

TIAGO JOSÉ PODGORSKI

**CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM REATORES ELETRÔNICOS
PARA O ACIONAMENTO DE LEDS UTILIZADOS EM ILUMINAÇÃO DE
AMBIENTES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica da Fundação Universidade Federal do Pampa.

Orientador: Prof. Dr. Jumar Luís Russi

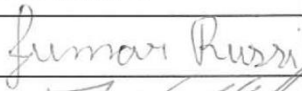


**ALEGRETE
2014**

Autoria: Tiago José Podgorski

Título: Correção do Fator de Potência em Reatores Eletrônicos para o Acionamento de LEDs Utilizados em Iluminação de Ambientes

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como parte das atividades para
a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

Os componentes da banca, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado

	Nome	Titulação	Assinatura	Instituição
1	Jumar Luís Russi	Prof. Dr.		unipampa
2	José Wagner Maciel Kaehler	Prof. Dr.		unipampa
3	Giovani Guarienti Pozzebon	Prof. Dr.		unipampa

Data da aprovação: 25 de março de 2014.

“Dedico este trabalho a toda minha família que sempre me apoiou, em especial meus pais e meu irmão, que sem eles nada disso seria possível.”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado saúde, força para superar as dificuldades e permitir que tudo isso acontecesse.

Minha eterna gratidão aos meus pais, Luiz e Veronica, e ao meu irmão, Marcio, por todo amor, carinho, incentivo e ensinamentos. Muito obrigado por toda a dedicação, apoio e paciência para que este sonho se tornasse realidade.

Ao Prof. Jumar Luís Russi pela orientação e apoio que recebi durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas e amigos pelo convívio de grande importância, momentos de felicidades e também de conhecimento adquirido.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez.”

Thomas Edison

RESUMO

As lâmpadas de LEDs (“Light Emitting Diode”- diodo emissor de luz) utilizadas em iluminação de ambientes tanto internos como externos estão ganhando espaço dentro do setor de iluminação, porém esse tipo de iluminação precisa de um drive ou reator para que possa ser conectada a rede elétrica. Assim, os reatores eletrônicos são geralmente utilizados para realizar essa tarefa. No entanto, em alguns casos os circuitos não são projetados visando fatores como a qualidade da energia, rendimento e durabilidade das lâmpadas LEDs de alta intensidade, gerando altos níveis de distorções harmônicas, baixo fator de potência e consequentemente uma baixa eficiência da mesma.

Este trabalho tem por objetivo apresentar um circuito que reduz de forma considerável a taxa de distorção harmônica dos drives para acionamento de LEDs e consequentemente corrigir o fator de potência do reator da lâmpada LED de alta potência.

Palavras-chave: Reator eletrônico, Lâmpadas LEDs, Fator de potência, Distorções harmônicas.

ABSTRACT

The light emitting diodes (LEDs) used in indoors and outdoors lighting are becoming more popular with the lighting industry. This type of device cannot be connected directly to the grid; it needs a reactor or drives do adapt the voltage levels. Thus, electronic ballasts are generally used to accomplish this task. However, in some cases the circuits are not designed aiming to factors such as power quality, performance and durability of high-intensity LED lights, generating high levels of harmonic distortion, low power factor and consequently a low efficiency.

This work aims to present a circuit that reduces considerably the total harmonic distortion of drives for driving LEDs and consequently corrects the power factor of the ballast for high power LEDs.

Keywords: Electronic Ballast, LED lights, Power Factor, Harmonic Distortion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquemático de um LED chip, montado sobre um dissipador de calor (slug). (ZORPETTE, 2002)	16
Figura 2. Lâmpada formada por LEDs de potência (50 watts)	17
Figura 3 - Reator eletrônico da lâmpada LED de 50W.	18
Figura 4. Circuito do conversor Buck alimentando LED.	19
Figura 5. Circuito do conversor Boost alimentando LED.	19
Figura 6. Circuito do conversor Forward alimentando uma lâmpada LED.	19
Figura 7. Circuito do conversor Flyback alimentando uma lâmpada LED.	20
Figura 8. Forma de onda da corrente e FFT de uma carga não linear. (Fonte: Harmônicas nas Instalações Elétricas. Causas, defeitos e soluções. PROCOBRE)	21
Figura 9. FFT da forma de onda da corrente (reator eletrônico sem filtro).	25
Figura 10. Circuito passa-baixas de 2ª ordem.	26
Figura 11. Filtro passa-baixas combinado com filtro Rejeita-faixa em derivação ambos de 2ª ordem.	27
Figura 12. Filtro Valley-Fill.	27
Figura 13. Forma de onda da corrente do reator eletrônico para lâmpada de 50W.	29
Figura 14. FFT da forma de onda da corrente no reator (lâmpada de 50W).	30
Figura 15. Circuito modelado no software PSIM da carga não linear com suas respectivas harmônicas.	31
Figura 16. Forma de onda da corrente obtida na modelagem da carga (amplitude dada em ampère),	31
Figura 17. FFT da forma de onda da corrente na carga modelada em software.	32
Figura 18. Circuito da carga não-linear com o filtro passa-baixas de segunda ordem.	33
Figura 19. Forma de onda da corrente com o filtro (amplitude dada em ampère).	33
Figura 20. FFT da forma de onda da corrente com o filtro passa-baixa de 2ª ordem.	33

Figura 21. Circuito que representa a carga não-linear com um filtro passa-baixas de 3ª ordem combinado com um filtro rejeita faixa de 2ª ordem.	35
Figura 22. Forma de onda da corrente com o filtro (amplitude dada em ampère).	35
Figura 23. FFT da forma de onda da corrente um filtro passa-baixas de 3ª ordem combinado com um filtro rejeita faixa de 2ª ordem	35
Figura 24. Circuito que representa a carga não linear com um filtro passa-baixas combinado com dois filtros rejeita-faixa um em derivação e um em série, todos de 2ª ordem.	37
Figura 25. Forma de onda da corrente com o filtro (amplitude dada em ampère).	37
Figura 26. FFT da forma de onda da corrente na com o filtro passa-baixas combinado com dois filtros rejeita-faixa um em derivação e um em série, todos de 2ª ordem.	37
Figura 27. Circuito que representa a carga não linear com um filtro passa-baixas de 4ª ordem combinado com três filtros rejeita-faixa de 2ª ordem.....	38
Figura 28. Forma de onda da corrente com o filtro (amplitude dada em ampère).	39
Figura 29. FFT da forma de onda da corrente com um filtro passa-baixas de 4ª ordem combinado com três filtros rejeita-faixa de 2ª ordem.....	39
Figura 30. Circuito do conversor Boost.	41
Figura 31. Estágio de condução do conversor Boost. (a) Chave fechada e (b) chave aberta.	42
Figura 32. Etapas de funcionamento do conversor flyback. (a) primeira etapa (b) segunda etapa.....	44
Figura 33. Modelagem do reator eletrônico com filtro ativo.	46
Figura 34. (a) Forma de onda da corrente com filtro ativo obtida em software (amplitude dada em ampère).....	46
Figura 35. FFT da forma de onda da corrente	47
Figura 36. FFT da forma de onda da corrente	47
Figura 37. forma de onda da corrente no reator eletrônico (amplitude dada em ampère).48	
Figura 38. FFT da forma de onda da corrente.	48

Figura 39. Circuito do filtro passa-baixas de 2ª ordem junto a carga.....	49
Figura 40. Forma de onda da corrente (amplitude dada em ampère).....	50
Figura 41. FFT da forma de onda da corrente.....	50
Figura 42. Esquema de ligação e medição do protótipo.....	51
Figura 43. Indutor utilizado no filtro.....	51
Figura 44. (a) Forma de onda da corrente com o filtro e (b) forma de onda da corrente sem o filtro.....	51
Figura 45. FFT da corrente no circuito utilizando filtro.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites para harmônicos de corrente	24
Tabela 2 - Dados de distorção harmônica no reator eletrônico	28
Tabela 3 - Comparação entre dados do reator com seus respectivos valores em regulamentação.....	34
Tabela 4 - Comparação entre dados do reator com seus respectivos valores em regulamentação.....	36
Tabela 5 - Comparação entre dados do reator com seus respectivos valores em regulamentação.....	38
Tabela 6 - Comparação entre dados do reator com seus respectivos valores em regulamentação.....	40
Tabela 7 - Dados do projeto do conversor Boost	42
Tabela 8 - Dados do projeto Flyback	44
Tabela 9 - Comparação entre dados do reator com seus respectivos valores em regulamentação.....	48
Tabela 10 - Comparação entre dados do reator com seus respectivos valores em regulamentação.....	53

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
INTRODUÇÃO	13
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
1.1 <i>Lâmpadas LEDs</i>	15
1.1.2 <i>Aspectos construtivos dos LEDs de potência</i>	15
1.2 <i>Formas de acionamento de lâmpadas LED</i>	17
2 CARGAS NÃO LINEARES	21
2.1 <i>Distorções harmônicas</i>	22
2.2 <i>Regulamentações sobre distorções harmônicas</i>	22
2.2.1 <i>Avaliações segundo a NBR 16026 e a NBR IEC 61347-2-13</i>	22
3 FILTROS PASSIVOS APLICADOS À REATORES ELETRÔNICOS	25
3.1 <i>Medições no reator</i>	28
3.2 <i>Modelagem da carga</i>	30
3.3 <i>Simulação da carga</i>	31
3.4 <i>Projeto e simulação dos filtros</i>	32
3.4.1 <i>Filtro passa-baixas de 2ª ordem</i>	32
3.4.2 <i>Filtro passa-baixas de 3ª ordem com filtro Rejeita-faixa em derivação de 2ª ordem</i>	34
3.4.3 <i>Filtro passa-baixas combinado com dois filtros Rejeita-faixa um em derivação e um em série, todos de 2ª ordem</i>	36
3.4.4 <i>Filtro passa-baixas de 4ª ordem combinado com três filtros Rejeita-faixa em derivação de 2ª ordem</i>	38
4 FILTRO ATIVO BOOST PFC	41
4.1 <i>Projeto do Conversor Boost</i>	42
4.1.1 <i>Cálculo do Indutor L</i>	43
4.1.2 <i>Cálculo do capacitor</i>	43
4.2 <i>Conversor Flyback</i>	43
4.2.1 <i>Projeto do conversor Flyback</i>	44
4.2.2 <i>Cálculo da indutância de magnetização</i>	45
4.2.3 <i>Cálculo do capacitor</i>	45
4.3 <i>Modelagem do reator eletrônico com o filtro ativo</i>	45
5 IMPLEMENTAÇÃO DE UM FILTRO PASSA-BAIXAS	49
CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
Referências bibliográficas	56

INTRODUÇÃO

Visando o aumento da eficiência energética e da qualidade de energia, será abordada uma das áreas onde cada vez mais se observam perdas e baixa eficiência, que é a iluminação de ambientes. Esse setor, que está crescendo por sua indiscutível necessidade, além do seu uso como decoração, representa um consumo de 20% do total de produção de energia elétrica [1].

Porém é possível melhorar a eficiência e reduzir o consumo se considerarmos um longo prazo. Isso é possível através das lâmpadas de LEDs. Estas apresentam um consumo de energia elétrica cerca de 50% menor que outros dispositivos de iluminação, além de apresentarem um tempo de vida útil de até 50.000 horas, o que as torna cada vez mais atraentes ao mercado [2].

Apesar de suas vantagens, o dispositivo ainda não tem uma ampla utilização e entre os motivos, está a sua forma de acionamento e as altas temperaturas atingidas quando em operação. As lâmpadas LEDs devem ser alimentadas por corrente contínua, o que indica a necessidade de utilização de circuitos eletrônicos para que se possa conectar tal lâmpada à rede elétrica.

O estágio de entrada dos drivers ou reatores geralmente é composto por um circuito retificador, o que os caracteriza como cargas não lineares. Consequentemente causam descontinuidade na forma de onda da corrente, indicativo para aparecimento de distúrbios como baixo fator de potência e distorções harmônicas.

É importante ressaltar o prejuízo causado por esses distúrbios para o dispositivo e para o sistema de distribuição de energia elétrica, como perdas elétricas na rede, mau funcionamento, queima dos dispositivos e redução da vida útil dos mesmos. As frequências harmônicas se caracterizam por serem componentes adicionais de corrente ou tensão que são múltiplos inteiros da frequência fundamental.

Para correção desses distúrbios nos reatores eletrônicos das lâmpadas LEDs, são implantados alguns filtros que são circuitos que têm por objetivo bloquear a passagem de algumas frequências ajustadas pelo projetista. Estes filtros podem ser classificados em passivos e ativos.

Os filtros ativos se caracterizam por serem circuitos construídos com amplificadores operacionais e transistores, gerando correntes harmônicas opostas as correntes harmônicas da

carga não linear. Já os circuitos passivos são construídos com indutores e capacitores e representam um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas.

O objetivo deste trabalho é investigar um circuito que reduza de forma considerável o conteúdo harmônico de dispositivos para acionamento de lâmpadas LEDs de alta potência utilizada em iluminação de ambientes, dando ênfase para circuitos passivos. Esse circuito deve apresentar um alto rendimento e baixa taxa de distorção harmônica. Os resultados obtidos deverão atender às exigências das normas para esses dispositivos.

Primeiramente, o trabalho apresenta uma revisão bibliográfica a respeito das características físicas e elétricas dos LEDs de alta potência para iluminação de ambientes, juntamente com os circuitos de acionamentos que possuem maior utilização e que apresentam uma alta eficiência. Essa revisão teve enfoque no funcionamento, volume e principalmente na taxa de distorção harmônica proporcionada por cada um deles.

Posteriormente através de ensaios das lâmpadas LEDs com seus respectivos reatores em laboratório foram realizados ensaios, medições e análises considerando principalmente a distorção harmônica e o fator de potência.

A partir desses dados, é feita uma análise das consequências das harmônicas causadas pelas lâmpadas LEDs de alta intensidade, seguida pela simulação e comparação entre os métodos de filtragem desses ruídos.

Então, foi implementado o circuito que através de simulações em software e em laboratório apresentou as melhores características de filtragem de harmônico e consequentemente elevou o fator de potência para níveis requeridos pelas normas.

Por fim, são feitas as medições e análise dos resultados do circuito implementado.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Lâmpadas LEDs

Os LEDs (diodos emissores de luz, do inglês Light Emitting Diodes) são dispositivos semicondutores compostos por dois materiais distintos formando uma junção P-N, que quando polarizados originam uma reação de recombinação entre os elétrons e as lacunas em um mesmo ponto, conhecido como região de depleção. Para que essa combinação entre os elétrons e as lacunas ocorra é necessário que a energia armazenada nos elétrons seja liberada em forma de luz (fótons), formando assim o princípio de funcionamento da lâmpada LED [3].

Os diodos emissores de luz, (LEDs) são basicamente dispositivos que permitem a passagem de corrente em apenas um sentido. Estes são divididos em três classes:

- **Indicativos:** Essa categoria se destaca por ser a primeira utilização dos LEDs, onde esses eram e ainda são utilizados como um sinalizador nos mais diversos equipamentos elétricos e eletrônicos.
- **Alto brilho:** Com o avanço nas pesquisas em torno das lâmpadas LEDs se chegou a um dispositivo de alto brilho, com grande utilização em decorações, sinalizadores e iluminação de emergência.
- **LEDs de Potência:** Com o desenvolvimento de LEDs que emitem luz branca consorciado com o aumento do seu fluxo luminoso, esses dispositivos começaram a ganhar espaços em iluminação de ambientes tanto internos como externos.

1.1.2 Aspectos construtivos dos LEDs de potência.

É importante ressaltar que a eficiência de um LED de potência é diretamente proporcional aos seus aspectos construtivos. Assim, sua estrutura básica se dá a partir de uma pastilha semicondutora abrigada por um encapsulamento plástico e colocada sobre um dissipador de calor. O esquemático construtivo de uma lâmpada LED de potência pode ser visualizado na Figura 1. Muitos dos estudos desenvolvidos atualmente correspondem em melhorias nos encapsulamentos dos LEDs de forma a aumentar a sua extração de luz e principalmente para dissipação de calor que se encontra ligada diretamente à vida útil da lâmpada [1] [2].

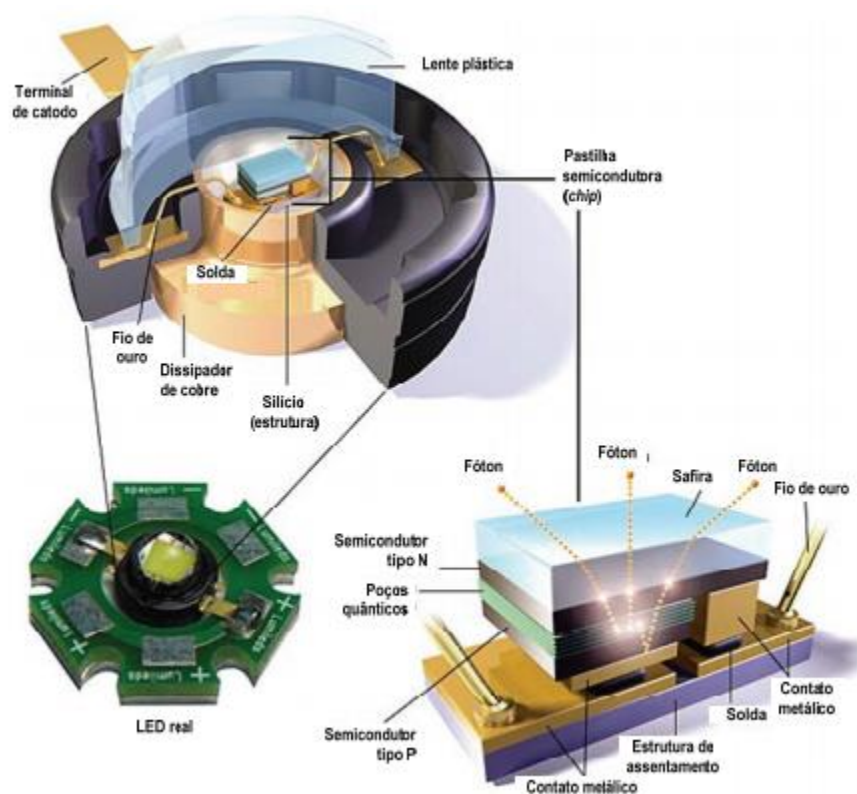


Figura 1. Esquemático de um LED chip, montado sobre um dissipador de calor (slug). (ZORPETTE, 2002)

Os LEDs tem a característica de emitir luz nas mais variadas cores. Isso pode ser obtido através do cristal e da dopagem realizada na fabricação do componente. Pode-se citar como compostos químicos bastantes utilizados na fabricação do LEDs o AlInGaP (fosfeto de alumínio, índio, gálio) que podem emitir uma luz vermelha ou amarela, dependendo da dopagem realizada.

Porém, como o foco está na área de iluminação, é de grande interesse que os LEDs apresentem uma luz branca. Esta pode ser obtida através de diferentes métodos, como a utilização de um LED na cor azul coberto por uma camada de fósforo amarelo (LED Phosphor Converted- LED PC), ou ainda utilizando um LED ultravioleta coberto com camadas de fósforo nas cores vermelho, verde e azul (LED RGB – red, green, blue) já que o conjunto dessas cores primárias geram uma cor branca [2].

Uma das grandes vantagens da substituição de lâmpadas que são utilizadas nos mais variados ambientes internos ou externos por lâmpadas LEDs encontra-se na vida útil desse dispositivo. Essa característica é definida principalmente por dois fatores: a corrente direta aplicada ao LED e a temperatura da junção. A corrente direta aplicada ao LED deve necessariamente ter um valor constante e permanecer abaixo da corrente nominal máxima

especificada pelo dispositivo. Outro fator importante é a temperatura da junção, quanto mais baixa a temperatura, maior a vida útil do mesmo. Para isso deve ser levado em consideração o projeto de dissipadores eficientes para as lâmpadas LEDs.

1.2 Formas de acionamento de lâmpadas LED.

Como já mencionado, os LEDs são classificados em três categorias: indicativos, de alto brilho e os LEDs de potência, sendo a categoria de potência a que mais está sendo pesquisada atualmente. Esse tipo de lâmpada pode ser observado na Figura 2.



Figura 2. Lâmpada formada por LEDs de potência (50 watts)

A categoria de potência tem como principal objetivo o uso em iluminação de ambientes. Sua alta eficácia luminosa e seu elevado tempo de vida útil constitui uma tendência no mercado, fazendo com que deixe de ser um simples dispositivo decorativo para tornar-se um dispositivo de iluminação pública, por exemplo, [4]. É possível ver essa utilização em grandes cidades brasileiras e principalmente em países mais desenvolvidos economicamente, já que o seu custo chega a quatro vezes um conjunto de lâmpadas de sódio, utilizadas normalmente para esta finalidade.

As lâmpadas LEDs necessitam de um drive ou reator para adequar os níveis de tensão da rede elétrica de acordo com os níveis do dispositivo, além de necessitarem de um dissipador de calor para que possam operar corretamente [5].

Existem várias formas de acionamento de LEDs, entre elas está o acionamento por uma fonte CC juntamente com um resistor para estabelecer uma baixa corrente no dispositivo, acionamento por reguladores lineares e acionamento por fontes chaveadas que compõem os reatores eletrônicos.

Alguns desses métodos não são empregados em lâmpadas LEDs de alta potência, como é o caso de um resistor em série com o LED. Isso porque esse método apresenta muitas perdas, o que justifica a utilização de circuitos ativos para seu acionamento já que estes mantêm a corrente regulada em seus terminais e assim mantêm uma alta eficiência do conjunto. Entretanto, na maioria das vezes não é dimensionado visando alta eficiência, já que ainda não há uma alta exigência sobre esse tipo de reator.

Os reatores eletrônicos têm por objetivo fornecer à lâmpada, níveis de tensão e corrente adequados de acordo com cada tipo de potência. São basicamente formados por um circuito retificador e um conversor CC/CC, [2]. O reator utilizado neste trabalho pode ser visualizado na Figura 3.

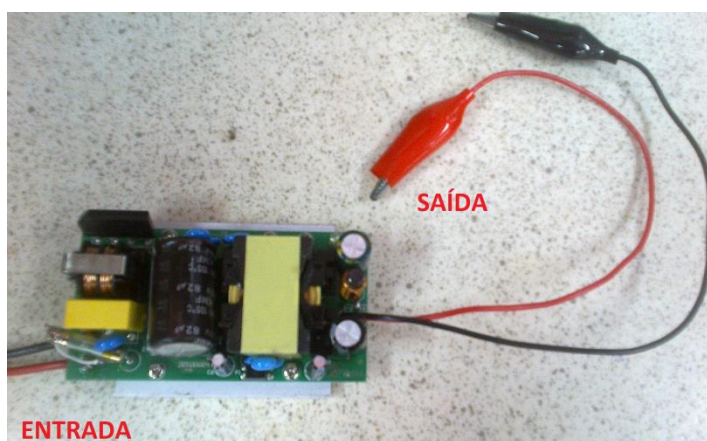


Figura 3 - Reator eletrônico da lâmpada LED de 50W.

O conversor é composto por um circuito eletrônico, o que os caracteriza como sendo cargas não lineares e conseqüentemente causam descontinuidade na forma de onda da corrente. Desse modo, são utilizados filtros com o intuito de diminuir o aparecimento de distúrbios como o baixo fator de potência e as distorções harmônicas [6].

Entre os circuitos CC/CC mais utilizados para alimentar as lâmpadas LEDs estão os conversores Buck. Estes possuem uma característica de rebaixar a tensão nos seus terminais de saída e manter uma corrente sem perturbações. Considerado como uma fonte de corrente, o circuito do conversor Buck pode ser visualizado na Figura 4.

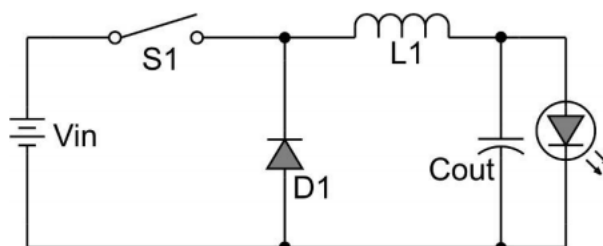


Figura 4. Circuito do conversor Buck alimentando LED.

Podemos ainda citar os conversores Boost. No entanto, esse tipo de circuito já não possui tanta utilização quanto o conversor Buck, pois possui uma corrente de saída não linear comparada a outros tipos de conversores. Este conversor tem utilidade quando é necessária uma tensão de saída maior que a tensão de entrada, porém é comum a sua utilização como filtros para correção das distorções de corrente. O seu circuito pode ser observado na Figura 5.

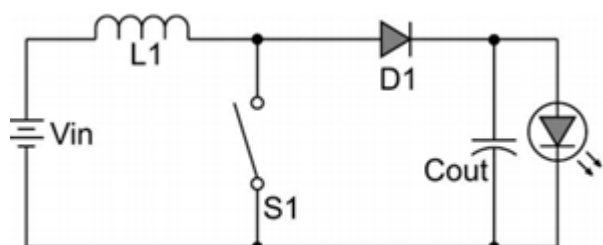


Figura 5. Circuito do conversor Boost alimentado LED.

O conversor CC-CC Forward possui o seu circuito e seus parâmetros idênticos ao conversor Buck, porém tem a vantagem de possuir isolamento galvânica entre a tensão de entrada e a tensão de saída. Assim é usado em potências mais elevadas que variam entre 100 e 200 Watts. Apresenta uma corrente de saída com baixa oscilação devido ao indutor em série com a saída. O seu circuito pode ser observado na Figura 6.

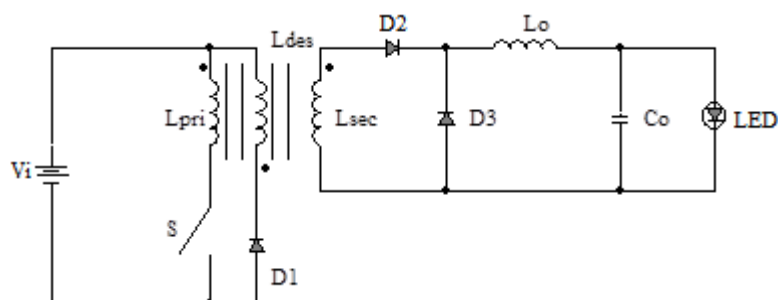


Figura 6. Circuito do conversor Forward alimentando uma lâmpada LED.

Já o conversor Flyback possui as mesmas características dos conversores Buck-Boost, ou seja, a tensão de saída é maior ou menor que a tensão de entrada, porém os conversores Flyback possuem uma isolamento entre a tensão de entrada e a tensão de saída. Este conversor é

utilizado principalmente para cargas de baixas potências. O circuito pode ser observado na Figura 7.

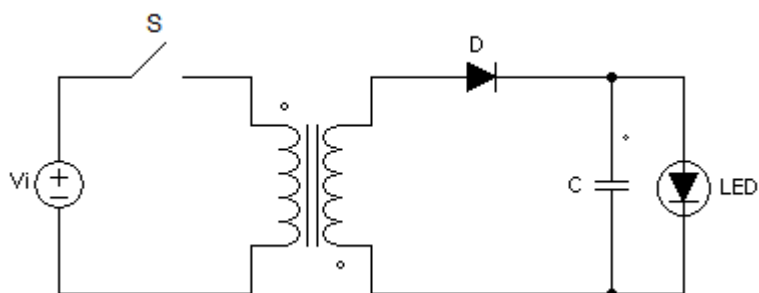


Figura 7. Circuito do conversor Flyback alimentando uma lâmpada LED.

Podem ser citados, além destes, outros circuitos conversores que também são utilizados nos reatores eletrônicos. Como por exemplo, os conversores Half-Bridge isolado, Full-Bridge isolado, Push-Pull isolado. Porém o trabalho tem o objetivo maior de apresentar alguns métodos de filtros para esses reatores de forma a aumentar as características de eficiência e vida útil da lâmpada.

2 CARGAS NÃO LINEARES

Os reatores se comportam como cargas não lineares, assim para melhor compreensão de tal característica, serão abordadas agora o princípio das cargas não lineares.

Para realizar a alimentação de determinados equipamentos, é necessário primeiramente realizar o controle da forma de onda a fim de otimizar o consumo de energia. Para isso, utilizam-se componentes operando em modo de condução e interrupção como, por exemplo, transistores e diodos, distorcendo a forma de onda da corrente.

Como exemplos de cargas não lineares podemos citar, além dos reatores eletrônicos de lâmpadas, as fontes chaveadas para computadores, variadores de velocidade para motores de corrente contínua e motores assíncronos e carregadores de baterias, [7].

Toda relação de corrente e tensão em um componente que não pode ser descrita através de uma equação linear é então chamada de não linear. A figura a seguir exemplifica uma carga não linear conectada à rede.

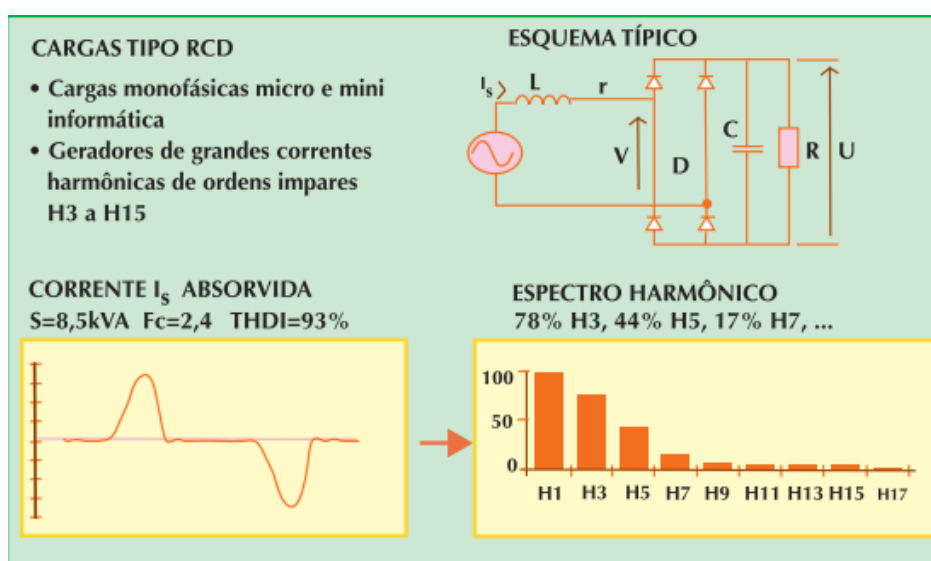


Figura 8. Forma de onda da corrente e FFT de uma carga não linear. (Fonte: Harmônicas nas Instalações Elétricas. Causas, defeitos e soluções. PROCOBRE)

Observando a Figura 8, é possível observar a grande quantidade de harmônicas que esse tipo de carga está injetando na rede. Assim, é de grande importância o estudo de filtros para que se obtenha um bom desempenho do equipamento e principalmente atender aos critérios de qualidade de energia.

2.1 Distorções harmônicas

A deformação na forma de onda é dita como harmônica quando se é observada uma distorção de forma similar em todos os ciclos da frequência fundamental. A distorção se dá devido à presença de ondas com diferentes frequências da onda fundamental e são produzidas por cargas não lineares, como é observado em conversores eletrônicos, pontes retificadoras e compensadores estáticos.

As harmônicas que causam maior distorção na forma de onda da corrente são as de ordem ímpar, tendo uma maior distorção para formas de onda fundamental com menor frequência. Essas têm influência direta com a qualidade de energia elétrica fornecida, pois, as harmônicas podem influenciar no fator de potência, na demanda de energia do sistema, na taxa de distorção harmônica e ainda nos valores efetivos de pico da corrente da carga [8], [9].

Para a quantização das harmônicas é utilizado o índice THD (Total Harmonic Distortion) que é a medida da distorção do sinal na saída do equipamento em relação ao sinal de entrada do equipamento e é definido por:

$$THDi = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} * 100(\%) \quad (1)$$

Onde:

THDi = Distorção harmônica total de corrente

In= Valor eficaz da corrente de ordem n

I1= Valor eficaz da corrente fundamental

n = ordem da componente harmônica

2.2 Regulamentações sobre distorções harmônicas

Entre as normas que regulamentam o assunto podem ser citadas o PRODIST (Procedimento de distribuição de Energia Elétrica no sistema Elétrico Nacional), que estabelece valores de referência para as distorções totais e individuais de tensão, porém não será aprofundado no trabalho já que o mesmo dá ênfase para as harmônicas de corrente.

2.2.1 Avaliações segundo a NBR 16026 e a NBR IEC 61347-2-13

Há um grande avanço da tecnologia de iluminação LED, porém ainda não há uma grande normatização quanto a sua utilização e produtos fabricados no mercado, o que faz com que os

reatores estejam sendo projetados sem cuidados com relação à distorção harmônica e baixo fator de potência.

No ano de 2012, começaram a surgir algumas normas para esse tipo de lâmpada e seu respectivo drive, como é o caso da NBR 16026 - Requisitos de desempenho de dispositivo de controle eletrônico CC ou CA para módulos de LED [10] e a NBR IEC 61347-2-13 - Requisitos particulares para dispositivos de controle eletrônico alimentados em CC ou CA para os módulos de LED [11].

Essas normas propõem ensaios a serem realizados com o drive e com a lâmpada LED, como ensaios de durabilidade, umidade e resistência de isolamento, entre outros, porém este trabalho vai dar ênfase para os ensaios de características elétricas de funcionamento.

- Máxima variação de potência de entrada: Na tensão nominal de alimentação, a potência total de entrada do drive não deve exceder 10% do valor declarado pelo fabricante.
- Fator de Potência: Para dispositivos com potência maior ou igual a 25 watts o fator de potência deve ser maior ou igual a 0,92.
- Máxima variação de corrente de entrada: a corrente de entrada do drive não deve exceder 10% da declarada pelo fabricante.
- Máxima variação de tensão de saída durante partida: Na partida a tensão de saída do drive não pode exceder 10% do seu valor nominal dentro de 2 segundos.
- Máxima variação de tensão de saída em regime de operação: Na tensão nominal de alimentação, a tensão de saída do drive não pode apresentar variação superior à $\pm 10\%$.

Um dos pontos estudados e de grande importância é o nível de distorção harmônica proporcionado pelo circuito eletrônico. Para este parâmetro é seguida a norma apresentada a seguir.

A norma IEC 61000-3-2 apesar de não ser específica para lâmpadas LEDs, abrange os equipamentos de iluminação como um todo em uma de suas classes. Refere-se às limitações das harmônicas de corrente injetadas na rede pública de alimentação e limita a emissão de harmônicas por equipamento de corrente alternada de 50 ou 60 Hz alimentados com tensão de fase de 220 à 240V e com corrente de entrada menor que 16A por fase. Abrange quatro classes de equipamentos elétricos e eletrônicos que podem ser visualizados a seguir: [12]

- **Classe A:** Equipamentos trifásicos equilibrados, aparelhos de uso doméstico, ferramentas e todos os demais não incluídos nas classes seguintes.
- **Classe B:** Ferramentas portáteis.
- **Classe C:** Equipamentos de iluminação.
- **Classe D:** Computadores, monitores de vídeo, aparelhos de televisão.

Na tabela 1 podem ser observados os limites para as harmônicas de corrente de acordo com a classe C de equipamentos de iluminação.

Tabela 1 - Limites para harmônicos de corrente

Ordem n	Classe C (> 25W) % da Fundamental
Harmônicas ímpares	-
3	30xFP
5	10
7	7
9	5
11	3
13	3
$15 \leq n \leq 39$	3
Harmônicas pares	-
2	2
4	-

3 FILTROS PASSIVOS APLICADOS À REATORES ELETRÔNICOS

A Figura 9 ilustra, como exemplo, a THD (Total Harmonic Distortion) de uma lâmpada de 50 watts obtida com o analisador de qualidade de energia KEW 6310, sendo que o valor da distorção harmônica chega a 170,3%. Assim, é possível observar que o circuito de acionamento dessa lâmpada não foi projetado levando em consideração a THD e assim não possui nenhum tipo de filtro.

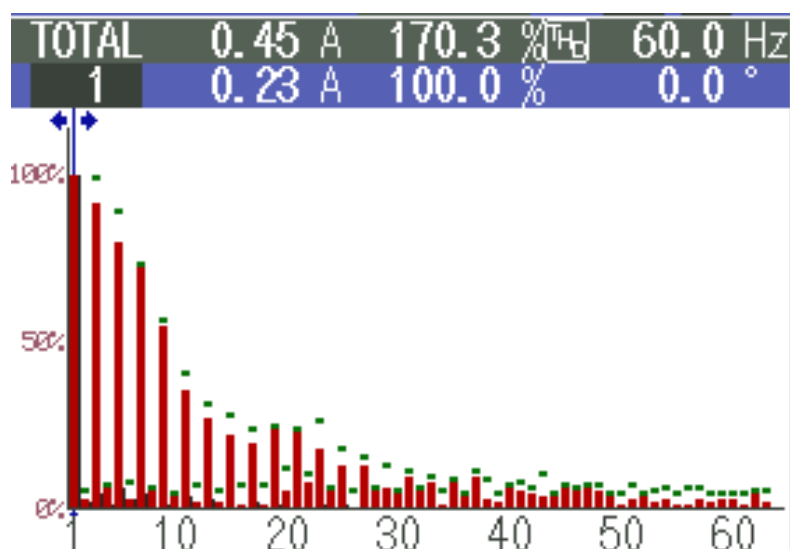


Figura 9. FFT da forma de onda da corrente (reator eletrônico sem filtro).

Os filtros têm a finalidade de impedir a passagem de correntes com frequências diferentes da fundamental, estas são conhecidas como harmônicas, que somadas à forma de onda da corrente fundamental geram uma forma de onda distorcida. Assim é possível ver a importância dos filtros em reatores eletrônicos, observando a figura acima. Esses circuitos podem ser passivos (capacitores e indutores) ou ativos (amplificadores operacionais e transistores).

Os filtros passivos são os meios de filtragem de harmônicos mais comuns e baratos encontrados e por serem circuitos baseados em indutores, capacitores e resistores apresentam uma característica de robustez, com elevado tamanho e peso.

Estes filtros têm por princípio de funcionamento gerar um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas indesejáveis [13].

Para fins de análise, podemos citar os filtros Passivos passa-baixas de 2ª ordem. Esse filtro tem a característica de eliminar as frequências que são superiores à frequência estabelecida no projeto. Apresenta um valor considerável de atenuação, porém, para alguns

tipos de reatores, não atende às recomendações da IEEE que estabelece um THDi de no máximo 20%. Segundo os resultados obtidos em simulações por [14], foi obtida um valor de 26,79% da THDi para um reator de lâmpada fluorescente com THDi igual a 43,3% utilizando este filtro.

No projeto do filtro passa-baixas de 2ª ordem apresentado por [14], é estipulada a frequência de corte e são atribuídos valores para o capacitor. Posteriormente através de equação 2, é encontrado o valor do indutor. Na Figura 10 pode ser observado o circuito do filtro passa-baixas.

$$L = \frac{1}{(2\pi \cdot f)^2 \cdot C} \quad (2)$$

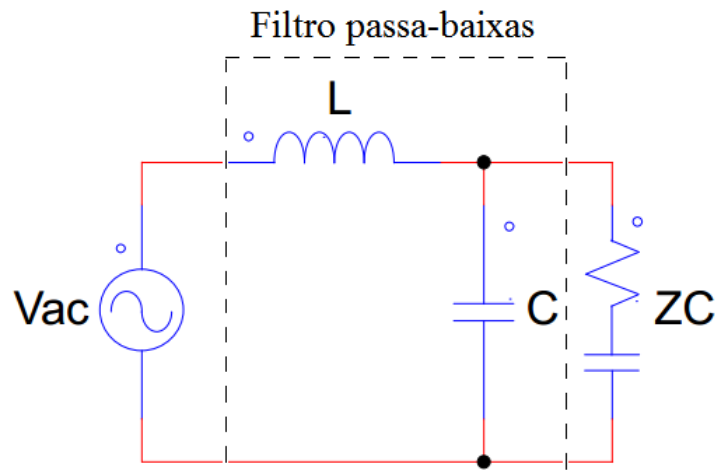


Figura 10. Circuito passa-baixas de 2ª ordem.

Já o filtro passivo passa-baixas, combinado com filtro Rejeita-Faixa em derivação, ambos de 2ª ordem, consegue eliminar uma quantidade considerável de harmônicas, quando comparado com o filtro passa-baixas de segunda ordem operando sem outro circuito. Seu princípio de funcionamento baseia-se na operação do circuito passa-baixas, atenuando a amplitude das frequências acima da sua frequência de corte. Posteriormente o filtro rejeita-faixa anula a harmônica que tiver o mesmo valor da sua frequência de ressonância. Para o mesmo reator simulado com o filtro passa-baixas de 2º ordem, este filtro apresenta uma redução do THD para 2,71% [14] [15], [16]. O circuito do filtro é apresentado na Figura 11.

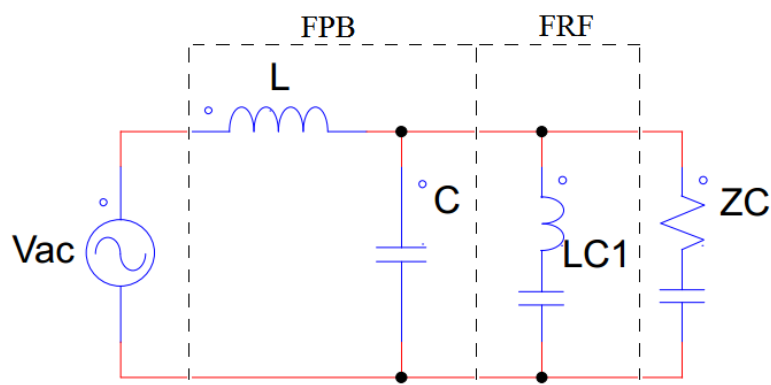


Figura 11. Filtro passa-baixas combinado com filtro Rejeita-faixa em derivação ambos de 2ª ordem.

Os filtros Passivos Valley-Fill tem uma característica de minimizar os esforços de tensão e de corrente que são proporcionados pelo carregamento do capacitor do reator, que usualmente gera altos níveis de distorções harmônicas. Este filtro realiza a correção aumentando o intervalo de tempo em que é drenada a corrente pelo reator.

Considerado muito simples e barato, quando comparados com circuitos muito utilizados como os filtros ativos boost, porém possui a desvantagem de deixar a tensão com ondulações já que a tensão retificada tem uma filtragem parcial. Segundo [15] este circuito atende às exigências da norma para THD, porém apresenta um valor de fator de crista na corrente da lâmpada elevado. Assim, deve ser modificado com modulação na frequência da tensão de entrada para lâmpadas fluorescentes. O circuito do filtro Valley-Fill pode ser visualizado na Figura 12 [17].

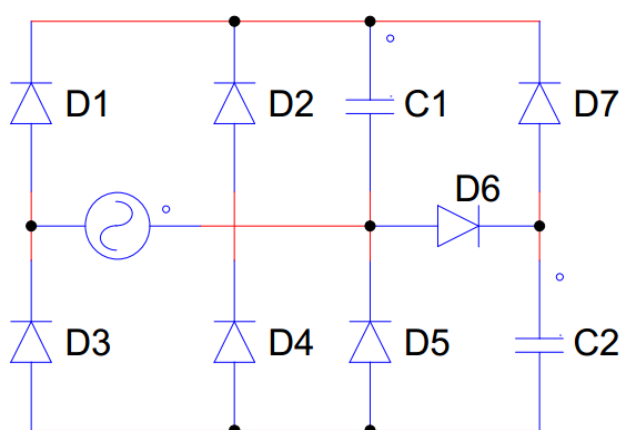


Figura 12. Filtro Valley-Fill.

3.1 Medições no reator

Para obtenção dos dados do reator eletrônico da lâmpada LED de 50 watts, foi utilizado o analisador de qualidade de energia KEW 6310 da KYORITSU ELECTRICAL INSTRUMENTS WORKS LTD para obter a amplitude e ângulo das componentes harmônicas juntamente com o osciloscópio YOKOGAWA para obtenção da forma de onda da corrente.

Os dados obtidos podem ser visualizados na Tabela 2:

Tabela 2 - Dados de distorção harmônica no reator eletrônico

Ordem	THDi = 170,3%		Irms = 0,45 A	
	Modulo %	Ângulo	Irms	Frequência
1	53,7	0	0,226	60
3	50	160	0,21	180
5	43,7	-30	0,183	300
7	35,4	135	0,148	420
9	26	-51	0,11	540
11	18,2	121	0,076	660
13	11,6	-50	0,05	780
15	8,3	142	0,034	900
17	7,2	-18	0,031	1020
19	7,4	170	0,03	1140
21	7	-5	0,03	1260
23	6	177	0,025	1380
25	5,1	4	0,021	1500
27	4,4	-163	0,016	1620
29	4,2	41	0,016	1740
31	4,2	-137	0,016	1860
33	3,8	46	0,016	1980
35	3,4	-135	0,013	2100

37	2,7	50	0,011	2220
39	2,4	-130	0,01	2340
41	2,1	77	0,009	2460
43	1,8	-105	0,008	2580
45	1,7	80	0,007	2700
47	1,5	-82	0,006	2820
49	1,4	89	0,006	2940
51	1,1	-90	0,005	3060

A forma de onda da corrente obtida no osciloscópio YOKOGAWA, deste mesmo reator pode ser visualizada na Figura 13, já na Figura 14 está demonstrada a FFT do mesmo.



Figura 13. Forma de onda da corrente do reator eletrônico para lâmpada de 50W.

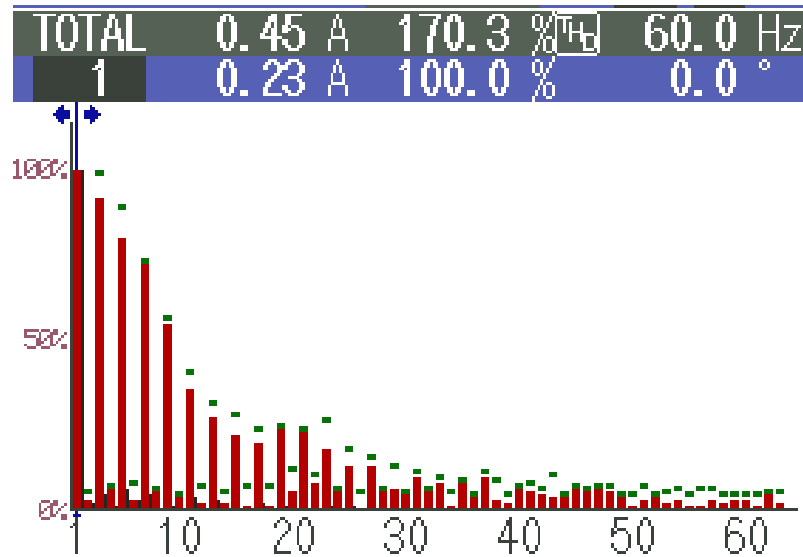


Figura 14. FFT da forma de onda da corrente no reator (lâmpada de 50W).

3.2 Modelagem da carga

A impedância da carga foi calculada utilizando o valor do módulo da corrente com a respectiva fase na frequência fundamental e o valor da tensão de entrada do reator com fase 0° através da expressão (3). Como o reator apresenta fator de potência adiantado, a representação da carga se dá através de um resistor e um capacitor em série.

$$Z_{carga} = \frac{V \angle \theta}{I \angle \phi} = \frac{220 \angle 0}{0,226 \angle 0,523} = 973,4 - j8,88 \Omega \quad (3)$$

O valor do capacitor é encontrado através da expressão (4) e pode ser observado a seguir:

$$C = \frac{1}{X_{carga} \cdot \omega} = 298,8 \mu\text{F} \quad (4)$$

Deste modo, o reator eletrônico estará representado, para fins de simulação em software, por uma resistência de $973,4 \Omega$ em série com um capacitor de $298,8 \mu\text{F}$ juntamente com as harmônicas representadas por fontes de correntes com amplitude e ângulo de cada ordem da harmônica obtidos em laboratório e apresentados na Tabela 2.

O circuito desenvolvido no software PSIM® que representa o reator eletrônico da lâmpada LED de 50 watts pode ser observado na Figura 15, e é representado por uma fonte de tensão e a carga não linear é representada por uma resistência, um capacitor e fontes de correntes que caracterizam as harmônicas ímpares.

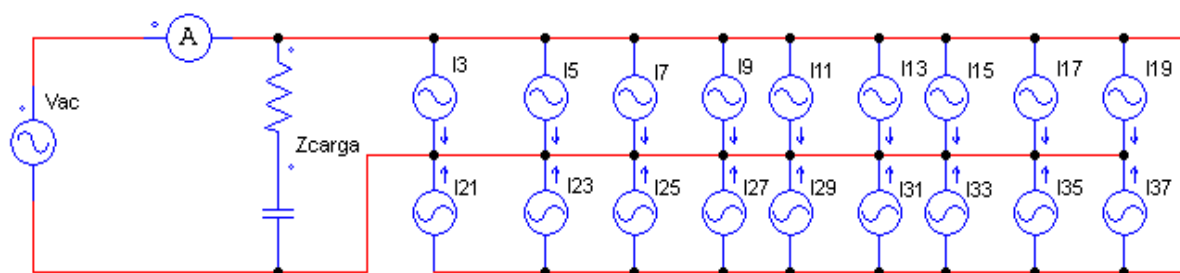


Figura 15. Circuito modelado no software PSIM da carga não linear com suas respectivas harmônicas.

3.3 Simulação da carga.

Para fins de comparação entre os dados e as formas de onda obtidas no experimento são apresentados a seguir a forma de onda e a FFT da corrente na carga simulada no software PSIM. É possível observar a similaridade entre a Figura 16 (forma de onda obtida em software) com a Figura 13 (forma de onda obtida em laboratório).

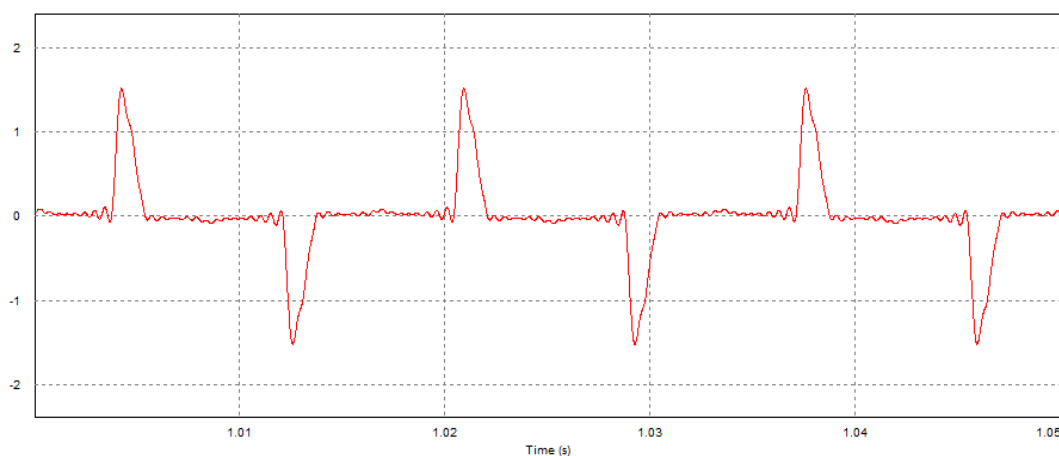


Figura 16. Forma de onda da corrente obtida na modelagem da carga (amplitude dada em ampère),

O reator modelado em software apresenta uma THDi de 156,6% que aproxima o valor real do reator que é 170,3%. A diferença se dá pelo número de harmônicas considerados, no caso as harmônicas ímpares da 3ª até a 37ª ordem, sendo essas as harmônicas que apresentam um alto grau de interferência na forma de onda fundamental.

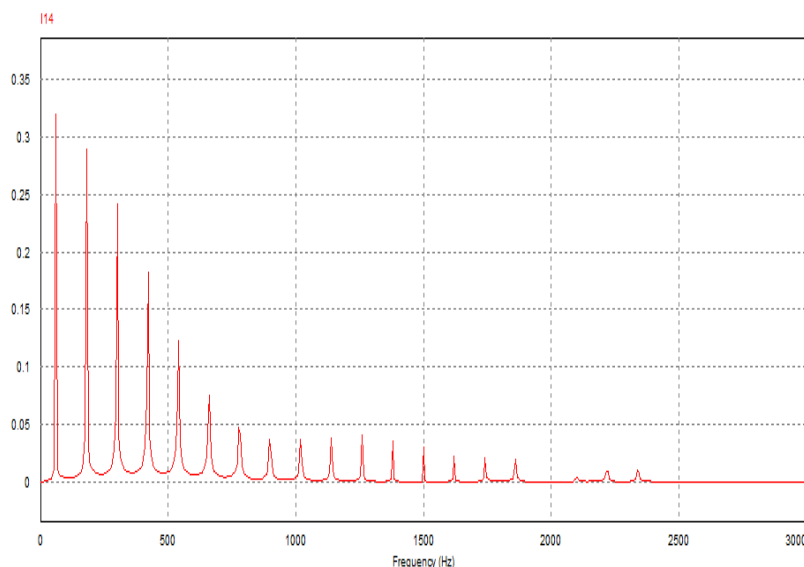


Figura 17. FFT da forma de onda da corrente na carga modelada em software.

3.4 Projeto e simulação dos filtros

Diante da modelagem da carga foram possíveis os testes com algumas das topologias de filtros passivos. São apresentados os cálculos dos filtros de modo que os mesmos garantam o funcionamento do reator de acordo com especificações determinadas pela norma IEC 61000-3-2. Considerando principalmente o volume do filtro a ser projetado.

Com a modelagem dos filtros no programa de simulação é possível realizar a comparação entre as topologias e assim, determinar um filtro passivo que apresente grande atenuação de harmônicas, alto rendimento e menor volume para que seja desenvolvido o protótipo em laboratório.

3.4.1 Filtro passa-baixas de 2^a ordem.

Para a análise do filtro passa-baixas foi utilizada uma frequência de corte (F_c) de 110 Hz já que o seu princípio de funcionamento, de forma idealizada, baseia-se na passagem das frequências inferiores à frequência de corte e na atenuação das frequências superiores à frequência de corte.

O filtro foi testado com diferentes valores de frequência de corte, capacitor e indutor. Após a realização de uma série de simulações observou-se que para os valores de indutor igual a 261 mH e um valor de capacitor estipulado de 8 μ F foram obtidos resultados

satisfatórios. Os mesmos encontram-se caracterizados nas figuras 18 e 19. Para determinar o valor do Indutor foi utilizada a expressão (5) apresentada a seguir.

$$L = \frac{1}{((2\pi f_c)^2)C} = \frac{1}{((2\pi * 110)^2) * 8 * 10^{-6}} = 261 \text{ mH} \quad (5)$$

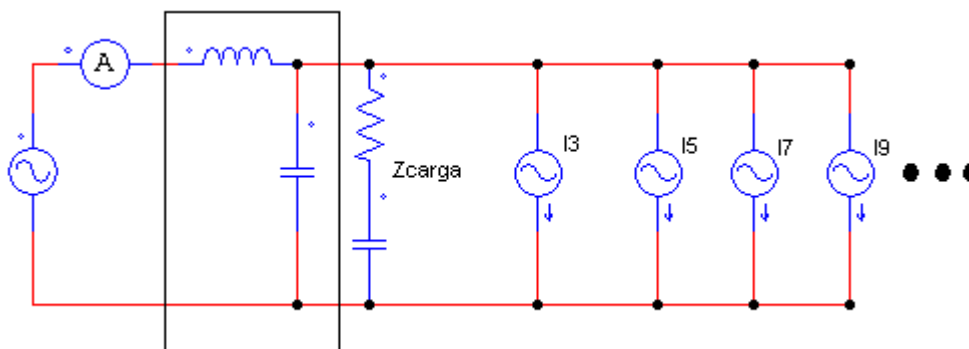


Figura 18. Circuito da carga não-linear com o filtro passa-baixas de segunda ordem.

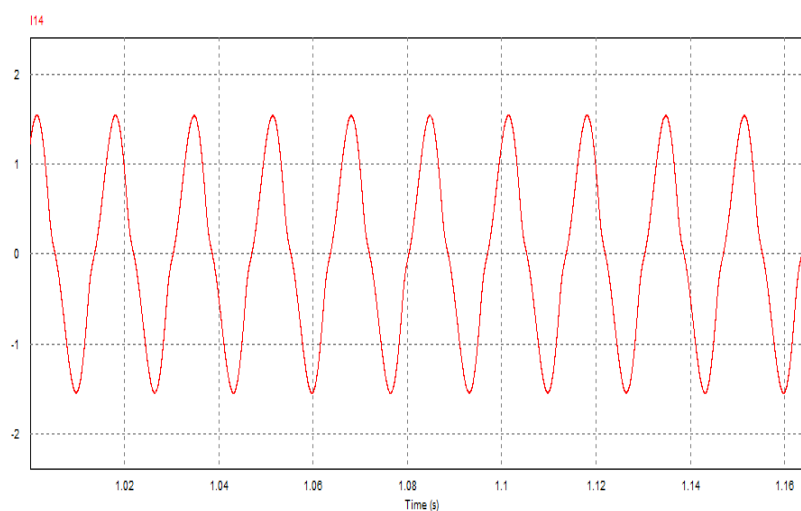


Figura 19. Forma de onda da corrente com o filtro (amplitude dada em ampère).

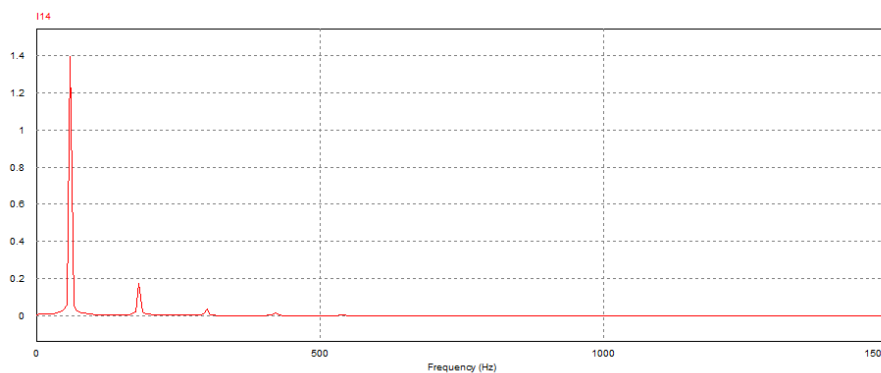


Figura 20. FFT da forma de onda da corrente com o filtro passa-baixa de 2ª ordem.

Diante da forma de onda da corrente filtrada é possível fazer a comparação com a forma de onda da corrente sem filtro (Figura 13), podendo ser destacada uma menor distorção da forma de onda da corrente, além de uma redução no THDi observado na Figura 19. O THDi sem o filtro era de 170,3%, já com o filtro o valor reduziu para 12,81%, diante desse valor é possível calcular o valor do fator de potência do reator através da fórmula 6.

$$FP = \frac{\cos\theta}{\sqrt{1+THD^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+0,1281^2}} = 0,991 \quad (6)$$

Com o filtro é possível ver o aumento no fator de potência que primeiramente era de 0,507 (reator sem filtro), para 0,991 (reator com filtro), com o valor de fator de potência podemos verificar se o reator encontra-se de acordo com a norma IEC 61000-3-2, que estipula níveis de distorções de acordo com a ordem de cada harmônica.

Na tabela 3 são apresentados os valores de amplitude das componentes harmônicas de maior influência obtida através da simulação utilizando o filtro, em comparação com seus respectivos valores de amplitude máxima permitida pela norma IEC 61000-3-2.

Para o filtro passa-baixas de 2ª ordem testado, foi observado uma redução considerável na amplitude das harmônicas, porém o filtro possui um alto volume por apresenta um indutor de 261 mH, que como pode ser observado ainda, o reator apresenta valores altos para as componentes harmônicas de mais baixa ordem, como o caso da harmônica de 3ª ordem.

Tabela 3 - Comparação entre dados do reator com seus respectivos valores em regulamentação

	Magnitude da fundamental	Magnitude das harmônicas (A)					THD
		3ª	5ª	7ª	9ª	11ª	
Reator com filtro	1,32	0,16	0,033	0,011	0,005	0,0018	12,81
IEC 61000-3-2	<16 A	0,39	0,132	0,092	0,066	0,039	-

3.4.2 Filtro passa-baixas de 3ª ordem com filtro Rejeita-faixa em derivação de 2ª ordem

A topologia a seguir consiste de um filtro passa-baixas de 3ª ordem juntamente com um filtro sintonizado, em paralelo com a carga, de 2ª ordem. Para os cálculos é usada a mesma expressão 2 agora com frequências de cortes de 180, 300 e 500 Hz e com capacitores de 6 µF.

$$L = \frac{1}{((2\pi f_c)^2)C} = \frac{1}{((2\pi*180)^2)*6*10^{-6}} = 130 \text{ mH} \quad (7)$$

Os valores dos indutores calculados são de 130, 47 e 17 mH. As topologias testadas tem o intuito de reduzir o volume do filtro, assim, é necessária a redução do valor do indutor.

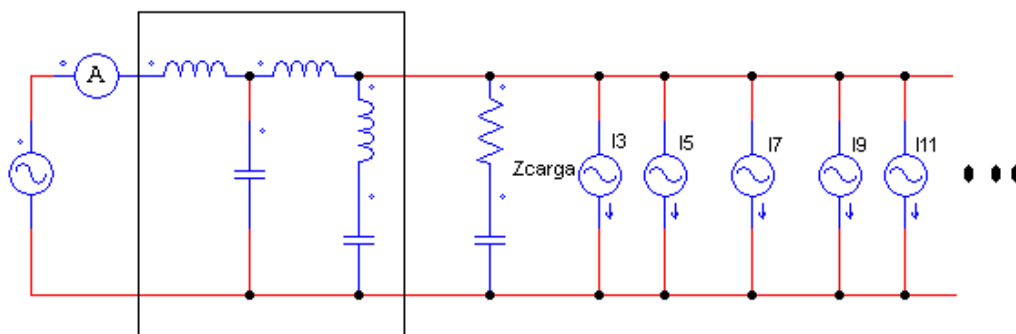


Figura 21. Circuito que representa a carga não-linear com um filtro passa-baixas de 3ª ordem combinado com um filtro rejeita faixa de 2ª ordem.

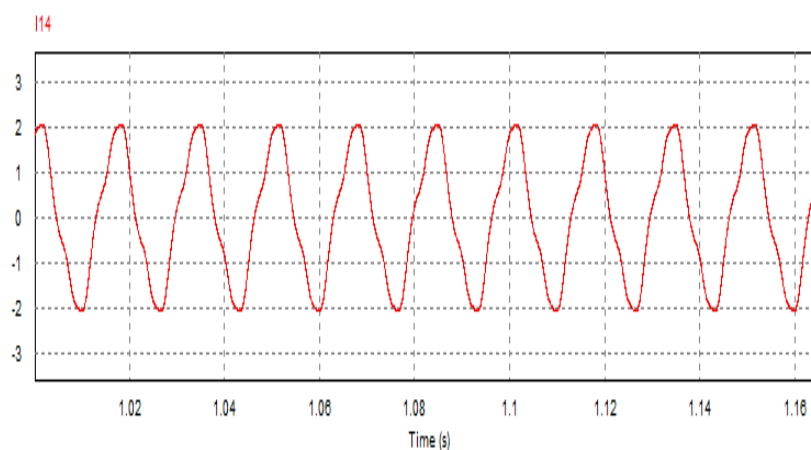


Figura 22. Forma de onda da corrente com o filtro (amplitude dada em ampère).

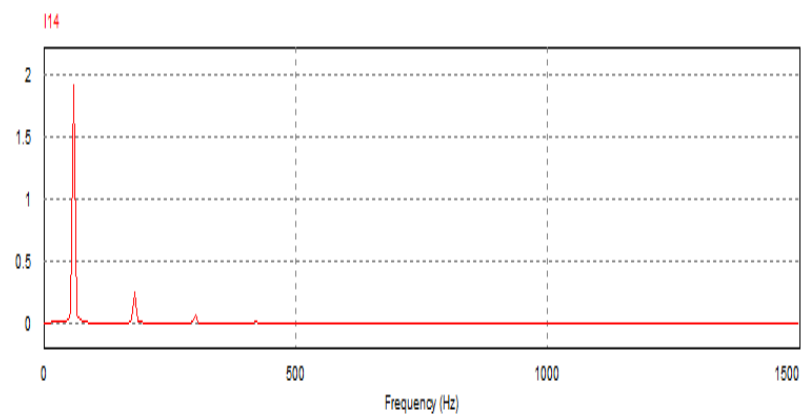


Figura 23. FFT da forma de onda da corrente um filtro passa-baixas de 3ª ordem combinado com um filtro rejeita faixa de 2ª ordem

A topologia apresentada reduziu o THDi do reator eletrônico para um valor de 14,01% porém em comparação com o filtro passa-baixas de 2ª ordem possui um nível de distorção maior. Como o objetivo é reduzir o volume, podemos dizer que esse filtro, apesar da taxa de distorção, possui vantagem sobre o anterior, considerando uma soma da indutância total utilizada obtemos o valor de 194 mH.

O cálculo do FP é apresentado a seguir e o resultado encontra-se dentro do recomendado pela norma.

$$FP = \frac{\cos\theta}{\sqrt{1+THD^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+0,1401^2}} = 0,9903 \quad (8)$$

A seguir encontra-se a tabela com a comparação dos valores das amplitudes de suas respectivas harmônicas de maior interferência com os valores estipulados pela norma. Diante desta é possível observar que o filtro atende os valores estipulados pela norma.

Tabela 4 - Comparação entre dados do reator com seus respectivos valores em regulamentação

	Magnitude da fundamental	Magnitude das harmônicas (A)					THD
		3ª	5ª	7ª	9ª	11ª	
Reator com filtro	1,8	0,23	0,061	0,023	0,0018	0,001	14,01
IEC 61000-3-2	<16 A	0,53	0,18	0,126	0,09	0,054	-

3.4.3 Filtro passa-baixas combinado com dois filtros Rejeita-faixa um em derivação e um em série, todos de 2ª ordem.

O filtro a seguir trata-se de um filtro em série, o que o diferencia dos filtros já citados anteriormente, porém para fins de cálculo dos componentes é utilizada a mesma expressão 2.

Foram utilizadas as frequências de corte de 180, 300 e 400 Hz, por apresentarem, através de testes, melhores resultados.

Com o valor das frequências de cortes e utilizando um capacitor de 7 µF foram encontrados os valores de 130, 26 e 40mH para os indutores. A configuração do filtro é apresentada na figura a seguir.

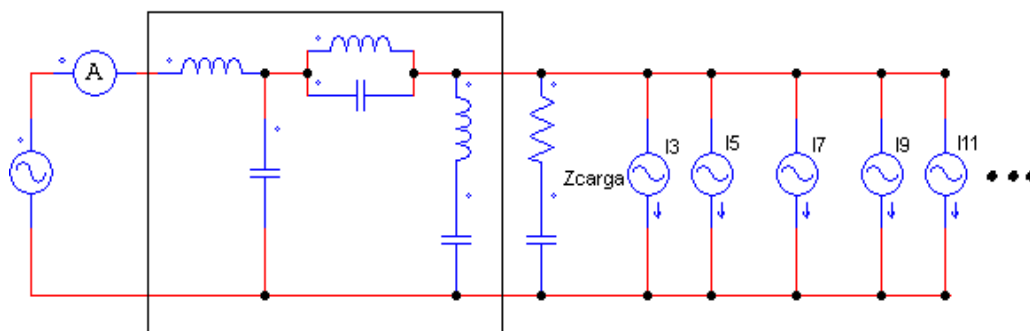


Figura 24. Circuito que representa a carga não linear com um filtro passa-baixas combinado com dois filtros rejeita-faixa um em derivação e um em série, todos de 2ª ordem.

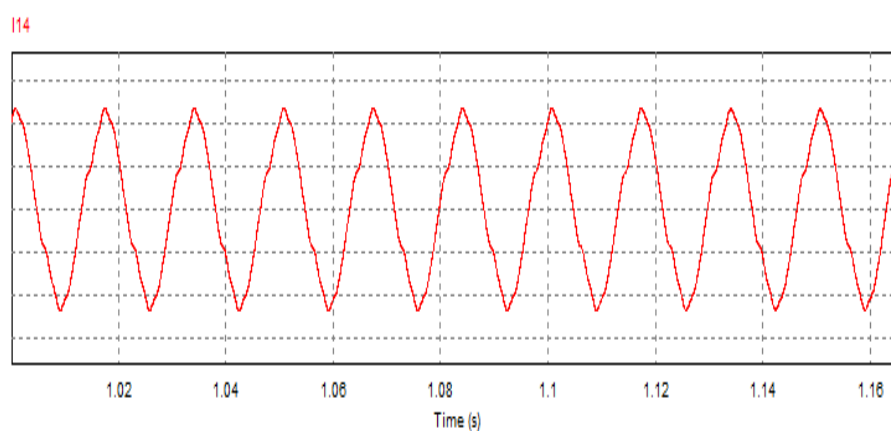


Figura 25. Forma de onda da corrente com o filtro (amplitude dada em ampère).

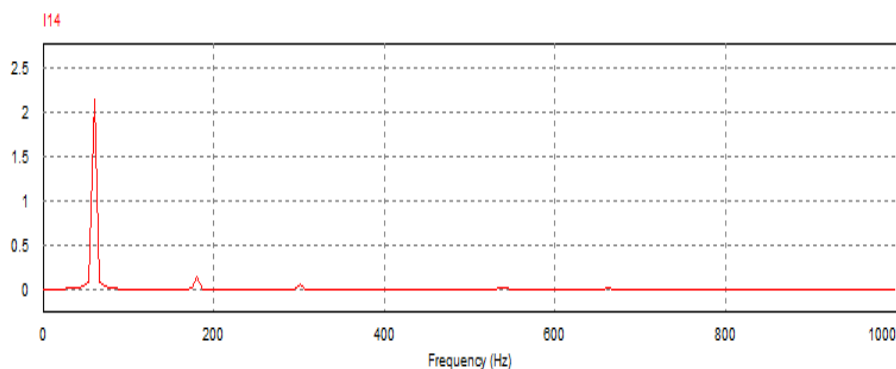


Figura 26. FFT da forma de onda da corrente na com o filtro passa-baixas combinado com dois filtros rejeita-faixa um em derivação e um em série, todos de 2ª ordem.

Essa topologia apresentou uma redução do THDi no reator eletrônico para um valor de 8,75% porém possui um valor total de indutância maior que o filtro anterior. O cálculo do FP é apresentado a seguir.

$$FP = \frac{\cos\theta}{\sqrt{1+THD^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+0,0875^2}} = 0,996 \quad (9)$$

O FP encontra-se dentro do recomendado pela norma que é de 0,92.

A seguir encontra-se a tabela com a comparação dos valores das amplitudes de suas respectivas harmônicas de maior interferência e os valores estipulados pela norma. Com a topologia de filtro testada, também foi possível observar que o mesmo encontra-se dentro dos limites estipulados pela norma.

Tabela 5 - Comparação entre dados do reator com seus respectivos valores em regulamentação

	Magnitude da fundamental	Magnitude das harmônicas (A)					THD
		3ª	5ª	7ª	9ª	11ª	
Reator com filtro	2,07	0,15	0,061	0,0076	0,027	0,018	8,75
IEC 61000-3-2	<16 A	0,61	0,2	0,14	0,1	0,062	-

3.4.4 Filtro passa-baixas de 4ª ordem combinado com três filtros Rejeita-faixa em derivação de 2ª ordem.

A topologia apresentada a seguir é composta por um filtro passa baixas de quarta ordem combinado com três filtros sintonizados. As frequências de corte utilizadas para os cálculos são: 180; 300; 420; 500; 600 Hz. O capacitor estipulado foi de 2 µF; Os indutores foram calculados pela expressão 10 apresentada a seguir.

$$L = \frac{1}{((2\pi f_c)^2)C} = \frac{1}{((2\pi*180)^2)*2*10^{-6}} = 391 \text{ mH} \quad (10)$$

Os indutores calculados são de 391, 140, 71, 50, 35 mH. A configuração do filtro é apresentada na figura 27.

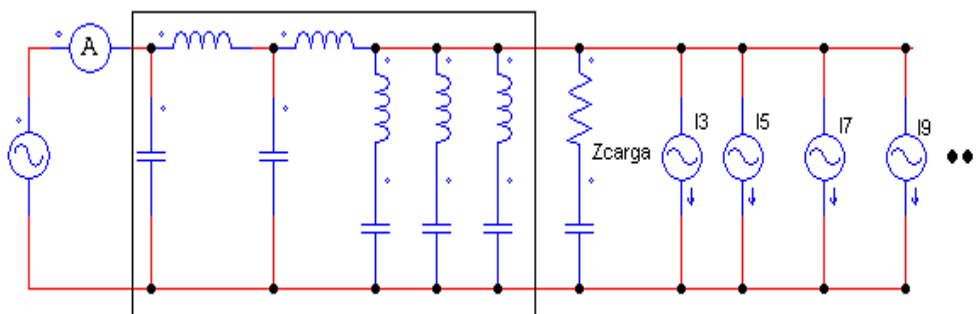


Figura 27. Circuito que representa a carga não linear com um filtro passa-baixas de 4ª ordem combinado com três filtros rejeita-faixa de 2ª ordem.

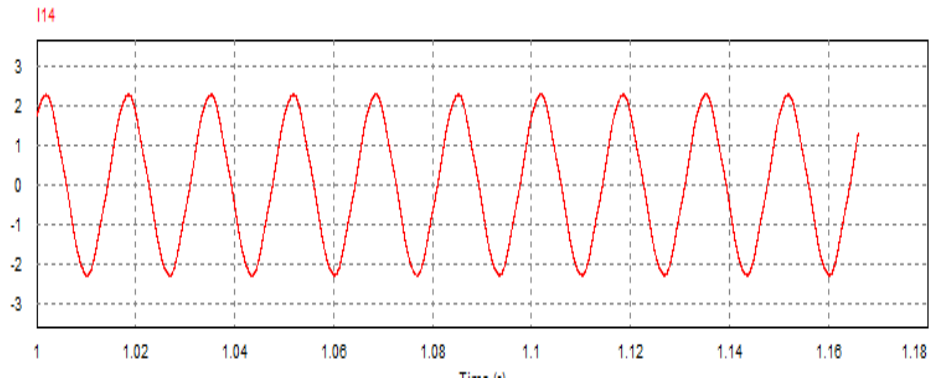


Figura 28. Forma de onda da corrente com o filtro (amplitude dada em ampère).

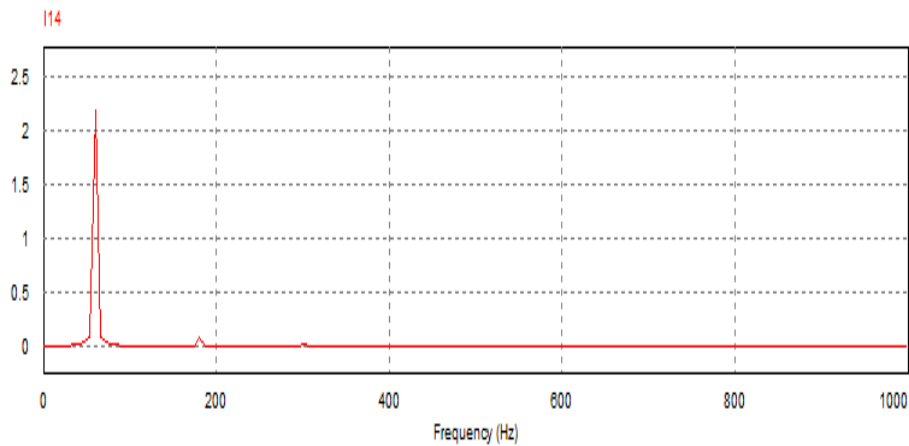


Figura 29. FFT da forma de onda da corrente com um filtro passa-baixas de 4ª ordem combinado com três filtros rejeita-faixa de 2ª ordem.

Para fins de testes, nessa topologia foi desconsiderada a análise de volume do reator, dessa forma utilizando-se altos valores de indutor. Esta abordagem apresentou uma alta atenuação de harmônicas. O THDi encontrado foi de 4,23% e o fator de potência aproxima-se ainda mais do valor unitário.

$$FP = \frac{\cos\phi}{\sqrt{1+THD^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+0,0423^2}} = 0,999 \quad (11)$$

A Tabela 6 apresenta os valores das magnitudes das harmônicas de maior interferência em comparação com as permitidas pela norma. Observa-se a grande redução nas amplitudes das harmônicas, em comparação com os valores permitidos pela norma.

Tabela 6 - Comparação entre dados do reator com seus respectivos valores em regulamentação

	Magnitude da fundamental	Magnitude das harmônicas (A)					THD
		3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	
Reator com filtro	2,11	0,081	0,03	0,002	0,0025	0,0012	4,23
IEC 61000-3-2	<16 A	0,632	0,21	0,14	0,1	0,063	-

Neste capítulo foram apresentados os dados do reator eletrônico de uma lâmpada LED de 50W sem filtragem de harmônicas. Com estes dados foi realizada a simulação dessa carga no software PSIM a fim de conduzir um estudo e verificação da utilização de filtros passivos para atenuação de harmônicos e para o aumento da eficiência do reator eletrônico.

Como demonstrado, a utilização de filtros passivos em reatores eletrônicos de lâmpadas LED apresentou uma atenuação considerável de harmônicas, bem como a correção do valor de fator de potência. As simulações dos filtros possibilitaram ainda a comparação dos dados de distorções com os dados estipulados pela norma IEC 61000-3-2. Dessa forma foi possível verificar se estes são eficientes de um ponto de vista de qualidade de energia, o que também apresentou resultados satisfatórios.

Foi imposta uma metodologia de redução de volume dos filtros através da redução do volume do indutor, variando as frequências de corte e acrescentando filtros sintonizados no dimensionamento de cada filtro, porém ainda é possível observar através dos valores dos componentes, que os filtros passivos apresentam um grande volume para atenuação de frequências mais baixas, tornando uma solução pouco usual para esse tipo de reator eletrônico.

Assim, com o intuito de realizar mais algumas comparações, será simulado um circuito ativo para atender a proposta de correção de fator de potência e atenuação das harmônicas. O mesmo será apresentado no capítulo seguinte.

4 FILTRO ATIVO BOOST PFC

Como observado anteriormente, os filtros passivos apresentam um grande volume quando projetados para operar em baixas frequências (abaixo de 1 kHz), o que os tornam uma solução pouco usual para regulação de apenas um reator.

Assim, é interessante realizar uma comparação com um filtro ativo muito usado para correção de fator de potência em dispositivos com potência abaixo de 2kW, que seria o pré-regulador Boost operando em modo de correção de fator de potência (PFC). Este apresenta um baixo volume e grande atenuação das harmônicas de baixa ordem, estas que por sua vez são responsáveis pela maior interferência na forma de onda da corrente ou da tensão [18].

O conversor Boost é constituído por uma chave semicondutora, um diodo, um indutor e um capacitor, como pode ser visualizado na Figura 30. Apresenta uma tensão de saída maior que a de entrada e pode operar em três diferentes modos: modo de condução contínua (MCC), descontínua (MCD) ou crítica (MCCR). O modo de operação é determinado pelo valor de indutor associado à carga.

- MCC – A corrente no indutor não retorna a zero quando a chave está aberta.
- MCD – A corrente do indutor retorna a zero antes da chave fechar.
- MCCR – A corrente retorna a zero e volta a crescer antes da chave fechar.

O princípio de funcionamento desse conversor operando como PFC é deixar a corrente média que circula no indutor Boost, com a mesma forma de onda da tensão de entrada, as deixando em fase. A tensão de saída deve ainda ser maior que o pico da tensão de entrada já que é um conversor elevador de tensão.

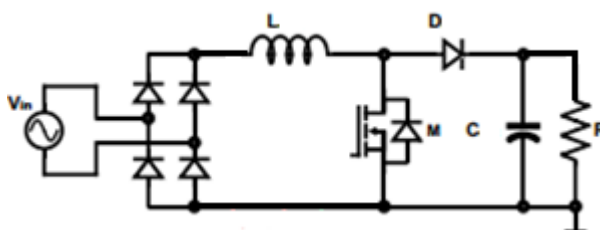


Figura 30. Circuito do conversor Boost.

Os estágios de condução do conversor são divididos pelo funcionamento da chave semicondutora e são apresentados na Figura 31. Quando a chave S_1 está conduzindo, o indutor encontra-se recebendo energia. Enquanto o diodo D está bloqueado, a carga R recebe energia do capacitor C .

Já no segundo estágio, a chave S encontra-se bloqueada e assim a corrente do indutor flui para a carga, fazendo com que o diodo D entre em condução, carregando o capacitor de forma praticamente linear.

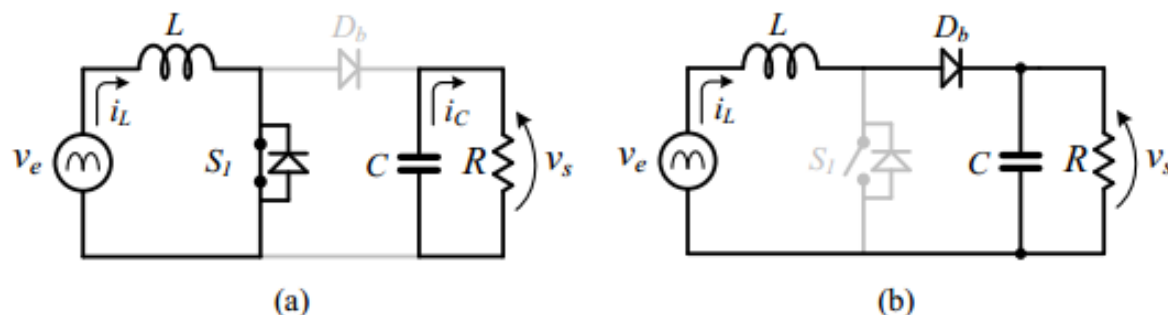


Figura 31. Estágio de condução do conversor Boost. (a) Chave fechada e (b) chave aberta.

4.1 Projeto do Conversor Boost

Primeiramente são apresentados os parâmetros do projeto, sendo que estes podem ser observados na Tabela 7. São determinados a partir desses dados os níveis máximos de corrente e tensão para os componentes do conversor, assim, podendo ser calculados os valores do capacitor, indutor, bem como, a escolha da chave semicondutora de acordo com os parâmetros do projeto.

Tabela 7 - Dados do projeto do conversor Boost

Simbologia	Parâmetros	Valor
P_{out}	Potência máxima de saída	50W
V_{in_max}	Tensão máxima de alimentação	235V
V_{in_min}	Tensão mínima de alimentação	195V
f_{rede}	Frequência da tensão de alimentação	60 Hz
V_o	Tensão máxima de saída	350V
ΔV	Ondulação da tensão de saída	10%
F_s	Frequência de chaveamento	100kHz
ΔI_{min}	Ondulação na corrente de entrada (pico-a-pico)	10%
η	Rendimento	90%

4.1.1 Cálculo do Indutor L

Para o cálculo do indutor, primeiramente é necessário encontrar o valor da corrente máxima na entrada do conversor elevador de acordo com a equação 12. O cálculo do dimensionamento físico do indutor não será apresentado, já que o mesmo não será implementado em laboratório.

$$I_{in_max} = \frac{\sqrt{2}P_{out}}{\eta * V_{in}} \quad (12)$$

Diante do valor da corrente máxima é possível encontrar a variação de corrente no indutor estipulando-se uma variação máxima de 10%

$$\Delta_{iL} = 0,1 \cdot I_{in_max} \quad (13)$$

Então, calcula-se a máxima corrente no indutor juntamente com a razão cíclica mínima de operação, equações 14 e 15.

$$I_{L_max} = I_{in_max} + \left(\frac{\Delta_{iL}}{2}\right) \quad (14)$$

$$D = \frac{V_o - V_{in_min} \cdot \sqrt{2}}{V_o} \quad (15)$$

É possível, diante dos valores obtidos com as expressões acima calcular o valor do indutor do conversor Boost.

$$L = \frac{D \cdot V_{in_min} \cdot \sqrt{2}}{f_s \cdot \Delta_{iL}} \quad (16)$$

4.1.2 Cálculo do capacitor

Para o cálculo do capacitor foi utilizada a equação 17:

$$C = \frac{P_{out}}{f_s \cdot (V \cdot \Delta V)} \quad (17)$$

Os valores obtidos através dos cálculos foram de 14mH para o indutor e de 14,28 μ F para o capacitor. Podemos assim realizar uma comparação entre as topologias de filtros passivos e deste filtro ativo e visualizar a grande redução no volume do filtro.

4.2 Conversor Flyback.

Para representação da carga foi projetado um conversor isolado Flyback operando em modo de condução descontínua para que se obtenha um menor tamanho do transformador e

assim aproximando-se do reator eletrônico real. Como já apresentado anteriormente na Figura 7, podemos dividir seu funcionamento em duas etapas.

Na primeira etapa, a chave encontra-se fechada e o diodo polarizado reversamente. Assim, a energia da fonte de entrada é acumulada na forma de campo magnético no enrolamento primário do transformador (considera-se o capacitor já carregado, fornecendo energia à carga) [19].

A segunda etapa é caracterizada pela abertura da chave. Assim, a polaridade do transformador é invertida por imposição do fluxo magnético que deixou de receber energia. Agora o diodo encontra-se conduzindo a energia acumulada para o capacitor de saída e a carga. As etapas de funcionamento do conversor podem ser visualizadas na figura 32.

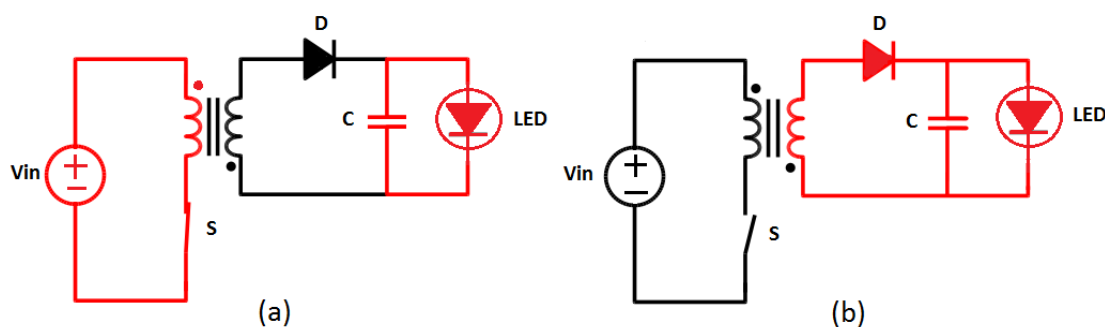


Figura 32. Etapas de funcionamento do conversor flyback. (a) primeira etapa (b) segunda etapa.

4.2.1 Projeto do conversor Flyback

Na Tabela 8 encontram-se os dados de especificação para o projeto do conversor Flyback; com estes valores é possível o dimensionamento dos componentes do conversor. Como será apenas simulado em software foram calculados apenas a indutância de magnetização e o capacitor de saída.

Tabela 8 - Dados do projeto Flyback

Simbologia	Parâmetros	Valor
P_{out}	Potência máxima de saída	50W
V_{in}	Tensão de entrada	350V
$f_{entrada}$	Frequência da tensão de alimentação	120 Hz

V_o	Tensão máxima de saída	12V
ΔV	Ondulação da tensão de saída	100mV
F_s	Frequência de chaveamento	25kHz
D	Razão cíclica	0,5
η	Rendimento	90%

4.2.2 Cálculo da indutância de magnetização.

No cálculo da indutância de magnetização, primeiramente é calculada a corrente máxima no primário, considerando a razão cíclica que para o projeto foi de 0,5 e uma ondulação de tensão de 10%.

$$V_{m\acute{a}x} = V_{in} + 10\% V_{in} \quad (18)$$

$$V_{min} = V_{in} - 10\% V_{in} \quad (19)$$

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{2 \cdot P_o}{\eta \cdot V_{min} \cdot D} \quad (20)$$

$$L = \frac{V_{min} \cdot D}{I_{m\acute{a}x} \cdot f_s} \quad (21)$$

4.2.3 Cálculo do capacitor.

O capacitor na saída do conversor pode ser calculado através da expressão a seguir:

$$C = \frac{I_o \cdot D}{f_s \cdot \Delta V} \quad (22)$$

$$I_o = \frac{P_{out}}{V_{out}} \quad (23)$$

Os valores obtidos através dos cálculos foram de 10 mH para o indutor e de 3,3 mF para o capacitor.

4.3 Modelagem do reator eletrônico com o filtro ativo.

A Figura 33 apresenta o circuito desde a alimentação da rede, circuito retificador, circuito do conversor Boost (operando como PFC juntamente com seu circuito de controle),

circuito do conversor isolado Flyback para alimentação em níveis adequados para a carga e por fim a carga LED.

Com a implementação do filtro no simulador e com os valores dos componentes calculados pode ser observada a complexidade do filtro ativo comparado com o filtro passivo. Porém também pode ser observada a grande redução no volume dos componentes.

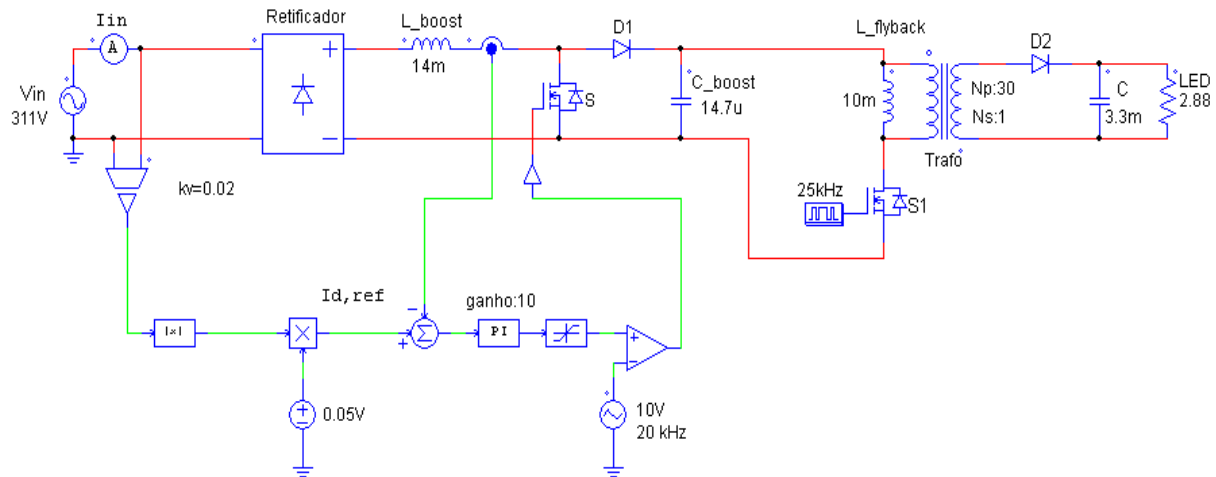


Figura 33. Modelagem do reator eletrônico com filtro ativo.

Com a simulação do circuito se obteve a forma de onda da corrente de entrada deste circuito, que pode ser visualizada na Figura 34. Essa se encontra pouco distorcida se comparada com a forma de onda sem o filtro que pode ser visualizada na Figura 13.

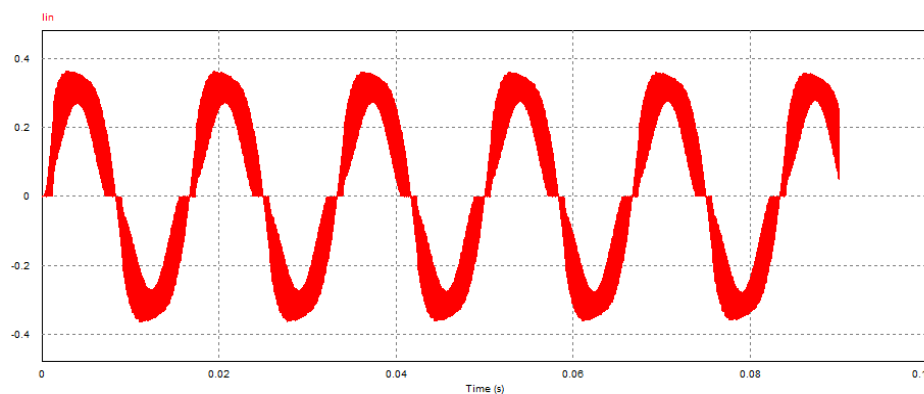


Figura 34. (a) Forma de onda da corrente com filtro ativo obtida em software (amplitude dada em ampère).

Na figura 35 encontra-se a FFT da forma de onda da corrente para uma frequência de até 2 KHz, é possível observar que houve uma grande atenuação das harmônicas de baixa frequência, demonstrando assim o princípio de funcionamento dos filtros ativos, que seria a atenuação das harmônicas de menor ordem.

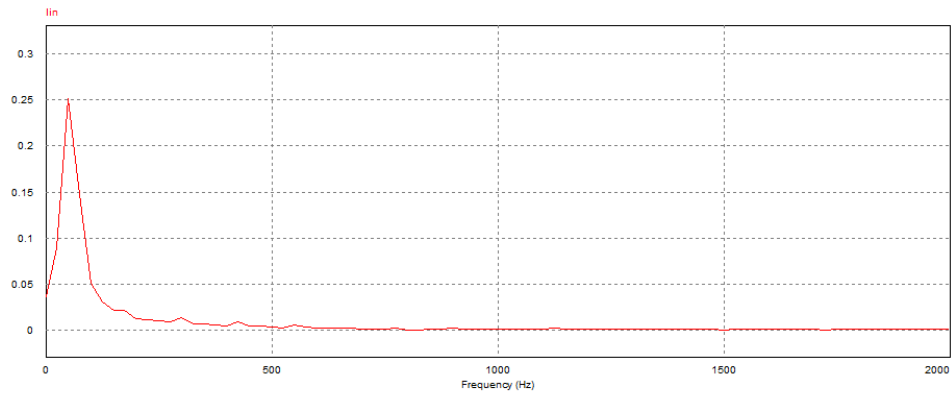


Figura 35. FFT da forma de onda da corrente

Pode ser observado na Figura 36 que ainda restam algumas harmônicas em alta frequência (acima de 30 kHz), essas que agora podem ser atenuadas através de um filtro passivo, já que estes não apresentam um grande volume para filtrar altas frequências.

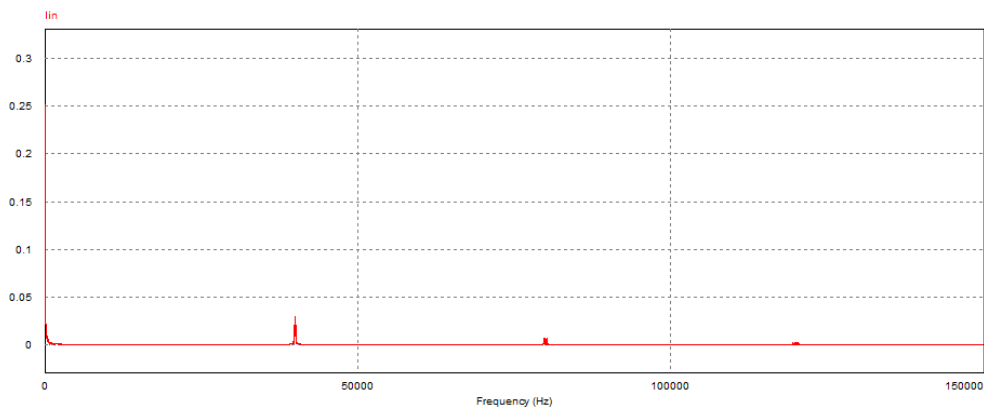


Figura 36. FFT da forma de onda da corrente

Utilizando a expressão 24 é apresentado o cálculo do indutor para a implementação de um filtro passa-baixas de segunda ordem na entrada do reator com o filtro ativo. Foi utilizada uma frequência de corte igual a 20 kHz e um capacitor de 1,5 μF .

$$L = \frac{1}{((2\pi f_r)^2)C} = \frac{1}{((2\pi * 20.10^3)^2) * 1,5 * 10^{-6}} = 42\mu\text{H} \quad (24)$$

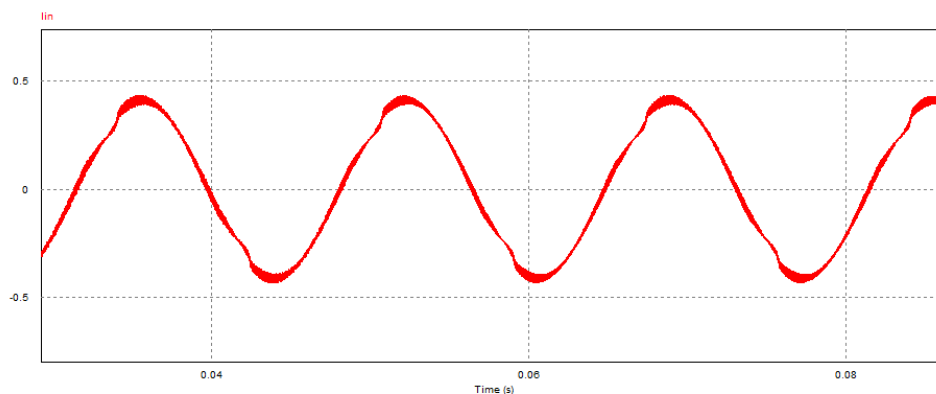


Figura 37. forma de onda da corrente no reator eletrônico (amplitude dada em ampère).

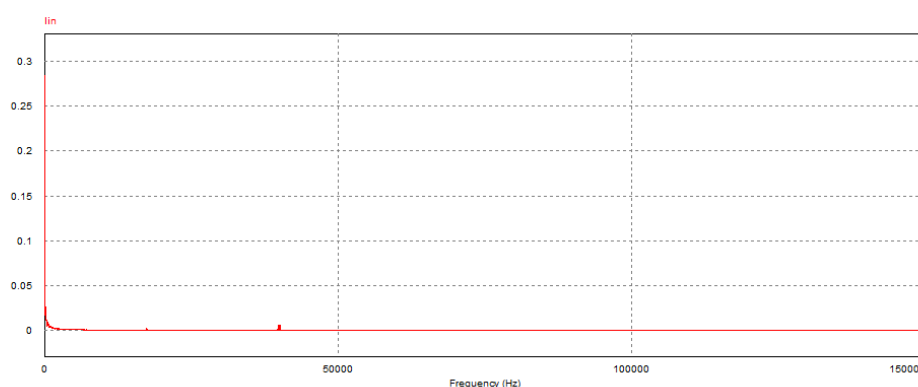


Figura 38. FFT da forma de onda da corrente.

Nas Figuras 37 e 38 são apresentadas as formas de onda da corrente e a FFT da mesma para o reator eletrônico com o filtro ativo Boost PFC juntamente com um filtro passivo passa-baixas de 2ª ordem para atenuação das harmônicas de alta frequência.

O reator composto pelos filtros apresentou uma grande redução no nível de distorção harmônica, proporcionando um THD de 5,22% para um reator que apresentava uma distorção de 170,3%, diante desse valor é calculado o fator de potência e obtido um valor de 0,998.

A seguir encontra-se a tabela com a comparação dos valores das amplitudes de suas respectivas harmônicas com os valores estipulados pela norma.

Tabela 9 - Comparação entre dados do reator com seus respectivos valores em regulamentação

	Magnitude da fundamental	Magnitude das harmônicas (A)					THD
		3ª	5ª	7ª	9ª	11ª	
Reator com filtro	0,306	0,026	0,02	0,014	0,0089	0,0064	5,22
IEC 61000-3-2	<16 A	0,091	0,03	0,02	0,015	0,0091	-

5 IMPLEMENTAÇÃO DE UM FILTRO PASSA-BAIXAS

Com o intuito de análise prática dos filtros, foram realizados testes em laboratório, utilizando um filtro passivo. O filtro escolhido para o teste foi o filtro passa-baixas de segunda ordem, pela sua simplicidade e principalmente pela disponibilidade de componentes no laboratório.

Com o objetivo de reduzir o volume do filtro, utilizou-se o indutor de menor valor encontrado em laboratório que atendesse os requisitos do trabalho. Este possui um valor de indutância igual a 233 mH. Diante do valor do indutor e estipulando um valor para a frequência de corte f_c igual a 110 Hz, foi possível calcular o valor do capacitor pela expressão a seguir:

$$C = \frac{1}{((2\pi f_c)^2)L} = \frac{1}{((2\pi * 110)^2) * 0,233} = 8,99 \mu F \quad (26)$$

Para os testes foi utilizado um capacitor de $8,8 \mu F$ que foi obtido através da associação dos capacitores encontrado em laboratório.

Primeiramente foi realizada a simulação do filtro no software PSIM utilizando os valores de capacitor e indutor usados em bancada, a fim de comparar os resultados com os resultados do laboratório.

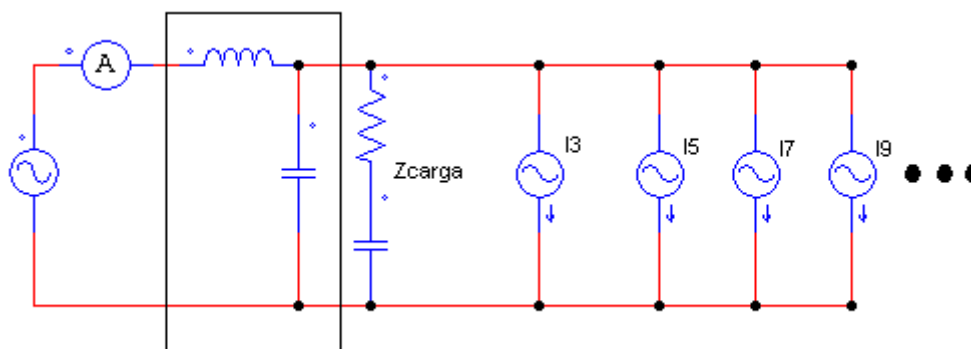


Figura 39. Circuito do filtro passa-baixas de 2ª ordem junto a carga.

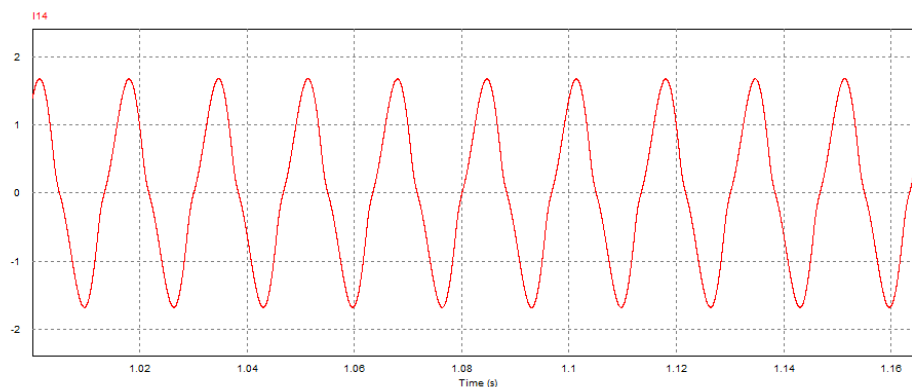


Figura 40. Forma de onda da corrente (amplitude dada em ampère).

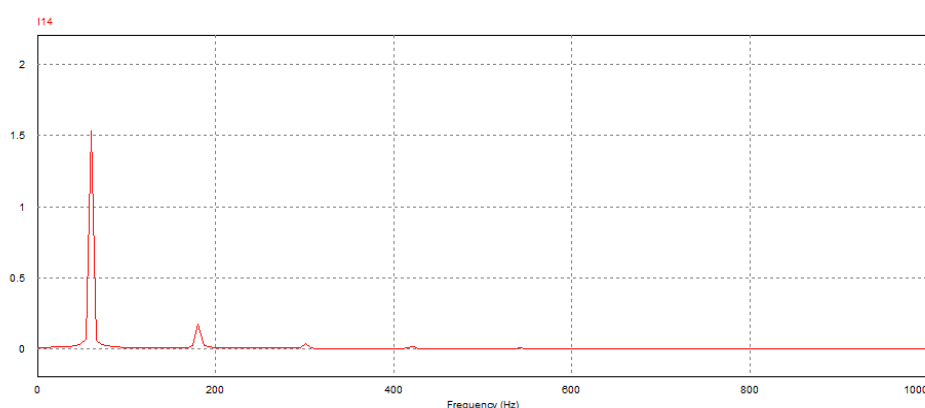


Figura 41. FFT da forma de onda da corrente.

A simulação foi realizada com o intuito de comparar os valores obtidos no simulador com os dados obtidos em laboratório. O THDi obtido na simulação foi de 11,8%, e é possível visualizar de acordo com a Figura 41 que ainda existem harmônicas de 3^a, 5^a, 7^a e 9^a ordem, porém com uma baixa amplitude.

Os testes em bancadas são apresentados a seguir, primeiramente, na Figura 42, podemos visualizar o esquemático do circuito montado no laboratório para acionamento e medições no circuito da lâmpada LED.

Assim, os equipamentos e componentes foram:

1. Indutor
2. Associação dos capacitores
3. Reator eletrônico para acionamento da lâmpada LED
4. Lâmpada LED de 50 W juntamente com o dissipador de calor
5. Analisador de qualidade de energia KEW 6310
6. Osciloscópio YOKOGAWA
7. Ponteiras de corrente

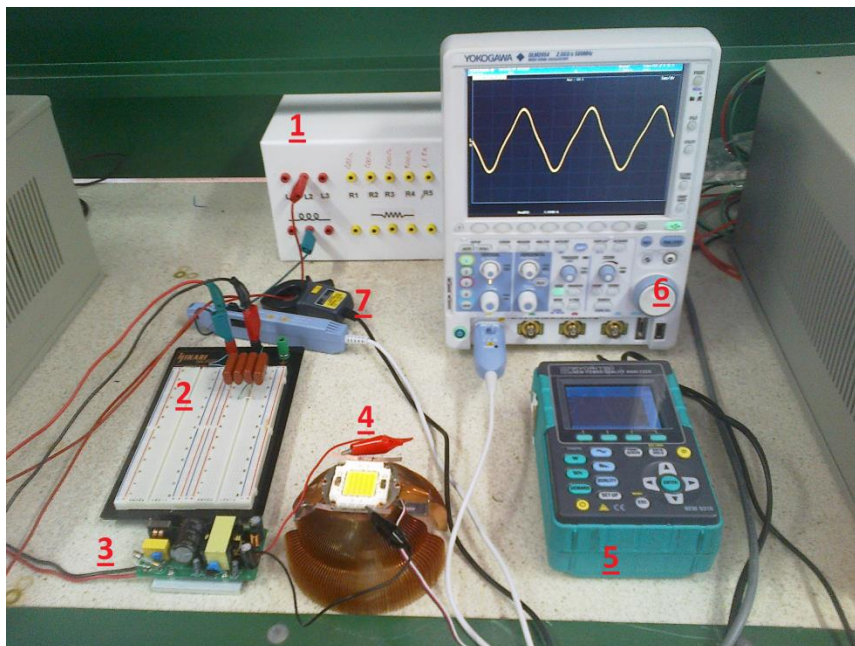


Figura 42. Esquema de ligação e medição do protótipo.



Figura 43. Indutor utilizado no filtro.

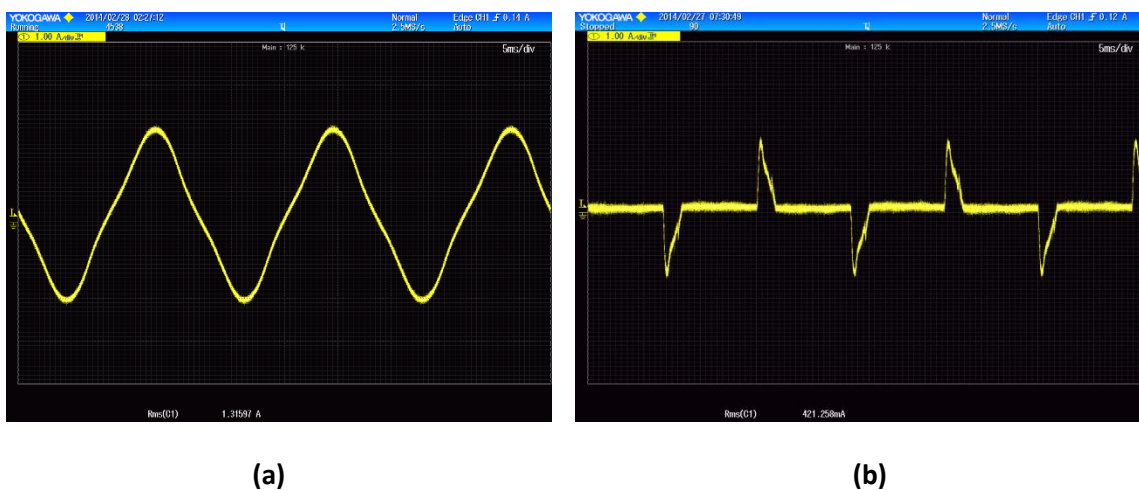


Figura 44. (a) Forma de onda da corrente com o filtro e (b) forma de onda da corrente sem o filtro.

Diante da Figura 44 (a), podemos notar a grande atenuação das harmônicas realizadas pelo filtro, comparando com a forma de onda da corrente na Figura 44 (b) que demonstra a forma de corrente sem nenhum tipo de filtro. É possível ainda, comparar com os resultados obtidos em software na Figura 40 e observar que há uma boa aproximação entre os valores dos testes em simuladores com os testes em laboratório.

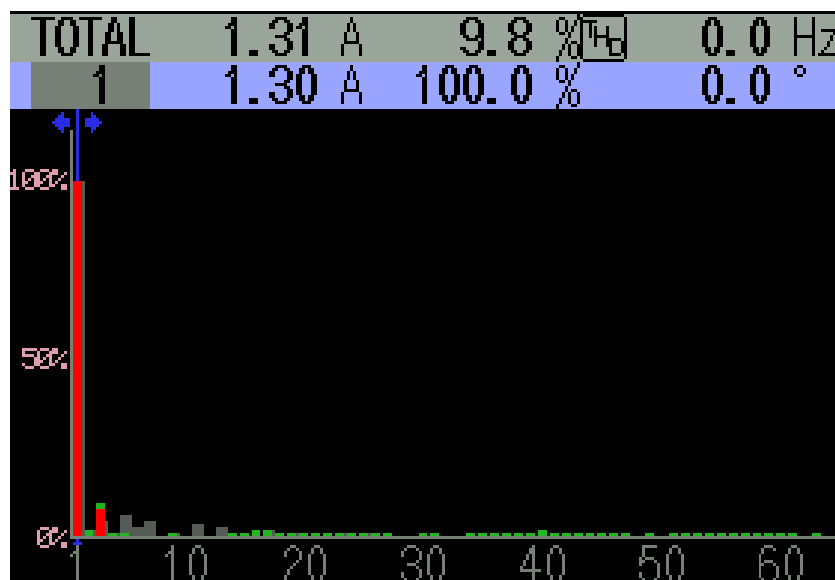


Figura 45. FFT da corrente no circuito utilizando filtro.

Para melhor comparação entre os dados com filtro e sem o filtro, podemos observar a FFT na figura 45 onde observa-se um THDi igual a 9,8% em comparação com a Figura 14 que apresenta um THDi de 170,3%. Em comparação, como resultado de simulação, obteve-se um valor de THDi igual a 11,8%.

Ainda, de acordo com a Figura 45, podemos observar que o filtro não apresentou uma atenuação total das harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11ª ordem, principalmente de 3ª ordem, que apresenta maior efeito na atenuação da forma de onda da corrente.

Este problema poderia ser resolvido implementando-se o filtro adicionando-se alguns filtros sintonizados, porém aumentaria ainda mais o volume do mesmo. O mesmo não pôde ser testado e demonstrado em laboratório devido à indisponibilidade de componentes.

O fator de potência para o reator eletrônico com o filtro passa-baixas de segunda ordem é obtido através da expressão (27), atendendo assim, o valor de fator de potência estipulado por norma que é igual a 0,92.

$$FP = \frac{\cos\phi}{\sqrt{1+THD^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+0,098^2}} = 0,995 \quad (27)$$

A seguir encontra-se a tabela com a comparação dos valores das amplitudes de suas respectivas harmônicas com os valores estipulados pela norma.

Tabela 10 - Comparação entre dados do reator com seus respectivos valores em regulamentação

	Magnitude da fundamental	Magnitude das harmônicas (A)					THD
		3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	
Reator com filtro	1,30	0,14	0,01	0,01	0,0	0,0	9,8
IEC 61000-3-2	<16 A	0,38	0,13	0,091	0,065	0,039	-

Realizada a comparação das amplitudes das harmônicas com as suas respectivas amplitudes máximas permitidas pela norma IEC 61000-3-2, pode-se observar que essas possuem valores abaixo das estipuladas, o que caracteriza o reator como eficiente diante de uma análise de qualidade de energia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresenta primeiramente um estudo sobre a utilização de filtros passivos para correção da distorção harmônica em reatores de lâmpadas LED, com a finalidade de se obter uma maior qualidade de energia nesse sistema de iluminação que vem ganhando mercado por sua alta eficiência luminosa.

Para isto é modelada a carga em software de forma a aproximar-se da carga testada em laboratório. Para tanto, são realizadas as medições das amplitudes das harmônicas juntamente com seu ângulo de defasagem. Diante desses, a carga é representada por um resistor e um capacitor, já as harmônicas por fontes de corrente em paralelo com suas respectivas amplitudes e ângulos.

Então, foi possível realizar os testes de diferentes topologias de filtros passivos, sendo apresentados alguns que realmente conseguiram atender às normas estipuladas e visando principalmente o menor volume possível. Esta redução pode ser obtida através da redução de tamanho do indutor.

Diante dos dados obtidos com a simulação observa-se que apesar deste filtro apresentar dados satisfatórios para aumentar o fator de potência e diminuir o índice de distorção harmônica, o mesmo apresenta um grande volume, e conseqüentemente um alto custo se comparado com os valores dos reatores. Conseqüentemente a sua utilização não se tornar muito interessante para apenas uma lâmpada LED.

Por outro lado, a conclusão seria diferente, se considerada a utilização de um único filtro, alimentando um conjunto de reatores de lâmpadas LED.

Assim, tornou-se interessante o teste com alguma topologia de filtro ativo. Dessa forma, diante de revisões bibliográficas, optou-se por uma metodologia bastante utilizada para esse tipo de correção, que seria a utilização de um conversor CC-CC Boost operando como pré-regulador do fator de potência conectado em cascata com o circuito do reator eletrônico.

Este circuito apresentou uma boa atenuação das harmônicas de menor ordem, e apesar da utilização de um maior número de componentes em seu circuito, apresenta um volume muito menor comparado aos filtros passivos projetados. Para esse filtro não foi realizado o projeto do controle da chave de acionamento, já que a princípio o objetivo do trabalho era o estudo e a implementação de filtros passivos para correção do fator de potência.

Esse foi implementado ainda com um filtro passivo para atenuar as harmônicas em alta frequência, o que faz com que o filtro passivo apresente um volume bem pequeno para frequências acima de 1 kHz; conseqüentemente, verificou-se que esta é uma boa solução para atenuação de harmônicas.

Posteriormente, foram realizados os testes em laboratório utilizando um filtro passivo, o filtro utilizado foi o filtro passa-baixas de segunda ordem. A escolha dessa topologia de filtro foi motivada pela disponibilidade de componentes do valor projetado em laboratório. Visando-se o menor volume do filtro para o projeto, alcançaram-se valores de fator de potência e atenuação de harmônicas consideráveis, atendendo aos requisitos da norma IEC 61000-3-2.

O teste em laboratório também permitiu a comparação com os dados obtidos nas simulações no software PSIM, demonstrando assim que há uma boa aproximação entre os valores obtidos na prática com os simulados.

Com a comparação realizada entre as topologias de filtros passivos e ativos, sugere-se para trabalhos futuros a implementação em laboratório do filtro Boost PFC juntamente com seu circuito de controle para correção de distorção harmônica em reatores de lâmpadas LED, de forma a ser possível realizar uma comparação com os dados obtidos em simulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MINEIRO SÁ JUNIOR, EDILSON; “**Estudo de estruturas de reatores eletrônicos para LEDs de iluminação**”; Dissertação de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- [2] BENDER, VITOR CRISTIANO; **Metodologia de projeto eletrotérmico de LEDs aplicada ao desenvolvimento de sistemas de iluminação pública**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.
- [3] BULLOUGH, J. D. **Lighting answers**: LED Lighting Systems. National Lighting Product Information Program, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute. Vol. 7, Issue 3, 2003.
- [4] A. G. CASTRO, A. M. MUNOZ, AND J. J. G. DE LA ROSA, “**Characterizing the Harmonic Attenuation Effect of High-Pressure Sodium Lamps,**” in 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2010, pp. 1–6.
- [5] UDDIN, SOHEL, SHAREEF, HUSSAIN, MOHAMED, AZAH and HANNAN, M A. “**An Analysis of Harmonics from Dimmable LED Lamps**” IEEE, junho 2012.
- [6] P. JANIGA, D. GASPAROVSKY, “**Power Quality in Public Lighting Installations**” in Power Quality, Ed. Andreas Eberhard, InTech, Rijeka, 2011.
- [7] OLIVEIRA, RENATO ANTÔNIO DE e QUITO, TERCIVUS MURILO; “ **Projeto e análise de um filtro passivo de correntes harmônicas para um computador de uso pessoal**”. (projeto final de graduação). Universidade de Brasília. 2006.
- [8] NOGUEIRA, SANTOS LEANDRO; **Projeto e implementação de uma carga não-linear utilizando uma ponte trifásica controlada**. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) da escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- [9] MAIA, Juliana, PINHEIRO, José. **Harmônicos de Corrente e Tensão**.CRICTE 2006.
- [10] ABNT NBR 16026 – **Requisitos de desempenho de dispositivo de controle eletrônico CC ou CA para módulos de LED**. Janeiro de 2012.
- [11] ABNT NBR IEC 61347-2-13 – **Requisitos particulares para dispositivos de controle eletrônico alimentados em CC ou c.a para os módulos de LED**. Janeiro de 2012.
- [12] IEC 61000-3-2. Limits for harmonic current emission (equipment input current <16 A per phase). 2001
- [13] NASSIF, B. ALEXANDRE, XU, WILSON, FREITAS, WALMIR. “**An Investigation on the Selection of Filter Topologies for Passive Filter Applications**” IEEE, VOL.24, NO.3,JULY 2009.
- [14] VESSOZI, DANILO FILIPIN; “**Modelagem, análise e redução de distorções harmônicas produzidas por reatores de lâmpadas fluorescentes**”; Dissertação (graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Pampa, 2011.
- [15] SILVA, Marcelo Freitas da; “**Contribuição ao estudo de sistemas eletrônicos de baixo custo com alto fator de potência para acionamento de lâmpada fluorescente compacta**”; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2000.

- [16] PASHAJAVID, EHASAN, GOLKAR, A. A. MASOOD. “**Efficient procedures to design and characterize passive harmonic filters in low power applications**”. IEEE. 2010.
- [17] SEIDEL, ÁLYSSON RANIERE, PAPPIS, DOUGLAS, COSTA, MARCO A. DALLA, PRADO, RICARDO N. DO; “**Reator eletrônico auto-oscilante “valley-fill” com correção do fator de crista utilizando modulação em frequência**” *Revista Controle & Automação*/ Vol.16 no. 2/Abril Maio e Junho 2005
- [18] SILVA, SEBASTIÃO GUILHERME; “**Modelagem, análise e redução de distorções harmônicas produzidas por reatores de lâmpadas fluorescentes**”; Dissertação (graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Pampa, 2011.
- [19] VIEIRA, DA COSTA IGOR. “**Projeto e um conversor Flyback auto-oscilante de baixo custo para LED’s de potência**”. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Minas Gerais, Dezembro 2009.