência e é conseguida mediante o acoplamento de bancos de indutores ou capacitores, com uma potência reativa Q contrário ao da carga, tentando ao máximo anular essa componente. Por exemplo, o efeito indutivo de motores pode ser anulado com a conexão em paralelo de um capacitor (ou banco) junto ao equipamento.

As perdas de energia aumentam com o aumento da corrente elétrica transmitida. Quando a carga tem fator de potência menor do que 1, mais corrente é requerida para suprir a mesma quantidade de potência útil. As concessionárias de energia estabelecem que os consumidores, especialmente os que possuem cargas maiores, mantenham os fatores de potência de suas instalações elétricas dentro de um limite mínimo, hoje 0,92 estuda-se aumentar para 0,96, caso contrário serão penalizados com cobranças adicionais. Especialistas frequentemente analisam o fator de potência de uma carga como um dos indicadores que afetam a eficiência da transmissão e geração de energia elétrica.

Componentes não-senoidais: Em circuitos que têm apenas tensão e corrente alternadas, como é o caso dos reatores eletrônicos, o efeito do fator de potência cresce somente com a diferença de fase entre ambas. Isso é conhecido como "fator de potência de deslocamento". Este conceito pode ser generalizado para fatores de potência reais onde a potência aparente inclui componentes de distorção harmônica. Isso possui uma importância prática em sistemas de potência que contêm cargas não-lineares tais como retificadores,

algumas formas de iluminação elétrica, fornos a arco, equipamentos de solda, fontes chaveadas, entre outros.

Os reatores eletrônicos incorporam um retificador simples de onda completa que conduzem apenas quando a tensão instantânea excede a tensão no capacitor de entrada. Isso produz altos picos de corrente de entrada, que, por sua vez, produzem distorções no fator de potência e problemas de carregamento, tanto dos condutores fase como neutro das instalações e dos sistemas elétricos.

Legislação: No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL estabelece que o fator de potência nas unidades consumidoras deve ser superior a 0,92 capacitivo durante 6 horas da madrugada e 0,92 indutivo durante as outras 18 horas do dia. Esse limite é determinado pelo Artigo nº 95 da Resolução ANEEL nº414 de 09 de setembro de 2010, e quem descumpre está sujeito a uma espécie de multa que leva em conta o fator de potência medido e a energia consumida ao longo de um mês.

A mesma resolução estabelece que a exigência de medição do fator de potência pelas concessionárias é obrigatória para unidades consumidoras de alta tensão (supridas com mais de 1000V) e facultativa para unidades consumidoras de baixa tensão (abaixo de 1000V, como residências em geral). A cobrança em baixa tensão, na prática, raramente ocorre, pois o fator de potência deste tipo de unidade consumidora geralmente está acima de 0,92. Não compensa, pois demanda a instalação de medidores de energia reativa.

No Brasil, ainda não existe legislação para regulamentar os limites das distorções harmônicas nas instalações elétricas.

Principais causas do baixo fator de potência

- Motores trabalhando em vazio durante grande parte de tempo;
- Motores superdimensionados para as respectivas cargas;
- Grandes transformadores alimentando pequenas cargas por muito tempo;
- Reatores para lâmpadas de descargas sem correção individual do fator de potência;

- Grande quantidade de motores de pequena potência.

Principais efeitos do baixo fator de potência

- Variações de tensão, que podem provocar a queima de equipamentos elétricos;
- Condutores aquecidos;
- Perdas de energia;
- Redução do aproveitamento da capacidade de transformadores;
- Aumento na conta de energia, pela cobrança do custo da Energia Reativa Excedente.

Ações para correção do fator de potência

- Dimensionar corretamente motores e equipamentos;
- Utilizar e operar convenientemente os equipamentos;
- Instalar capacitores onde for necessário;
- Corrigir o fator de potência em reatores eletrônicos;
- Procurar o serviço de técnicos habilitados.

Benefícios da correção do fator de potência

- Diminuição nas variações de tensão;
- Diminuição de aquecimento nos condutores;
- Redução das perdas de energia;
- Melhor aproveitamento da capacidade de transformadores;

- Aumento da vida útil dos equipamentos;
- Utilização racional da energia consumida;
- Desaparecimento do consumo de energia reativa excedente, que é cobrado na conta.

2.5. THD

As distorções na forma de onda são caracterizadas por variações na forma de onda original da tensão ou da corrente, quando comparadas a uma onda puramente senoidal, em regime permanente. Entre os principais fenômenos destacam-se as variações no nível tensão e corrente contínua (CC) e a presença de harmônicas.

A presença de tensão CC ou corrente CC em sistemas de corrente alternada está associada a cargas operando com retificação em meia onda ou conversores operando em condições não-ideais. A corrente CC provoca a saturação em equipamentos como transformadores, aumentando o aquecimento e diminuindo o seu desempenho e a sua vida útil.

Já a geração de harmônicas deve-se à utilização de cargas não-lineares, ou seja, cargas que solicitam uma corrente não-senoidal quando são alimentadas por uma tensão senoidal. À medida que sistemas que utilizam componentes da eletrônica de potência foram sendo desenvolvidos, cresceu a geração de correntes com considerável conteúdo harmônico.

Estas correntes podem causar problemas ao próprio equipamento ou a outras cargas conectadas ao mesmo circuito. Fornos a arco, máquinas de solda, conversores estáticos e compensadores estáticos são alguns dos equipamentos que provocam este distúrbio.

Idealmente as formas de onda da tensão e da corrente deveriam ser senóides puras com frequência constante (60Hz no Sistema Elétrico Brasileiro). Entretanto, as formas de onda da tensão e da corrente não são puramente senoidais, mas uma composição da forma de onda na frequência fundamental (60Hz) com as suas harmônicas: 120Hz para a segunda harmônica, 180Hz para a terceira e assim sucessivamente. Em geral apenas as harmônicas de ordem ímpar estão presentes em sistemas de potência.

À medida que o número de harmônicas e suas respectivas amplitudes aumentam, cresce o nível de distorção da forma de onda original, afastando-se cada vez mais da desejada senóide.

Uma forma de avaliar o quanto está distorcida uma forma de onda é calcular a sua Distorção Harmônica Total, que nada mais é que o cálculo percentual do peso das harmônicas em relação ao valor da fundamental.

Por definição, tem-se na equação:

Equação 4

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{h\text{rms}}^2}}{V_{1\text{rms}}} * 100\%$$

Onde:

$V_{h\text{rms}}$ é o valor rms da harmônica de ordem h;

$V_{1\text{rms}}$ é o valor rms da componente fundamental.

Desta forma, o valor eficaz pode ser obtido pela equação:

Equação 5

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{h\text{rms}}^2}$$

2.6. REATORES DE BAIXO FATOR DE POTÊNCIA

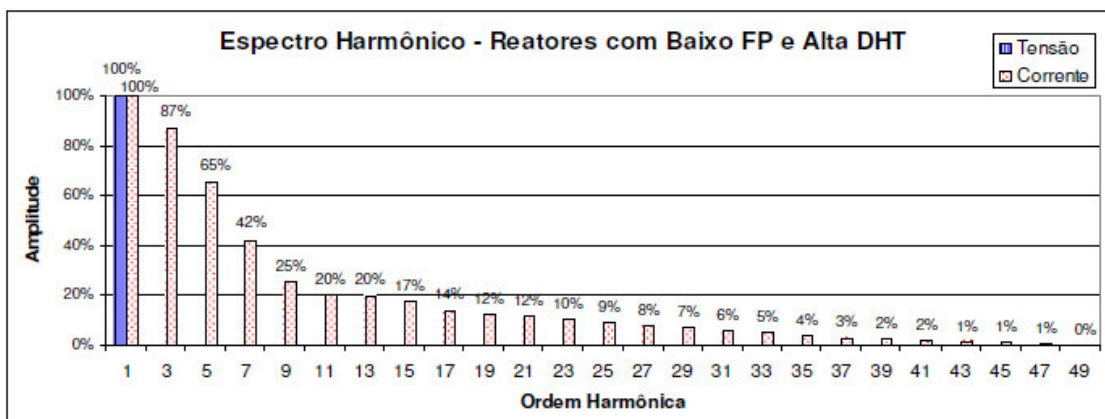
De acordo com as normas da ABNT [24], [25] e da portaria do INMETRO [15], os reatores eletrônicos de baixo fator de potência definem-se por três principais características técnicas:

- Fator de potência: Reatores com fator de potência inferior a 0.92;
- THD: Reatores com índice de distorção harmônica superior a 32%;
- Potência total consumida (reator + lâmpada): inferior a 25W.

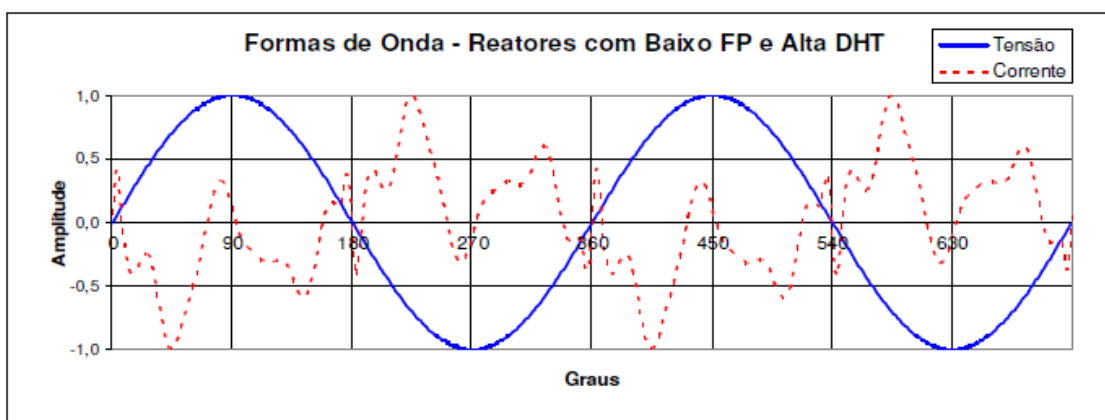
Segundo [5], os reatores de baixo fator de potência são recomendados para pequenas instalações, comerciais ou residenciais (até 100 peças no mesmo local). O preço é um dos seus maiores atrativos, no entanto, o aparelho requer correntes elétricas mais altas, em média 90% maior que nos reatores alto fator de potência, resultando na elevação dos custos da fiação e instalação.

Outra limitação do reator de baixo fator de potência é o alto índice de impurezas, conhecido como THD, que geralmente ultrapassa 100%. Esta distorção ou deformação da forma de onda é decorrente dos mais diversos tipos de cargas utilizadas na rede elétrica e também por causa da injeção de componentes harmônicos de corrente na rede de alimentação CA, através da própria fonte de alimentação do reator que não possui filtros.

Estas componentes harmônicas retornam a rede elétrica prejudicando outros equipamentos que estejam ligados na mesma rede.



(a)



(b)

Figura 11. (a) Conteúdo harmônico da tensão e corrente; (b) Formas de onda em um reator eletrônico de baixo fator de potência e alto THD

Fonte: http://www.gsep.ene.unb.br/producao/marco/Dissertacao_PauloAndre.pdf

Mas tudo isto não significa que o reator é ruim, são reatores que possuem um projeto mais simples, portanto, possuem limitações e um mercado específico.

2.7. REATORES DE ALTO FATOR DE POTÊNCIA

Ao contrário dos reatores de baixo fator de potência, as principais características técnicas que definem os reatores de alto fator de potência são:

- Fator de potência: Reatores com fator de potência superior de 0.92;
- THD: Reatores com índice de distorção harmônica inferior a 32% são considerados de baixo fator de potência;
- Potência total consumida (reator + lâmpada): superior a 25W.

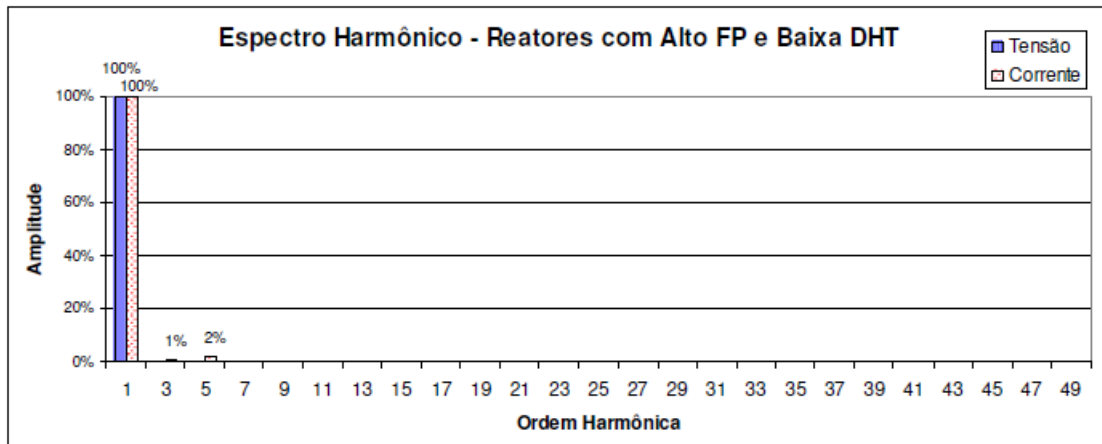
Segundo [5], já os reatores de alto fator de potência têm características ideais para o uso em grandes instalações (acima de 100 peças no mesmo local), como shoppings e indústrias ou locais que utilizam equipamentos sensíveis como sistema de informática, aparelhos hospitalares etc.

Apesar de mais caros, estes reatores proporcionam mais economia de energia, pois possuem filtros que mantêm o THD total abaixo de 32% que é a referência adotada pela norma IEC, permitindo o consumo de quase toda energia recebida, reduzindo também os gastos com fiação.

O modelo dispõe, ainda, de circuito de proteção contra partida mal sucedida das lâmpadas.

Uma das grandes vantagens é que proporcionam maior economia de energia, pois o circuito permite ao reator consumir quase toda energia que recebe sem perdas e outra vantagem é que quanto menores as perdas, menores são os gastos que se tem com a instalação (fiação).

Os reatores de alto fator de potência possuem um circuito que filtra as impurezas mantendo o THD baixo e dentro dos valores estabelecidos por norma.



(a)

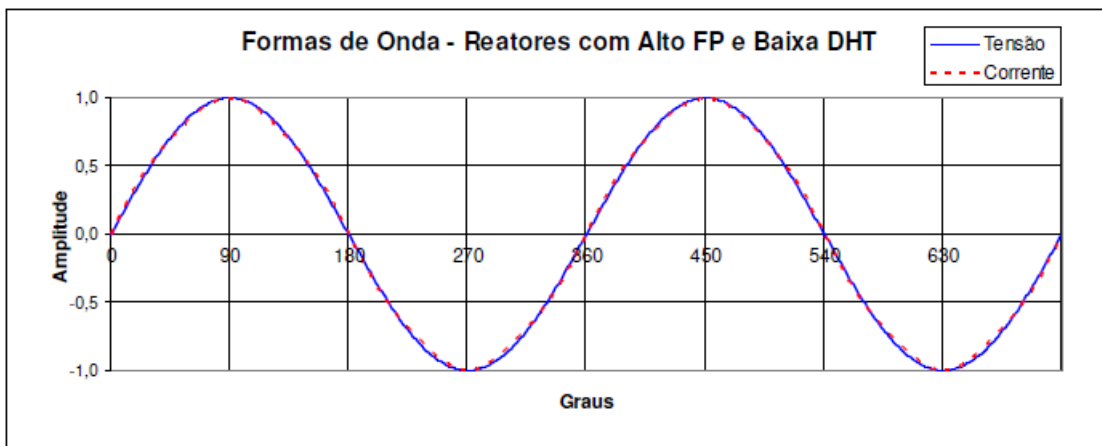


Figura 12. (a) Conteúdo harmônico da tensão e corrente; (b) Formas de onda em um reator eletrônico de baixo fator de potência e alto THD

Fonte: http://www.gsep.ene.unb.br/producao/marco/Dissertacao_PauloAndre.pdf

Por isso, este tipo de reator é recomendado para uso comercial e INDUSTRIAL (grandes instalações – shoppings, edifícios, agências bancárias, etc) ou para lugares que utilizem equipamentos sensíveis (sistema de informática, gerenciamento de dados, aparelhos hospitalares, etc).

2.8. FUNCIONAMENTO BÁSICO DE UM REATOR ELETRÔNICO

Basicamente podemos dividir o circuito de um reator eletrônico em três partes, as quais são:

- 1) Fonte de alimentação;
- 2) Inversor de alta frequência;
- 3) Circuito de partida e estabilização

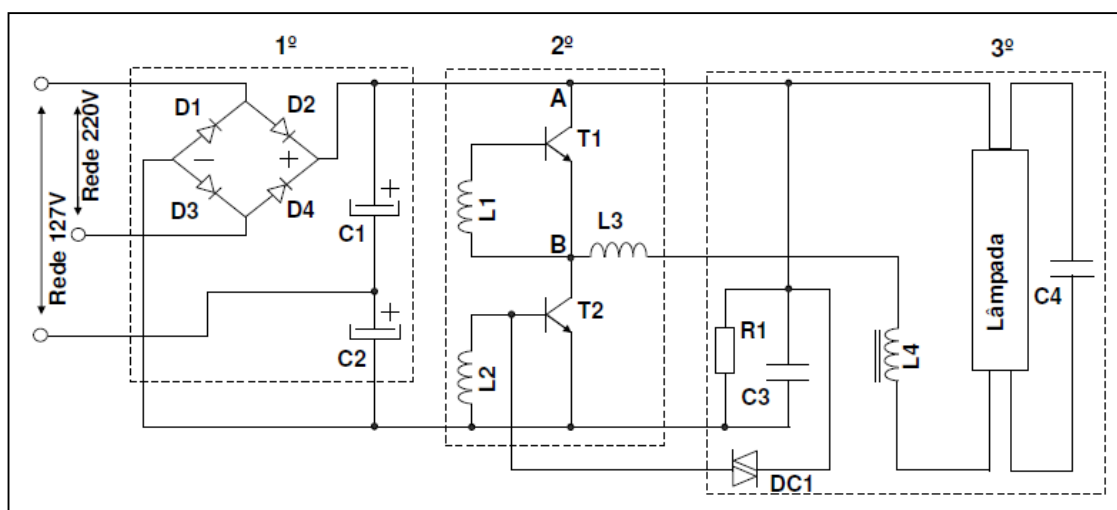


Figura 13. Circuito Ilustrativo de um reator eletrônico Bivolt (127/220V)

Fonte: Apostila de treinamento Orion Lighting, 2006 “Funcionamento básico de reatores eletrônicos

1) Fonte de Alimentação: Formado pelos diodos D1, D2, D3, e D4 (ponte de diodos) e capacitores eletrolíticos C1 e C2.

O inversor, o qual é a próxima parte do circuito a ser analisado, opera somente com corrente e tensão contínua, por isso se faz necessário como a primeira parte do circuito uma fonte de alimentação. A fonte é responsável pela conversão da tensão alternada em tensão contínua.

A fonte de alimentação utilizada no circuito ilustrado acima é comum, sendo assim, não há necessidade de detalharmos o seu funcionamento, no entanto, é importante entendermos alguns pontos:

- Esta fonte é alimentada por tensão de rede, ou seja, tensão alternada de 127VCA ou 220VCA. Esta tensão corresponde a um valor eficaz (V_{ef}) ou RMS (V_{rms}).

Para obtermos a tensão de pico (amplitude) ou também conhecido nos reatores eletrônicos como tensão de barramento (V_{dc}), aplicamos os seguintes cálculos:

Para tensão alternada de 127VCA, temos:

$$V_p = V_{ef} \cdot \sqrt{2} \cdot 2$$

Equação 6

$$V_p = 127 \cdot \sqrt{2} \cdot 2$$

$$V_p \approx 360V_{dc}$$

Obs.: É multiplicado por 2, pois para tensão de 127VCA, os dois capacitores do circuito de filtragem se carregam com a tensão máxima de rede.

Para tensão alternada de 220VCA, temos:

$$V_p = V_{ef} \cdot \sqrt{2}$$

Equação 7

$$V_p = 220 \cdot \sqrt{2}$$

$$V_p \approx 311V_{dc}$$

Outras funções da fonte de alimentação:

- Limitar a injeção de componentes harmônicos de corrente na rede de alimentação CA, abaixo dos níveis máximos especificados pelas normas correspondentes;

- Suprimir sinais de interferência em radiofrequência para compatibilizar o equipamento com as classes de interferência especificadas pelas normas;

- Proteger os componentes eletrônicos do inversor contra surtos de tensão de rede;

- Proteger contra eventuais falhas do inversor.

Obs.: As funções acima irão variar de acordo com cada projeto, podendo ou não possuir tais características.

2) Inversor de frequência: Formado pelas chaves semicondutoras (transistores) T1 e T2, e o núcleo de ferrite toroidal, o qual é constituído pelo ferrite e as espiras L1, L2 (enrolamentos secundários) e L3 (enrolamento primário).

Também como a fonte de alimentação, o inversor de frequência utilizado no circuito ilustrado acima é comum e utiliza uma topologia básica para circuitos auto-oscilantes, portanto, não há necessidade de detalharmos o seu funcionamento.

É denominado inversor de frequência, pois basicamente é um oscilador alimentado pela tensão de barramento (V_{dc}) e que gera uma tensão CA de alta frequência (geralmente entre 20kHz a 60kHz). Esta tensão gerada possui amplitude adequada para operar a lâmpada nas suas condições normais.

3) Circuito de partida e estabilização: Formado pelo resistor R1, capacitores C3 e C4, diac DC1 e indutor L4.

O Inversor de frequência e o Circuito de partida e estabilização funcionam da seguinte forma:

A partir do instante em que o reator é energizado (ligado) o capacitor C3 começa a se carregar através do resistor R1. Quando a tensão no capacitor C3 é suficiente para provocar a ruptura do diac DC1 (tensão de ruptura $\sim 32V$), este gera um pulso que faz com que o transistor T2 entre em condução. A tensão entre Coletor e Emissor do transistor T2 é levada a zero, estabelecendo desta forma entre os pontos A e B, uma tensão com valor igual ao do barramento. Isto é suficiente para iniciar a oscilação no circuito ressonante, cuja frequência (alta frequência – 20 kHz a 60kHz) é determinada pelo indutor L4 e capacitor C4.

A lâmpada se comporta como um circuito aberto, dessa forma, a tensão sobre elas cresce de forma oscilatória, iniciando então o processo de oscilação, os enrolamentos secundários do indutor ressonante (L1 e L2) geram tensões apropriadas para o comando dos transistores T1 e T2.

O circuito ressonante paralelo L4 e C4 estabelece uma tensão elevada durante o processo de ignição da lâmpada, e mantém a corrente no valor nominal em regime permanente.

Obs.: Em função da alta frequência, as dimensões físicas dos componentes tornam-se bastante reduzidas, principalmente dos indutores que compõem o circuito.

2.9. REATOR ELETRÔNICO PARA LÂMPADA FLUORESCENTE COMPACTA

Conforme descrito no item 1.2. *IMPACTOS* – Para que as lâmpadas fluorescentes compactas funcionem, é necessário e indispensável o uso de equipamento, denominado “Reator Eletrônico” - Grande parte dos consumidores desconhecem a existência do reator junto a lâmpada fluorescente compacta, primeiro porque o mesmo está integrado, “embutido” na base e não é visível, segundo porque para substituir uma lâmpada incandescente basta “rosquear” soquete, já que é o mesmo (E27).

Abaixo seguem algumas ilustrações, nas quais o conjunto (bulbo da lâmpada, reator eletrônico e base) foi desmontado e assim é possível verificar a existência do reator eletrônico:

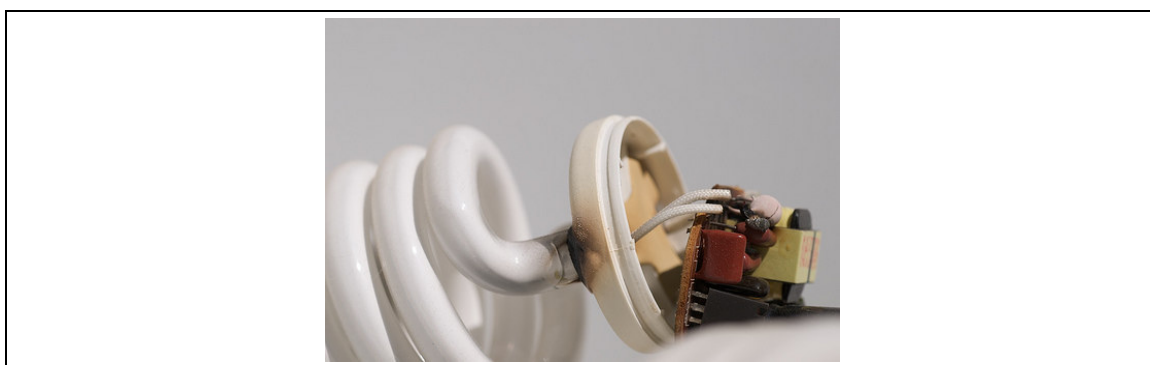


Figura 14. Reator Eletrônico para LFC

Fonte: <http://zeueletronica.blogspot.com/2011/05/esquema-de-lampada-fluorescente.html>

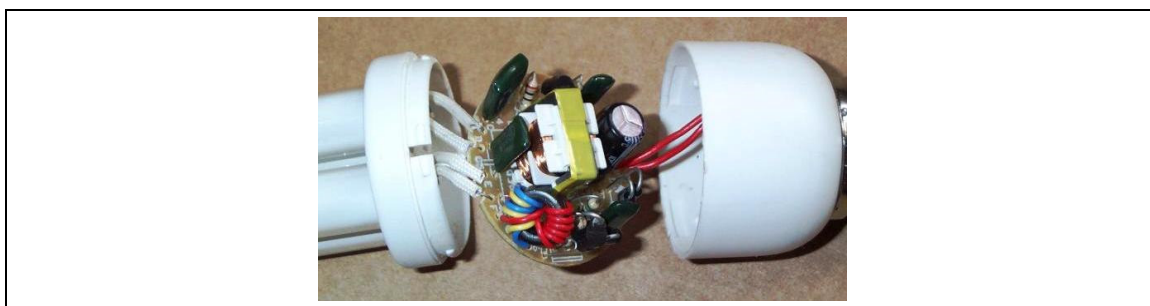


Figura 15. Reator Eletrônico para LFC

Fonte: <http://acquatricos.blogspot.com/2010/06/lampada-fluorescente-compacta.html>

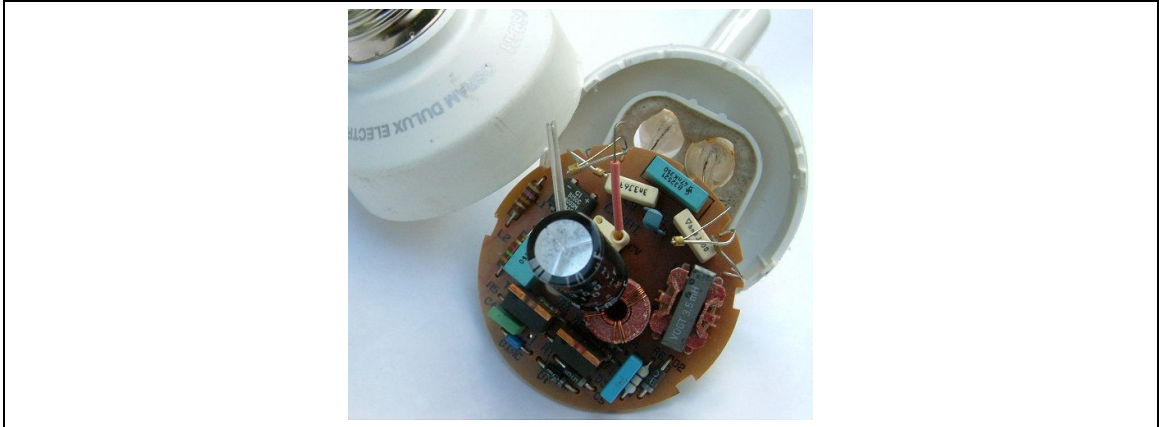


Figura 16. Reator Eletrônico para LFC

Fonte: <http://adrenaline.uol.com.br/forum/papo-cabeca/326827-lampadas-de-led-acabarao-com-o.html>

Atualmente todos os modelos de lâmpadas compactas existentes no mercado nacional são de baixo fator de potência, ou seja, o reator que está integrado no conjunto é exatamente o mesmo que verificamos no item 2.6 *REATORES DE BAIXO FATOR DE POTÊNCIA* – e conseqüentemente possuem as mesmas limitações, relacionadas a quantidades instaladas, aos altos índices de impurezas (THD), as altas correntes o que resulta em custo e/ou troca da fiação.

São por estes e outros fatores que veremos a seguir que a substituição das tradicionais lâmpadas incandescentes pelas fluorescentes compactas podem se transformar em sérios problemas em toda rede de energia, se o reator eletrônico não for de boa qualidade, ou seja, de alto fator de potência.

3. EFEITO DAS LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS NA QUALIDADE DE ENERGIA

Este capítulo é voltado para a análise dos reais problemas que irão impactar a qualidade da energia elétrica, como resultado da utilização em larga escala das lâmpadas fluorescentes compactas.

Inicialmente é clara a superioridade das lâmpadas fluorescentes compactas quando comparadas com as lâmpadas incandescentes, tendo como principais vantagens a eficiência elevada, tempo mais longo da vida da lâmpada e característica econômica da iluminação.

No entanto, quando observamos os efeitos das lâmpadas fluorescentes compactas sobre a qualidade da energia, no que tange a injeção de harmônicos no sistema elétrico, o surgimento das distorções indesejadas na rede e queda do fator de potência, verificamos que existem sérias desvantagens.

De acordo com o artigo publicado na revista Eletricidade Moderna – Efeitos das fluorescentes compactas em sistemas de distribuição (2005), a utilização em larga escala das lâmpadas fluorescentes compactas em combinação com outras cargas não-lineares, como televisores, computadores, lâmpadas fluorescentes tubulares, microondas, aparelhos de som, etc, irá impactar em problemas na qualidade de energia.

Essas cargas não-lineares poderão ou não estar associadas às cargas lineares, como chuveiro convencional, ferro elétrico, lâmpadas incandescentes e outras de uso mais constante como geladeiras, freezers e ar-condicionado. A maioria delas, no entanto, associadas das mais diferentes formas e em diferentes quantidades, produzem correntes harmônicas, podendo distorcer a forma de onda da tensão do sistema supridor e provocar, em maior ou menor escala, diversos efeitos, dentre eles:

- Aumento da amplitude da corrente distorcida que é absorvida da rede;
- Redução do fator de potência verdadeiro;
- Ressonância;
- Aumento da corrente de neutro;

- Perdas adicionais em transformadores, máquinas, cabos e capacitores;
- Atuação incorreta de relés de proteção;
- Erros em medidores de energia;
- Interferência em circuitos de controle, de comunicação e telefonia.

Apesar de não existirem normas brasileiras acerca dos níveis de harmônicos permitidos em sistemas de distribuição, é evidente que a qualidade da energia elétrica fornecida pelas concessionárias pode ser questionada em situações em que estes níveis são elevados, pois o suprimento de energia elétrica com níveis consideráveis de distorção pode gerar diversos problemas, como os efeitos listados acima. Dessa forma, o controle das distorções harmônicas deve ser considerado, tanto pelas concessionárias de energia elétrica, quanto por seus consumidores.

Possíveis ações para diminuir estes efeitos indesejados gerados pelas lâmpadas fluorescentes compactas é a instalação de filtros de rede ativos ou passivos diretamente na fonte de alimentação, onde está presente o retificador.

Veremos a seguir no item 4 *METODOLOGIA* – como podemos aplicar estes filtros.

4. METODOLOGIA

Com objetivo de minimizar e/ou solucionar os problemas relatados no item 3 *EFEITO DAS LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS NA QUALIDADE DE ENERGIA* – e encontrar uma forma de corrigir as características elétricas (fator de potência e THD) nos reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes compactas, fora realizado alguns estudos e experimentos com amostras de lâmpadas fluorescentes compactas adquiridas no mercado.

Verificamos no item 2.4 *FATOR DE POTÊNCIA* – que o fator de potência de deslocamento é causado pelo o retificador simples de onda completa, que contém cargas não-lineares e que conduzem apenas quando a tensão instantânea excede a tensão no capacitor de entrada.

E sabemos que para elevar o fator de potência, afim de, enquadrá-lo dentro dos limites estabelecido nas normas (> 0.92), é necessário buscar o equilíbrio entre as cargas, capacitiva e indutiva. Ou seja, se a carga no circuito do reator for indutiva, instala-se carga capacitiva. Caso a carga no circuito do reator for capacitiva, instala-se carga indutiva.

Como um atrasa e a outra adianta (vide Figuras 9 e 10), a soma das duas é uma carga neutra ou uma carga puramente resistiva.

Portanto, os experimentos consistem em aplicar filtros com indutores e capacitores diretamente no retificador da fonte de alimentação.

4.1. APRESENTAÇÃO DO LABORATÓRIO E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Todos os ensaios e experimentos fora realizado no laboratório da empresa Orion Lighting Assessoria (vide Figura 17), localizada na cidade Taboão da Serra/SP. A Orion Lighting atua no segmento de iluminação e conta com a experiência e a tradição de mais de 15 anos no mercado.

Possuí equipamentos específicos para o desenvolvimento e ensaios de reatores, em particular o Power Analyser 2551 - Xitron Technologies (Analisador de Potência), que constitui uma ferramenta importante nesta análise, pois foi por meio desse equipamento que foi possível realizar as medições e levantar as características elétricas das amostras.

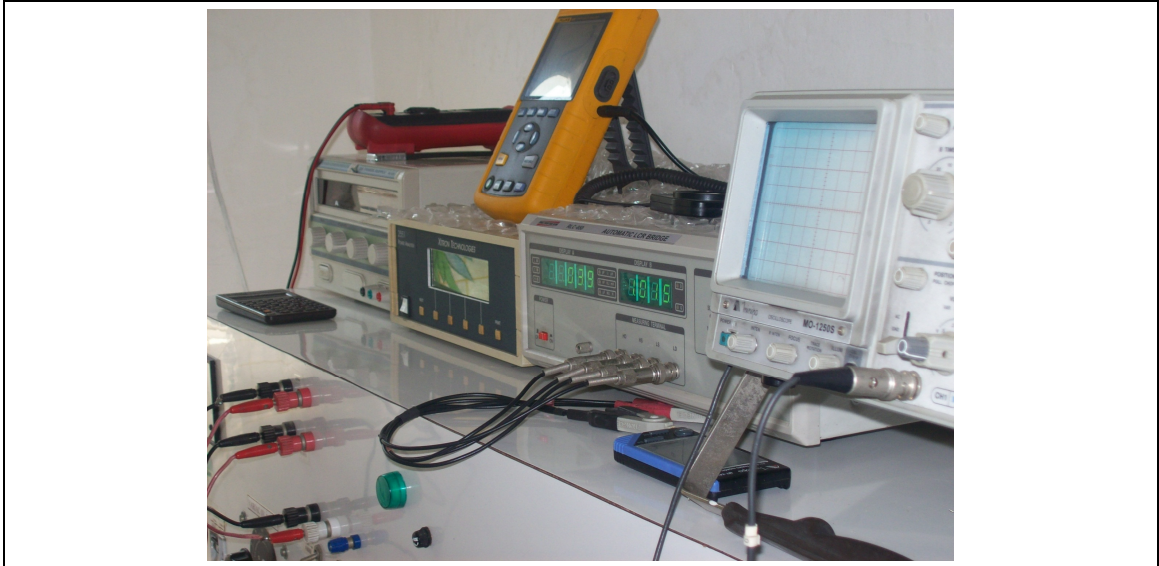


Figura 17. Bancada de desenvolvimento de reatores do laboratório da empresa Orion Lighting



Figura 18. Power Analyser 2551 - Xitron Technologies

4.2. AQUISIÇÃO DAS AMOSTRAS

Para realização dos estudos e experimentos, foram adquiridas no comércio local duas amostras de lâmpadas fluorescentes compactas, e de dois fabricantes diferentes, conforme abaixo:

- Uma amostra com potência de 25W (Watts) e tensão de alimentação 127V (Volts), do fabricante G-LIGHT. Site do fabricante - <http://www.glight.com.br/>

Vide fotos abaixo:



Figura 19. LFC 25W – 127V, fabricante G-Light

- Uma amostra com potência de 25W (Watts) e tensão de alimentação 220V (Volts), do fabricante FLC. Site do fabricante - <http://www.flc.com.br/>

Vide fotos abaixo:



Figura 20. LFC 25W – 220V, fabricante FLC

4.3. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS AMOSTRAS

Foram realizadas as medições das características elétricas, utilizando Power Analyser 2551, afim de, comparar os dados medidos, com os dados especificados no corpo do produto. Vide abaixo as tabelas comparativas:

Tabela 1. Comparativo das Características Elétricas das Amostras de 25W – 127V

Características Elétricas	Valor Especificado	Valor Encontrado
Tensão de Rede	127V	127,7V
Corrente de rede	328,96mA	358mA
Frequência de rede	60Hz	60,03Hz
Potência total	25W	25.3W
Fator de Potência	$\geq 0,5$	0,55
THD de Corrente	Não especificado	123%

Os valores acima, referentes a coluna “Valor Encontrado” podem ser confirmados na Figura 21:



Figura 21. Medições realizada com a amostra de 25W – 127V

Tabela 2. Comparativo das Características Elétricas das Amostras de 25W – 220V

Características Elétricas	Valor Especificado	Valor Encontrado
Tensão de Rede	220V	220,6V
Corrente de rede	179,3mA	171mA
Frequência de rede	60Hz	60.00Hz
Potência total	25W	25.6W
Fator de Potência	0,55	0,68
THD de Corrente	Não especificado	92,6%

Os valores acima, referentes a coluna “Valor Encontrado” podem ser confirmados na Figura 22:



Figura 22. Medições realizada com a amostra de 25W – 220V

De acordo com as medições realizadas e as tabelas comparativas, podemos notar uma leve variação das características elétricas especificadas pelos fabricantes, no entanto, tal variação é normal e aceitável, uma vez que as normas permitem uma variação de $\pm 10\%$ dessas características. Lembrando que tais variações são devidas aos componentes eletrônicos que constitui estes reatores e que também possuem tolerância (resistência, capacitância, indutância, etc).

Obs.: Nota-se que a informação do THD de corrente não é inserido nas embalagens dos produtos, já que esta informação é considerado um marketing negativo e também poderia causar algum tipo de desconfiança no consumidor final.

4.4. EXPERIMENTO

Uma vez verificado as características elétricas das amostras e confirmado que as mesmas são de baixo fator de potência, passamos aos experimentos, os quais conforme informado no item 4 *METODOLOGIA* – consistem em aplicar filtros com indutores e capacitores diretamente no retificador da fonte de alimentação.

A escolha pelo filtro com capacitores e indutores, se dá pelos motivos abaixo:

- Para corrigir e elevar o fator de potência de deslocamento é necessário buscar o equilíbrio entre as cargas, capacitiva e indutiva;
- Por serem componentes eletrônicos de baixo custo e comumente já são utilizados nos circuitos dos reatores eletrônicos;
- Por saber que o reator eletrônico representa para rede, uma carga reativa, devido aos componentes que compõem o seu circuito;
- Devido as características elétricas dos componentes, capacitor e indutor, conforme detalhamento abaixo:

Capacitor – De acordo com suas características, elétricas (reatância capacitiva²) e construtivas, um capacitor pode ser aplicado como filtro, pois ele deixa passar as altas frequências e rejeita as baixas frequências.

Indutor – De acordo com suas características, elétricas (reatância indutiva³) e construtivas, um indutor pode ser utilizado em circuitos como um filtro passa baixa, rejeitando as altas frequências.

² Reatância Capacitiva – Vide anexo 2.

³ Reatância Indutiva – Vide anexo 3.

Portanto, se aplicarmos estes dois componentes trabalhando em conjunto, temos um tipo de filtro conhecido como, filtro passa-baixa, ou seja, um filtro que elimina as altas frequências e permite a passagem das baixas frequências. Vide Figura 23:

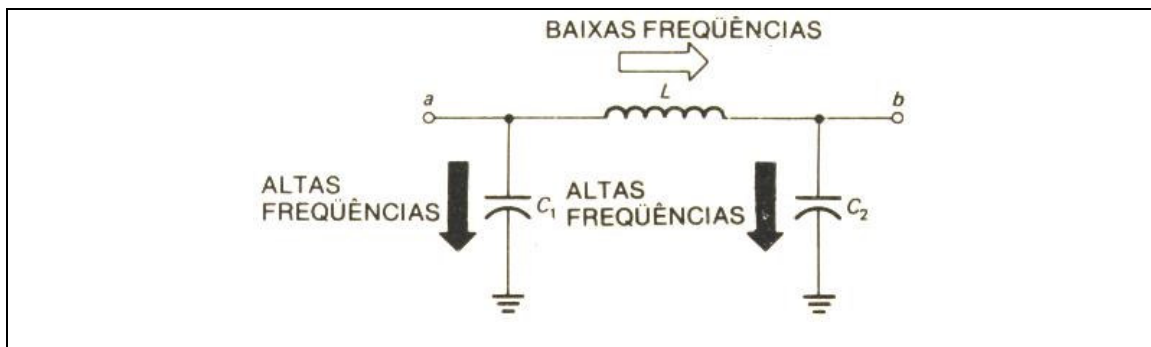


Figura 23. Esquema - Filtro passa-baixa, modelo π

Fonte: Disponível no site <http://www.techelp.com.br/indutores.htm>

5. RESULTADOS

Transformação da amostra de 25W - 127V em alto fator de potência.

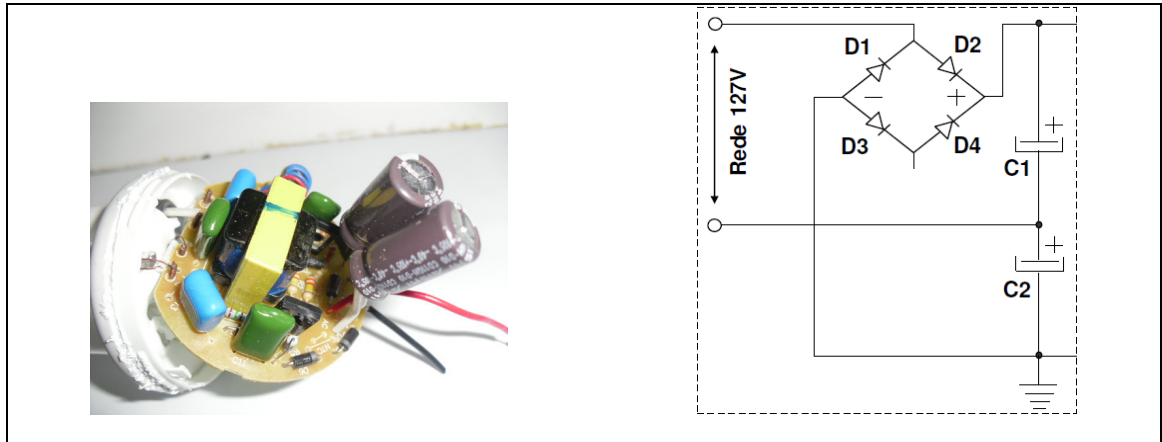


Figura 24. (a) Circuito da amostra de 25W – 127V, (b) Esquema elétrica da fonte de alimentação

Afim de, permitirmos retornar a rede de energia apenas a baixa frequência (60Hz) e eliminarmos a alta frequência, alteramos a fonte de alimentação do reator, utilizando um filtro mais simples de "meia seção" usando apenas um indutor e um capacitor (L_{filtro} e C_{filtro}). Esse filtro também é chamado "L" pela semelhança com essa letra invertida.

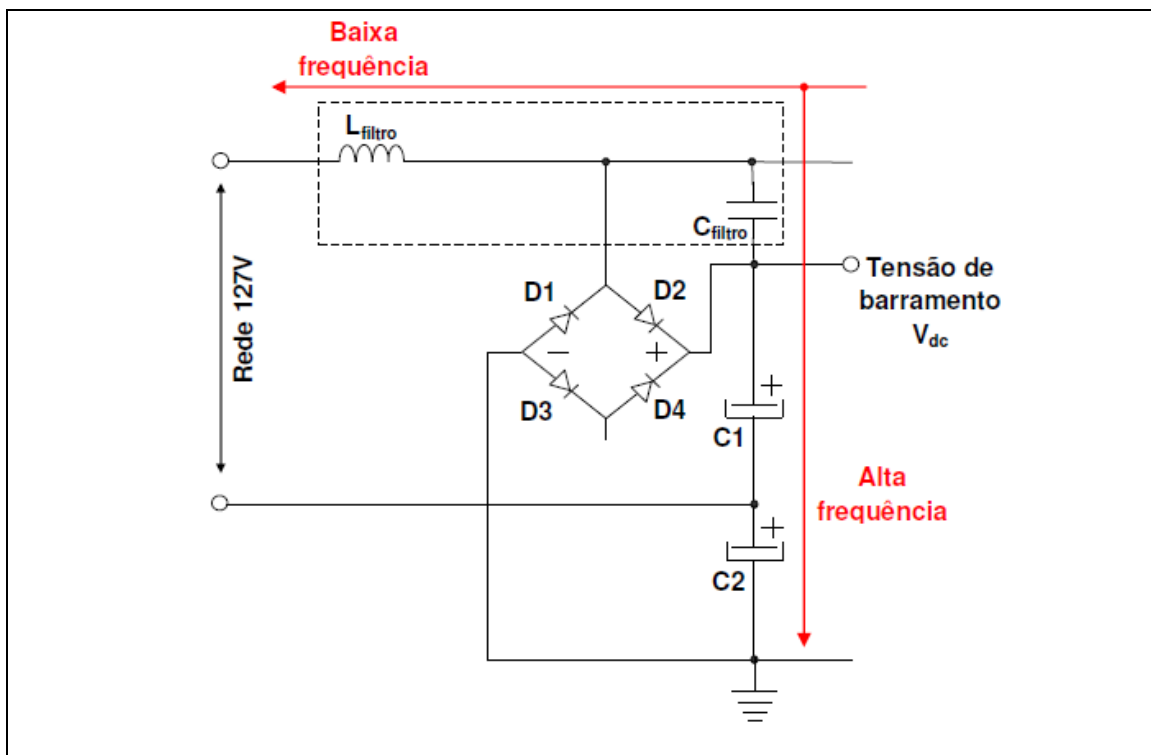


Figura 25. Esquema elétrico da fonte de alimentação com aplicação do filtro passa- baixa.

Funcionamento – O indutor (L_{filtro}) oferece forte oposição à passagem dos sinais de frequências mais altas e deixa passar apenas os sinais de frequências baixas, enquanto que o capacitor (C_{filtro}) curto-circuita os sinais que ainda possam passar.

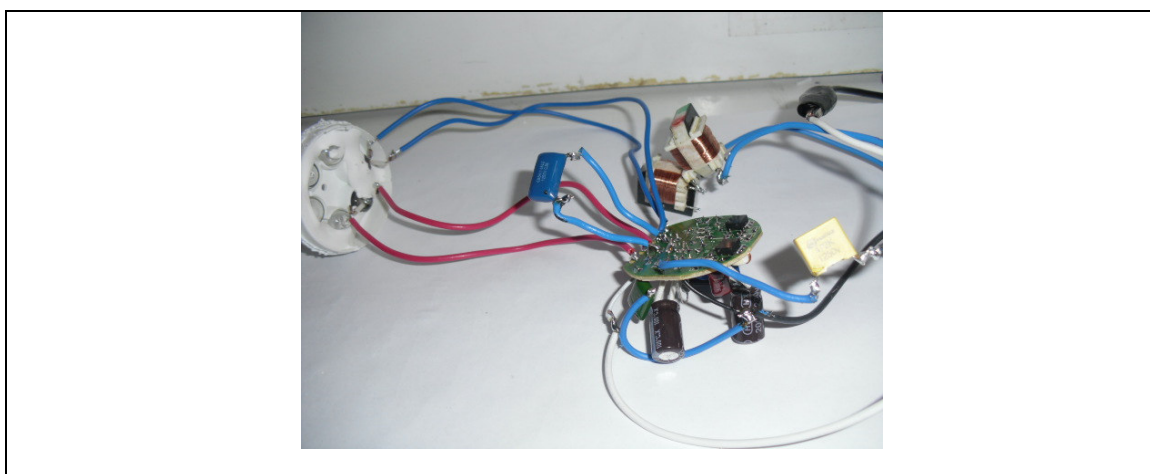


Figura 26. Adaptação do filtro passa-baixa no reator

Figure 10 consists of four photographs of the XITRON Technologies digital display, labeled (a) through (d). Each photograph shows the same device with different data displayed on the screen.

- (a) Shows power and current measurements: 127.7V, 25.3W, 0.358A, 0.5534PF. It also displays Triplen, K-factor, 8.35%Uthd, 2HARMS, 0.189A, 53.8, 45.7VA, 12.2VAR, 60.03Hz, 17:15:44, and RUNNING.
- (b) Shows waveform displays for voltage (U) and current (A). The voltage waveform is a sine wave with a peak of 167 and a period of 16.66MS. The current waveform is a pulse with a peak of 1.41 and a period of 16.66MS. It also displays CLASS D, U&A CONT, ZOOMx1, and RUNNING.
- (c) Shows a bar graph of the harmonic spectrum. The y-axis is labeled with 64.41%, 32.20%, and 0.000%. The x-axis is labeled with HARMONICS (1 to 31) and % (Lin). It also displays BARGRAPH, AMPS, and RUNNING.
- (d) Shows power and current measurements: 127.5V, 28.9W, 0.252A, 0.9016PF. It also displays Triplen, K-factor, 9.26%Uthd, 2HARMS, 0.057A, 32.1VA, 7.0VAR, 60.03Hz, 21:39:26, and RUNNING.

Tabela 3. Apresentação das melhorias nas características FP e THD com a aplicação do filtro

55

Visualizamos na Figura 27 e na Tabela 3, uma melhoria bastante considerável nas características elétricas (FP e THD) do reator, no entanto, conforme especificado no item 2.7 *REATORES DE ALTO FATOR DE POTÊNCIA* – este resultado ainda não transforma este reator em alto fator de potência.

Obs.: Como os resultados obtidos se aproximaram das características que torna o reator em alto fator de potência, é possível realizar outros ajustes no circuito, como no inversor de alta frequência e/ou no circuito de partida e estabilização para alcançar as características desejadas, no entanto, como o objeto de estudo é a aplicação de filtros no retificador (fonte de alimentação), estas outras possibilidades não foram avaliadas.

Transformação da amostra de 25W - 220V em alto fator de potência.

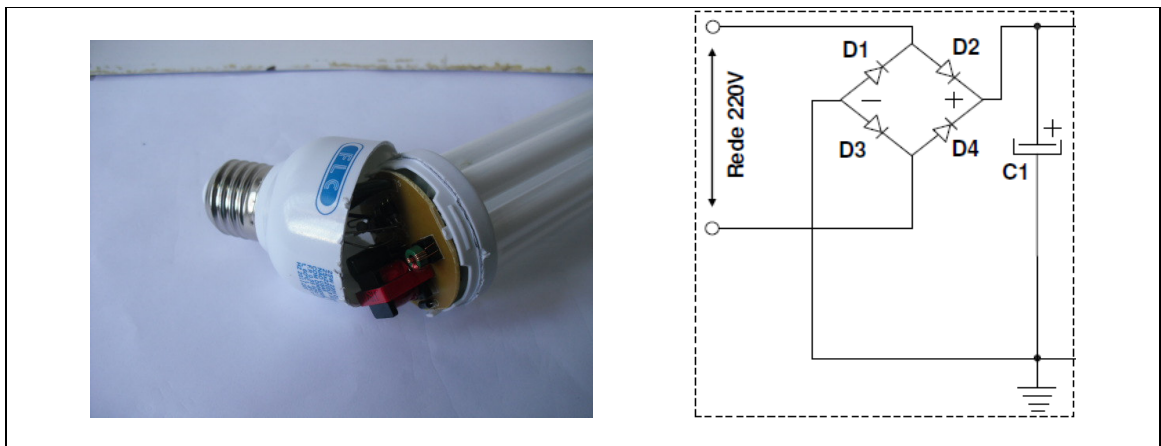


Figura 28. (a) Circuito da amostra de 25W – 220V, (b) Esquema elétrica da fonte de alimentação

Afim de, permitirmos retornar a rede de energia apenas a baixa frequência (60Hz) e eliminarmos a alta frequência, alteramos a fonte de alimentação do reator, utilizando um filtro mais simples de "meia seção" usando apenas um indutor e um capacitor (Lfiltro e Cfiltro). Esse filtro também é chamado "L" pela semelhança com essa letra invertida.

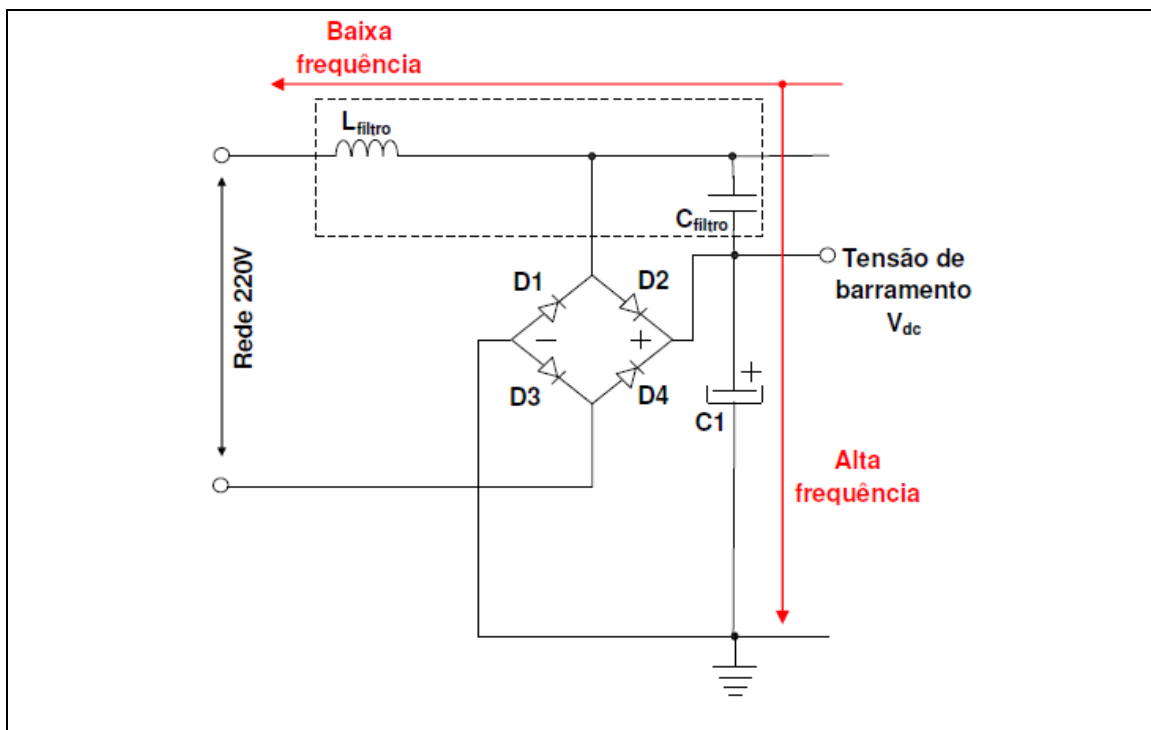


Figura 29. Esquema elétrico da fonte de alimentação com aplicação do filtro passa- baixa.

Funcionamento – O indutor (L_{filtro}) oferece forte oposição à passagem dos sinais de frequências mais altas e deixa passar apenas os sinais de frequências baixas, enquanto que o capacitor (C_{filtro}) curto-circuita os sinais que ainda possam passar.

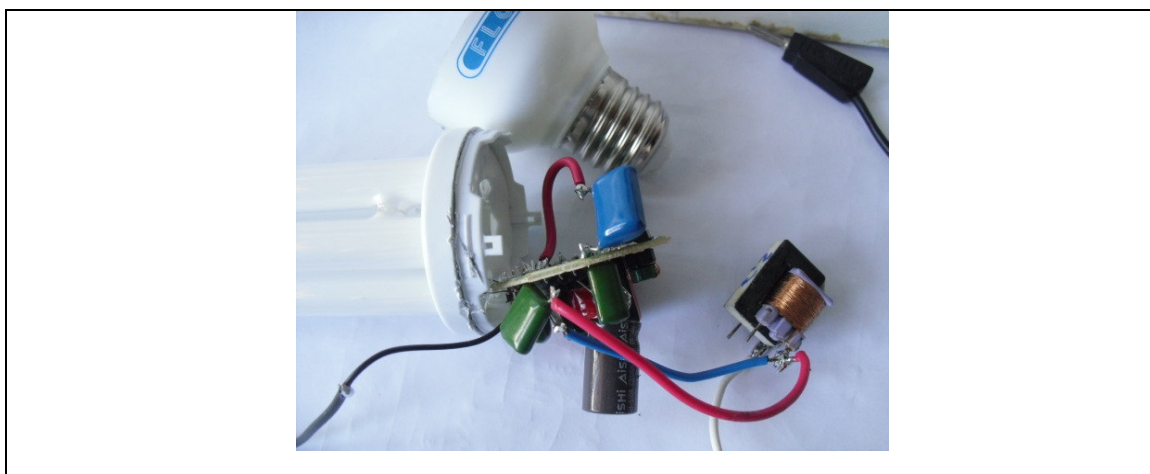


Figura 30. Adaptação do filtro passa-baixa no reator

Por meio das figuras abaixo, podemos visualizar e comparar as alterações nas características elétrica da amostra, após implementação do filtro passa-baixa:



Figura 31. (a) Características elétricas gerais, (b) Formas de onda – Tensão e Corrente, (c) Espectro harmônico de corrente

Tabela 4. Apresentação das melhorias nas características FP e THD com a aplicação do filtro

Características Elétricas	Valor sem alteração do circuito	Valor com alteração do circuito
Fator de Potência	0,68	0,97
THD de Corrente	92,6%	19,3%

Visualizamos na Figura 31 e na Tabela 4, que as características elétricas (FP e THD) do reator transformaram o mesmo em alto fator de potência, ou seja, de acordo com a metodologia proposta, obtemos um resultado positivo com a aplicação do filtro, modelo passa-baixa no retificador da fonte de alimentação.

6. CONCLUSÃO

Foi possível verificar no decorrer desse trabalho a importância e a evidente necessidade da utilização de reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes compactas de “alto fator de potência” em substituição das lâmpadas incandescentes, uma vez que o aumento do número de fluorescentes compactas provoca o aumento das distorções de tensão e de corrente, queda do fator de potência, além de todos os problemas já relatados no item 3 Efeito das lâmpadas fluorescentes compactas na qualidade de energia.

Cabe ressaltar, que se faz necessário uma melhor avaliação por parte do Governo Federal, com relação a data já publicada para substituição das lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes compactas (até 30 de Junho de 2016). E também que os organismos regulamentadores de produto, como o INMETRO, as associações ligadas ao setor, ABILUX, ABINEE e ABNT, desenvolvam o quanto antes, normas, procedimentos e programas que façam com que os fabricantes iniciem seus estudos e pesquisas para transformação dos reatores para lâmpadas fluorescentes compactas de “baixo fator” para “alto fator de potência”.

Sabemos que a transformação dos reatores para lâmpadas fluorescentes compactas de “baixo fator” para “alto fator de potência” envolve um aumento do custo, já que será necessária a utilização de uma quantidade maior de componentes eletrônicos que compõem o circuito do reator, talvez também seja necessário utilizar uma base maior para acomodar os novos componentes e que consequentemente o consumidor final pagará um pouco mais caro pelo produto, no entanto, os benefícios relacionados a qualidade de energia e os aspectos técnico-econômicos são claros, tanto para o consumidor, quanto para as concessionárias.

Enfim, os resultados obtidos evidenciam que é plenamente possível termos no mercado nacional reatores para lâmpada fluorescente compacta de alto fator de potência e que o custo/benefício é muito grande, tanto para o consumidor, quanto para as concessionárias de energia.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALMEIDA, J.E.L.; SILVEIRA, P.M.; ABREU, J.P. **Efeitos das fluorescentes compactas em sistemas de distribuição.** Revista Eletricidade Moderna, São Paulo, SP, N°378, setembro de 2005.
- [2] TEIXEIRA, M.D.; PAULILLO, G.; AOKI, A.R.; ARCHANJO, D.L. **Distorções causadas por lâmpadas fluorescentes compactas em redes de distribuição.** Revista Eletricidade Moderna, São Paulo, SP, N°371, fevereiro de 2005.
- [3] XAVIER, P.A.C.; FILHO, A.L.F.; OLIVEIRA, M.A.G. **Avaliação técnica e econômica de reatores eletrônicos.** Revista Eletricidade Moderna, São Paulo, SP, N°388, julho de 2006.
- [4] BLUM, Jorgen. **Os efeitos da substituição de lâmpadas incandescentes sobre a rede elétrica.** Revista Eletricidade Moderna, São Paulo, SP, N°440, novembro de 2010.
- [5] REIS, R.M.; FONTE, A.; CANDURA, P.; SOARES, R.G. **Reatores eletrônicos.** Revista Lume Arquitetura, São Paulo, SP, Edição 22, outubro/novembro de 2006.
- [6] REIS, R.M.; FONTE, A.; CANDURA, P.; SOARES, R.G. **Reatores eletrônicos.** Revista Lume Arquitetura, São Paulo, SP, Edição 22, outubro/novembro de 2006.
- [7] SILVA, Mauri Luiz. **Luz, lâmpada e iluminação.** Rio de Janeiro, RJ, Editora: Ciência Moderna, 2004. 157 p.
- [8] BOYLESTAD, Robert L.; NASHELKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos.** 8. ed. Editora: Pearson Education do Brasil, 2004. 672 p.
- [9] MALVINO, Paul Albert. "Eletrônica", Mc Graw Hill. Vol. 1.
- [10] SEIDEL, A.R.; PAPPIS, D.; COSTA, M.A.D; PRADO, R.N. **Reator eletrônico auto-oscilante "valley-fill" com correção do fator de crista utilizando modulação em frequência.** Revista SBA Controle & Automação, Vol.16, N°2, abril/maio e junho de 2005.
- [11] BRIOSCHI, R.O.; LAMEGO, M.M.; VIEIRA, J.L.F. **Reator eletrônico de baixo custo e alto fator de potência.** Revista SBA Controle & Automação, Vol.9, N°3, setembro/outubro/novembro e dezembro de 1998.
- [12] ANDRÉ, A.S.; ARAUJO, M.V.A.; PERIN, A.J.; BARBI, I. **Reator eletrônico auto-oscilante para lâmpadas fluorescentes com alto fator de potência utilizando buck-boost integrado.** Disponível em:
<<http://www.ustr.net/w2box/data/Documentos%20e%20Apostilas/Apostilas%20de%20Eletronica/artigo00-11.pdf>>. Acesso em 9 de março de 2011.
- [13] REIS, R.M.; NUNES, F. **Apostila - Funções básicas de reatores eletrônicos.** São Paulo, fevereiro de 2004.
- [13] REIS, R.M.; NUNES, F. **Apostila – Funcionamento básico de reatores eletrônicos.** São Paulo, maio de 2002

[14] BRASIL. Ministério do desenvolvimento, indústria e comércio exterior (MDIC)/ Instituto nacional de metrologia, normalização e qualidade industrial (INMETRO). **Regulamento de Avaliação da Conformidade para reatores eletrônicos alimentados em corrente alternada para lâmpadas fluorescentes**. Portaria Nº188, de 09 de novembro de 2004.

[15] BRASIL. Ministério do desenvolvimento, indústria e comércio exterior (MDIC)/ Instituto nacional de metrologia, normalização e qualidade industrial (INMETRO). **Requisitos de avaliação da conformidade para reatores eletrônicos alimentados em corrente alternada para lâmpadas fluorescentes tubulares retilíneas, circulares e compactas**. Portaria Nº 267, de 21 de setembro de 2009.

[16] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Art. 1º Aprovar a Regulamentação Específica de Lâmpadas Incandescentes na forma constante dos Anexos I e II à presente Portaria/ Art. 2º Esta Portaria entra em vigor na data de sua publicação**. Portaria Interministerial Nº 1.007, de 31 de dezembro de 2010.

[17] TORRES, I.S.M.; SOUZA, F.P.F.; FERREIRA, T.V.; LUCIANO, B.A. **Lâmpadas fluorescentes e distorções harmônicas: Eficiência energética e qualidade de energia elétrica**. Disponível em: <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/CBQEE_VIII_2009/web/docs/033.pdf>. Acesso em 12 de novembro de 2011.

[18] XAVIER, Paulo André C. **Avaliação das características elétricas de reatores eletrônicos utilizados em lâmpadas fluorescentes tubulares**. 2005. 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília 2005.

[19] AQUINO, Dayana. **Brasil quer acabar com lâmpadas incandescentes**. Portal Luis Nassif, setembro de 2009. Disponível em: <<http://blogln.ning.com/profiles/blogs/brasil-quer-acabar-com>>. Acesso em 29 de maio de 2011.

[20] UOL. **Substituição de lâmpadas incandescentes será benéfica para o consumidor**. Fevereiro de 2011. Disponível em: <<http://economia.uol.com.br/ultimas-noticias/infomoney/2011/02/04/substituicao-de-lampadas-incandescentes-sera-benefica-para-o-consumidor.jhtm>>. Acesso em 29 de maio de 2011.

[21] NOGUEIRA, Rubens. **Substituição das lâmpadas incandescentes, além de sustentável, é mais econômica em longo prazo**. Janeiro de 2011. Disponível em: <<http://www.adjorisc.com.br/jornais/obarrigaverde/economia/substituic-o-das-lampadas-incandescentes-alem-de-sustentavel-e-mais-economica-em-longo-prazo-1.392584>>. Acesso em 29 de maio de 2011.

[22] GE Iluminação. Disponível em: <<http://www.gelampadas.com.br/solucoes/glossario.asp>>. Acesso em 28 de maio de 2011.

[23] Wikipédia. Disponível em: <<http://www.wikipedia.com.br>>. Último acesso em 15 de novembro de 2011.

[24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14417**: Reatores eletrônicos alimentados em corrente alternada para lâmpadas fluorescentes tubulares – Prescrições gerais e de segurança. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.

[25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14418**: Reatores eletrônicos alimentados em corrente alternada para lâmpadas fluorescentes tubulares – Prescrição de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.

ANEXO 1 – FLICKER

A cintilação Flicker, corresponde as variações luminosas e é definida como “impressão subjetiva de flutuação da luminância” conforme IEC 555-1, é um fenômeno de desconforto fisiológico visual, sentido pelos usuários de lâmpadas alimentada por uma fonte comum para iluminação e uma carga perturbadora.

Já as cargas perturbadoras podem estar conectadas a qualquer nível de tensão.

As lâmpadas fluorescentes com reator eletrônico geralmente são insensíveis as variações de rede, mas em alguns casos podem também ser afetados com cintilações na presença de harmônicas ou ondas portadoras (detecção incerta da passagem por zero da tensão). Foi demonstrado e constatado que em certas condições a presença de inter-harmônicas na tensão de alimentação é também uma fonte de cintilação.

As fontes de perturbação são várias, como por exemplo: o forno a arco, máquinas com cargas flutuantes, reguladores de potência tiristorizados, máquinas de soldas e outras.

As flutuações de tensão geralmente não têm influência sobre o bom funcionamento do produto (quer dizer, não queima, a não ser se for acompanhados com picos de tensões e correntes muito altos) em compensação essas flutuações podem afetar o fluxo luminoso e causar muito incomodo.

Em resumo, é possível dizer que todas as fontes luminosas são sensíveis a variação de tensão e na ordem decrescente de sensibilidade.

Vapor de mercúrio;

Vapor de sódio;

Incandescentes;

Fluorescentes.

Os aparelhos de televisão e os monitores do sistema de informática, têm uma certa sensibilidade a cintilação que varia de acordo com o aparelho.

Por isso, há importância de proteger os reatores eletrônicos dessas cargas perturbadoras, pois se não for assim, teremos que sempre estar analisando máquina por máquina, qual a quantidade do nível de harmônicas que estão retornando a rede elétrica e também se estas estão dentro das normas.

ANEXO 2 – REATÂNCIA CAPACITIVA

A oposição que um capacitor oferece ao fluxo de corrente alternada é chamada de reatância capacitiva. É medida em Ohms. Quanto maior a capacitância, mais baixa será a reatância ou oposição ao fluxo da corrente alternada. Da mesma forma, quanto mais alta for a frequência, menor será a oposição que um capacitor oferece ao fluxo de corrente.

A reatância capacitiva é definida por:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Equação 8

Onde:

X_C = reatância capacitiva, medida em Ohms

f = frequência do sinal AC, medida em Hertz

C = capacitância, medida em Farads

Se aumentarmos a frequência ou a capacitância, a resistência irá diminuir. Os Capacitores são chamados às vezes de componentes reativos porque reagem contra o fluxo de corrente alternada.

ANEXO 3 – REATÂNCIA INDUTIVA

Os indutores, como os capacitores, opõem-se ao fluxo da corrente alternada. Nos capacitores, quanto maior a frequência, menor a oposição que o capacitor oferece ao fluxo da corrente alternada. A indutância reativa que representa a oposição que uma bobina oferece ao fluxo de uma corrente alternada aumenta quando a frequência aumenta. Também a reatância indutiva aumenta quando o valor da indutância aumenta.

A reatância indutiva é definida por:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

X_L = reatância indutiva, medida em Ohms

ω = frequência angular, medida em radianos por segundo

f = frequência do sinal AC, medida em Hertz

L = indutância, medida em Henry

Esta equação mostra que a oposição ou reatância de um indutor aumenta quando se aumenta a indutância ou a frequência. Os indutores são componentes reativos.