



## CONVERSOR PRÉ-REGULADOR DO FATOR DE POTÊNCIA (PFP) *BOOST COM CONTROLE DE CORRENTE POR HISTERESE*

Francisco Rodrigues Lemes<sup>1</sup>  
Luciano de Souza da costa silva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IFG/Jataí /Engenharia Elétrica - PIBIT, francisco-engeletrica@hotmail.com

<sup>2</sup>IFG/Jataí - lucianocosta\_@hotmail.com

### Resumo.

À medida que uma população cresce e se desenvolve, esta carece de uma demanda de energia elétrica proveniente de um sistema de Geração, transmissão e distribuição, até chegar ao consumidor. Um problema que a concessionária enfrenta é que maioria das cargas residenciais e comerciais necessitam de uma corrente CC para operarem, visto que a concessionária entrega para o consumidor uma corrente CA. As cargas utilizadas pelo consumidor devem possuir um estágio CA-CC que nessa conversão pode gerar distorções na forma de onda da corrente, diminuindo assim a qualidade da energia elétrica do sistema. Com esse problema é necessário estudos detalhados para aperfeiçoar as conversões CA-CC, aumentando a qualidade da energia elétrica no sistema. Com o avanço da eletrônica de potência, temos uma aplicação poderosa para substituir estágios retificadores em ponte completa tradicionais, são os filtros ativos, que são conversores chaveados. Nesse trabalho será estudado o conversor Boost Pré-Regulador do Fator de Potência (PFP) por ser o mais utilizado devido a indutância presente na entrada, filtrando pequenos *spikes*, a modulação utilizada para controlar o chaveamento é o controle por histerese. Esta técnica de controle da corrente atua na correção das distorções na forma da onda sempre forçando a seguir uma onda senoidal e mantendo assim um elevado fator de potência. Com Boost com controle por histerese, temos uma ótima ferramenta a ser usada para aumentar a qualidade de energia elétrica e diminuir as distorções harmônicas injetadas no sistema, o mesmo obteve em resultados de simulação um bom desempenho na correção do fator de potência com uma baixa  $DHT_i = 3.22\%$  com suas componentes sempre dentro dos padrões da IEC-61000-3-2 (Classe A) e com um elevado fator de potência de 0.9995, sua regulação da tensão também foi analisada mantendo sempre regulada mesmo quando submetida a distúrbios.

**Palavras-chave:** Controle por histerese, distorção harmônica, fator de potência, correção ativa, *Boost*, conversor PFP.

### 1. Introdução.

Nos dias atuais com o grande avanço da indústria e da sociedade a energia elétrica tem sido vista como um produto, como todo produto tem-se a preocupação e discussão quanto à qualidade do mesmo a ser entregue. Uma vez que a eletricidade possui características distintas dos demais produtos, ela precisa ser gerada com a mesma taxa que é consumida, e não podendo ser estocada, e distribuída de forma característica dos demais produtos, e a mais importante sua qualidade depende tanto do consumidor quanto da concessionária (ANEEL). Entende-se por qualidade de energia elétrica (QEE) que a mesma é a condição do sinal elétrico de tensão e corrente



fornecidos a um equipamento, processo, instalação e a qualquer sistema elétrico para que operem de forma satisfatória, sem o prejuízo de desempenho e da vida útil do mesmo (LEÃO, 2014).

Para fins de assegurar a qualidade da energia elétrica, são analisadas as grandezas do sinal elétrico, a tensão e a frequência, sendo a frequência esta em torno de 60 Hz e a tensão possuir forma mais próxima possível de uma onda senoidal e ter amplitude dentro dos padrões determinados pela concessionária e estar em fase com a corrente (MELO, 2008). As concessionárias hoje tem o compromisso de entregar um produto de qualidade e de baixo custo, mas existem muitos distúrbios que podem baixar a qualidade desse serviço.

Com o grande aumento do uso das cargas não lineares, tem aumentado o efeito na distorção na forma de onda da corrente, fazendo com que o fator de potência dos sistemas saia das normas estabelecidas. Há duas causas para o baixo fator de potência, o primeiro e mais tradicional é o deslocamento de fase entre tensão e corrente puramente senoidais e a segunda é uma das mais importantes fontes de distúrbios é a presença de harmônicos na corrente (CEZAR, 2011).

Harmônicos são conceitualmente tensões e correntes, que além de possuir a componente fundamental da frequência, possuem múltiplos inteiros da mesma frequência de correspondência, no caso do sistema elétrico e 60 Hz (SILVA, 2008). Como já comentado estes são gerados devido ao crescimento das cargas não lineares, deformando o sinal elétrico baixando a qualidade do sistema.

A análise da qualidade do sinal elétrico, causados pelas deformações harmônicas, é de extrema importância do ponto de vista do consumidor e concessionária devido aos transtornos causados aos mesmos, e aos demais ligados ao ponto de acoplamento comum (PAC), uma vez que as componentes harmônicas são de alta frequência quando injetados no sistema, ocasionam diversos fenômenos prejudicando diretamente o fornecimento e a operação de cargas acopladas (RIBEIRO, 2007). Assim sendo estes harmônicos são contribuintes na redução da vida útil das cargas acopladas.

Na medição de Harmônicos é utilizada a decomposição em séries de Fourier, e obtém-se o  $DHT_i$  (Distorção Harmônica total da corrente), e obtendo-se uma nova expressão para o fator de potência sendo:

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^h I_h^2}}{I_1} \quad (1)$$

$$FD = \frac{1}{\sqrt{1+DHT_i^2}} \quad (2)$$

$$FD_{es} = \cos \theta_1 \quad (3)$$

$$FP = FD * FD_{es} \quad (4)$$

$I_1 \rightarrow$  Componente fundamental;

$FD_{es} \rightarrow$  Fator de deslocamento;

$I_h \rightarrow$  Componente harmônica de ordem h.

$\theta_1 \rightarrow$  Ângulo de fase da fundamental

$FD \rightarrow$  Fator de distorção.

$FP \rightarrow$  Fator de potência.

Os índices de Harmônicos nos sistemas elétricos são determinados segundo as normas em vigor que as concessionárias adotam. As normas técnicas são documentos que contêm as especificações ou processos precisos para a utilização consistente do sistema, estas estabelecem limites, regras e definições para assegurar a boa qualidade do sistema elétrico (LEÃO, 2014). As normas são referidas e definidas por três padrões os quais são: normas americanas, normas

europeias e normas nacionais. A norma que será utilizada nesse artigo como referência é a norma europeia IEC 61000-3-2 classe A.

As técnicas de correções de Harmônicos envolvem a utilização de filtros, destes são os filtros passivos, filtros ativos e os híbridos. O uso dos mesmos envolve cada caso em questão visando tipo carga e ser viável economicamente.

Os filtros passivos são circuitos elétricos capazes de filtrar sinais indesejáveis, esse processo ocorre graças às características de cada impedância e das diversas formas de topologia dos circuitos podendo ser série ou paralelo, os mesmos atuam de forma a rejeitar certas frequências ou permitirem a passagem dependendo do projeto, os filtros são equipamentos robustos constituídos de elementos RLC (NASCIMENTO, 2007).

Já nas soluções ativas, os pré-reguladores de FP (PFP), estes empregam o uso de chaves controladas associadas a elementos passivos de alta frequência de chaveamento para obter redução nos valores dos elementos LC e, apesar de tornar o projeto menos robusto, é extremamente eficiente para ser usado para correção das distorções harmônicas no sistema (POLMILIO, 2007). Os filtros Híbridos associam as das técnicas passivas e ativas de correção, fazendo com que a parte ativa atue somente nas componentes não corrigidas pela parte passiva (RIBEIRO; 2007). Nesse artigo, exploraremos mais a respeito das técnicas ativas de correção, será utilizado o conversor Boost em modo de condução contínua (MCC).

## 2. Conversor PFP Boost em MCC.

Nas técnicas de correção ativa são utilizadas diversas topologias de conversores CC-CC, a topologia de estudo desse artigo será o Boost (ELEVADOR) na Figura 1. No Boost a tensão média de saída dever ser obrigatoriamente maior ou igual à tensão média de entrada e a carga deve se comportar como uma fonte de tensão (BARBI, 2006). As vantagens de se usar o Boost é que sua topologia possui um indutor na entrada filtrando variações bruscas na tensão da rede, além de facilitar no controle da forma de onda senoidal (POLMILIO; 2007).

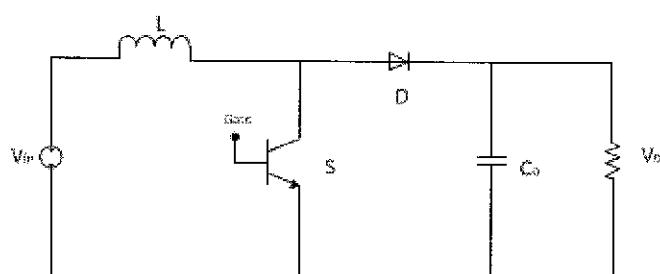


Figura 1: Boost

O funcionamento do Boost é caracterizado por três modos de operação: modo de condução contínua no qual a corrente no indutor não vai a zero durante o período de trabalho, modo de operação descontínua a corrente no indutor vai a zero antes do final do período de trabalho e operação crítica no qual a corrente do indutor vai a zero no mesmo instante do final do período de trabalho (BARBI; 2006). As especificações do estágio de potência do conversor Boost proposto no projeto de pesquisa é apresentado na Tabela 1.

Potência nominal (P)	500 W
Tensão eficaz ( $V_{ef}$ )	220 V
Tensão média ( $V_{in}$ )	198.07V
Tensão de pico ( $V_p$ )	311.13V
Tensão de saída ( $V_o$ )	400V
Frequência de chaveamento ( $f_s$ )	30K Hz
Frequência rede ( $f_r$ )	60 Hz
Ondulação corrente ( $\Delta i_L$ )	10%
Ondulação tensão ( $\Delta V_o$ )	10%

TABELA 1: especificações de projeto

## 2.1 Modelagem Indutor.

Com o Boost operando em modo de condução contínua, podemos utilizar a seguinte expressão segundo (HART; 2012):

$$L = \frac{V_{in}D}{\Delta i_L f_s} \quad (5)$$

Como a entrada do Boost PFP mostrado na FIGURA 2 e a saída da ponte retificadora têm-se uma tensão variante no tempo, isso implica numa razão cíclica (D) variante no tempo (POLMILIO; 2014), expressa da seguinte forma:

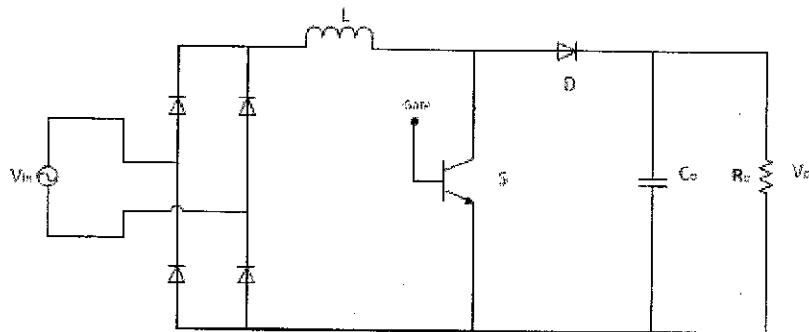


Figura 2: Boost PFP

$$D_{(\omega t)} = 1 - \frac{V_p \sin \omega t}{V_o} \quad (6)$$

Com base nisso, é preciso encontrar uma nova fórmula para o indutor, como a modulação será por histerese, teremos uma faixa de trabalho constante da ondulação de corrente no indutor ( $\Delta i_L$ ), sendo assim a frequência variável, teremos que encontrar o ponto máximo de operação da frequência. Substituindo (6) em (5) temos que o ponto máximo é:

$$\sin \omega t = \frac{G_{min}}{2} \quad (7)$$

$$G_{min} = \frac{V_o}{V_p}$$

Substituindo (7) e (6) em (5) temos a nova forma para o indutor:



$$L = \frac{V_{in}}{\Delta i_L f_{max}} \frac{G_{min}}{4} = 10.27 \text{ mH} \quad (8)$$

## 2.2 Modelagem Carga.

A carga pode ser definida como:

$$R_o = \frac{V_o^2}{P} = 320 \Omega \quad (9)$$

## 2.3 Modelagem Capacitor.

O capacitor será calculado como um filtro de saída de um retificador de onda completa de acordo (SEDRA; 2005).

$$C_o = \frac{V_p}{2f_r R \Delta V_o} = 260.4 \mu\text{F} \quad (10)$$

## 3. Projeto dos controladores do Boost.

Tal estrutura apresenta duas malhas de controle, sendo a malha externa de tensão composta de um controlador linear clássico do tipo Proporcional-Integral (PI), responsável pela regulação de tensão, e uma malha interna de corrente composta de um controlador por histerese, responsável pela correção da distorção harmônica de corrente e do Fator de Potência (FP).

### 3.1 Malha de tensão

No projeto do controle da malha de tensão faz-se necessário a obtenção das funções de transferências(FT), ou seja, das relações matemáticas que representam as dinâmicas do conversor Boost e relaciona as variáveis elétricas envolvidas no sistema. Tem a necessidade de encontrar uma função transferência  $G_{vi}$  relacionando a tensão de saída e a razão cíclica (D). Fazendo modelo médio linearizado no espaço de estados. Obtemos a seguinte função transferência de tensão:

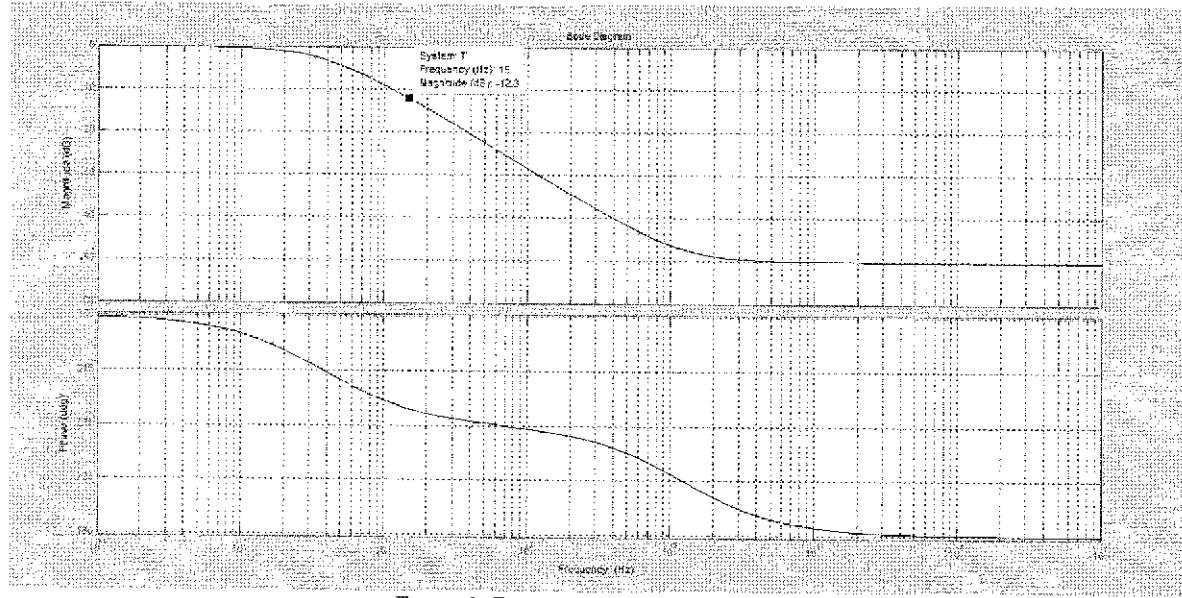
$$G_{vi} = \frac{R(1-D)}{2} \frac{1 - \frac{s}{R(1-D)^2}}{1 + \frac{s}{\frac{L}{RC}}} \quad (11)$$

Para se calcular o controlador PI, adota se um ganho  $H_v$  para se obter uma nova função transferência  $T_v$ :

$$H_v = \frac{5}{400} \quad (12)$$

$$T_v = G_{vi} * H_v \quad (13)$$

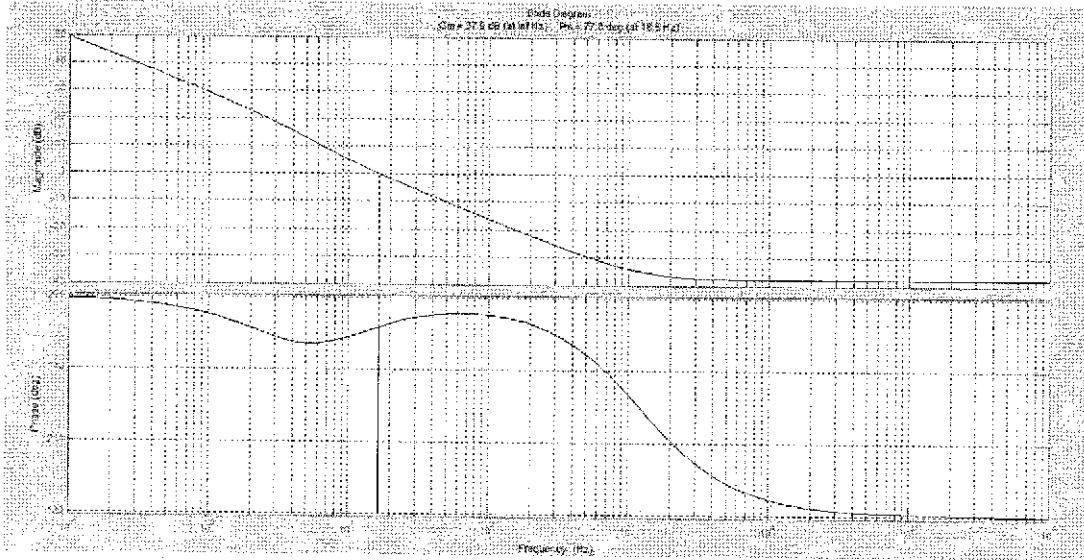
Agora plotamos o diagrama de bolde de  $T_v$  na Figura 3:


 Figura 3: Diagrama de bolde da  $T_v$ .

Aplicando a inversa de log ao ganho da  $T_v$ , obtemos o valor de  $K_{pv}$ , e para se obter  $K_{iv}$  utiliza-se a seguinte expressão, onde  $f_{zr}$  é 1/8 da frequência da rede:

$$K_{pv} = 10^{\frac{-12.3}{20}} = 4.07 \quad K_{iv} = 2 * \pi * f_{zr} * K_{pv} = 191.97$$

Para um bom desempenho do controlador devemos analisar ganho elevado para baixa frequência, frequência de cruzamento a  $\frac{1}{4}$  da frequência da rede, e margem de fase em torno de 50 graus. Na Figura 4 podemos analisar que os valores de nosso controlador ficam próximos do esperado, garantindo assim uma boa estabilidade do controle da malha de tensão.


 Figura 4: Desempenho da  $T_v$ .

Com os  $K_{iv} = 191.97$  e  $K_{pv} = 4.07$  agora podemos obter os valores dos capacitores e resistores do controlador PI mostrado na Figura 5:

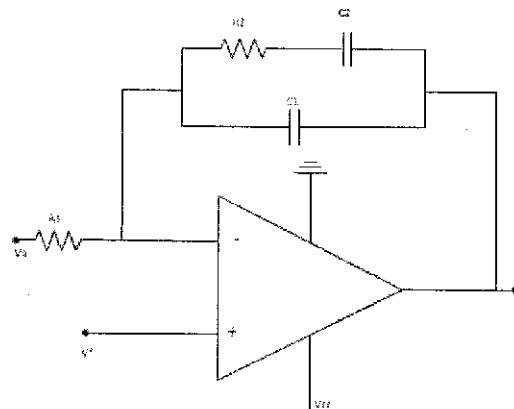


Figura 5: Controlador PI

Fazendo as análises temos as seguintes expressões, como é um sistema de 3 equações e 4 variáveis devemos considerar que  $C_1 = 1 \text{ nF}$  e obter os seguintes:

$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_p C_1 K_{pv}} = 130.23 \text{ k}\Omega \quad C_2 = \left( \frac{f_p}{f_z} - 1 \right) C_1 = 39 \text{ nF} \quad R_2 = \frac{1}{2\pi f_z C_2} = 544.12 \text{ k}\Omega$$

$f_z \rightarrow$  Frequência de Zero 7.5 Hz

$f_p \rightarrow$  Frequência do polo adicional 300 Hz

### 3.2 Malha de corrente

O controle por histerese na Figura 6 é do tipo não linear, onde é estabelecida uma faixa de trabalho considerando a ondulação da corrente e fazendo que a corrente no indutor siga a forma de onda senoidal, corrigindo assim o fator de potência. A malha de corrente possui como referência a saída da malha interna de tensão multiplicada pela tensão após a saída retificada. Fazendo as análises temos a seguinte expressão, considerando  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$  e  $V_{cc} = 20 \text{ V}$  temos:

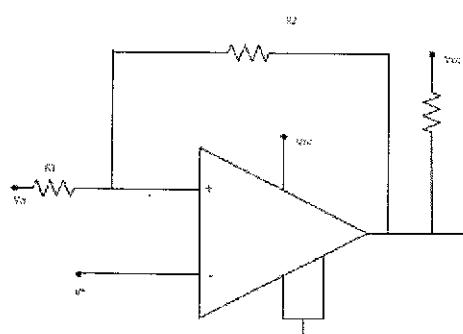


Figura 6: Controle por histerese

$$R_2 = \frac{R_1 V_{cc}}{\Delta I_L} = 622.26 \text{K}\Omega$$

#### 4. Simulações e resultados.

Todas as simulações foram executadas no software pspice 9.2, e mostradas através dos gráficos abaixo, o circuito esquemático esta mostrado na Figura 7 :

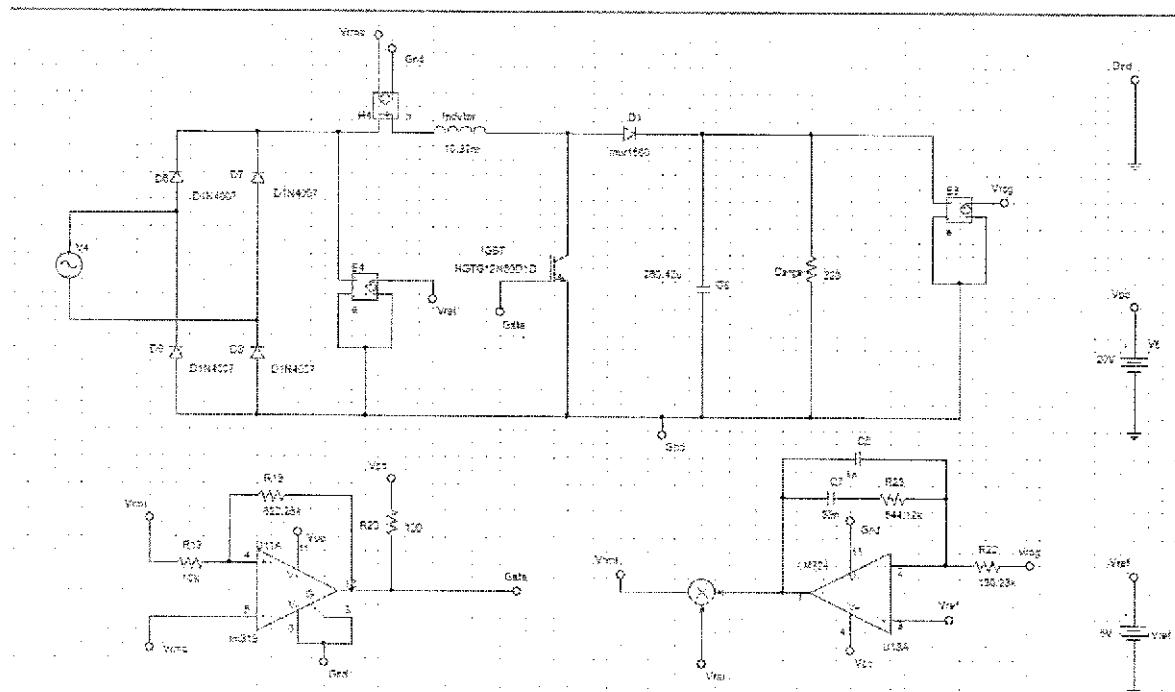


Figura 7: Circuito esquemático.

Um dos causadores da redução do fator de potência, e a distorção da forma da onda da corrente, com o Boost PFP mostrado na Figura 8, notamos que a forma de onda da corrente segue a forma de onda da tensão, na rede. Nesse gráfico a escala de corrente foi aumentada 50 vezes.

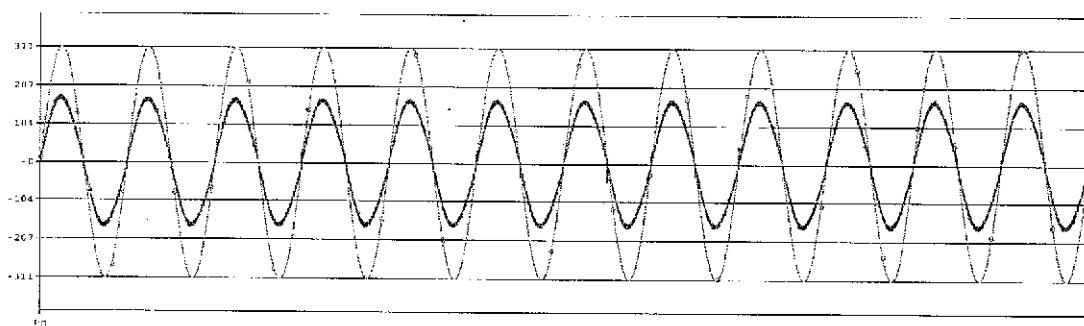


Figura 8: Tensão em verde e corrente em vermelho todo na entrada

Analisando o gráfico da corrente no indutor mostrado na Figura 9, temos que a forma de onda possui a forma de uma onda senoidal retificada em ponte completa, e a corrente seguindo esse formato como esperado.

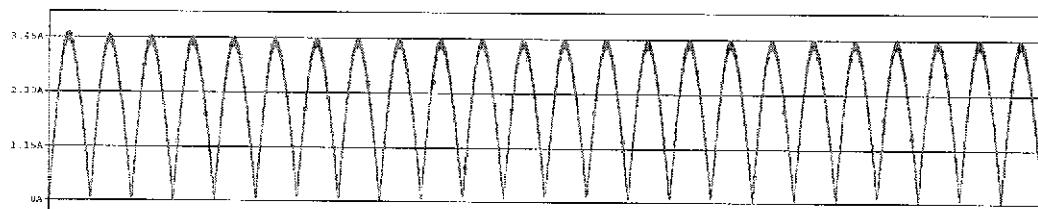


Figura 9: Corrente no indutor

Fazendo a análise da tensão de saída vemos uma boa regulação da tensão com uma ondulação bem abaixo dos 10% e mantendo-se em 400 v mostrado na Figura 10.

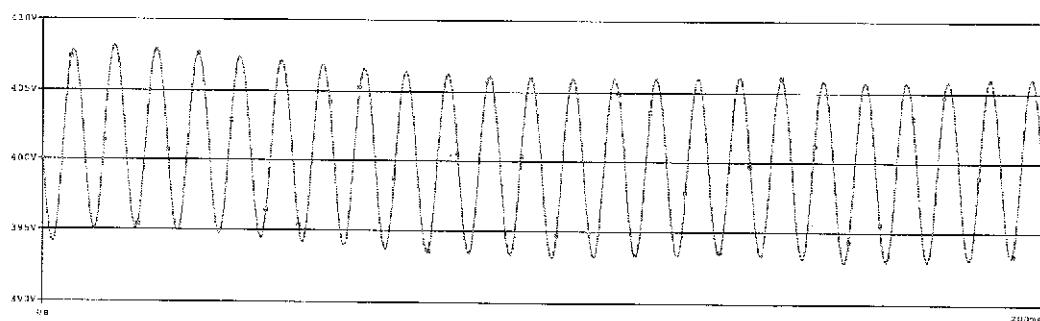


Figura 10: Tensão de saída.

Visto que a corrente esta seguindo o padrão de uma senóide, será feito teste da estabilidade da tensão de saída, o teste de meia carga em que será utilizado apenas 50% da potencia nominal do projeto.

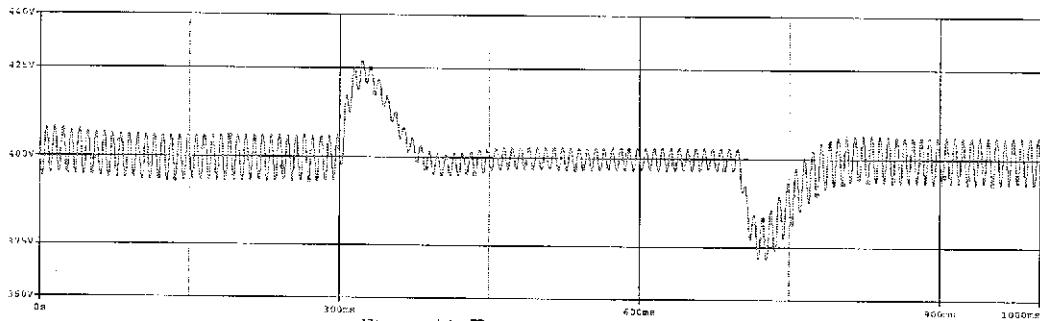


Figura 11: Teste de meia carga.

Como mostrado na Figura 11, temos que os primeiros 300ms esta a plena carga, tem-se o degrau de meia carga espera entrar em regime permanente (400ms) depois aos 700ms tem outro degrau restabelecendo a plena carga. Observarmos um overshoot de 5.75% atingido média de 423 V de tensão máxima e com um tempo de restabelecimento de 10 ciclos de rede, e um undershoot de 6.25 % atingindo uma tensão mínima de 375 V com tempo de restabelecimento de 6 ciclos de rede. O controle esta atuando bem, pois sempre ele estabiliza em 400 V.

Já no gráfico da corrente na entrada na Figura 12, observamos que mantem-se com a mesma forma de onda ou seja não prejudicando o fator de potência. Notando que mesmo não estando em

plena carga o controle faz com que a corrente siga o seu padrão, mas com uma amplitude menor como esperado.

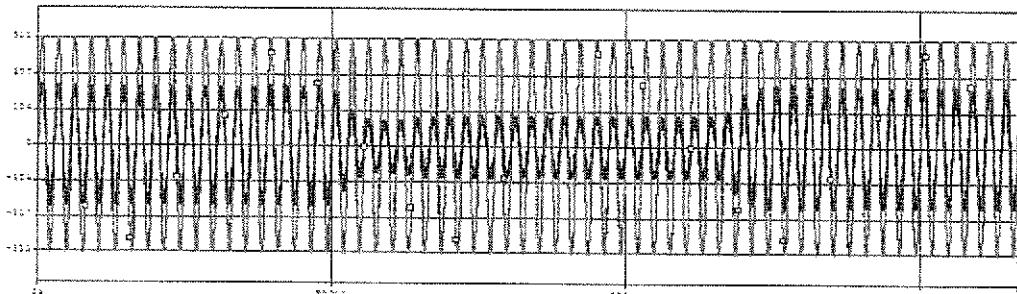


Figura 12: Corrente em vermelho e tensão em verde todos na entrada.

Agora por fim o sistema de controle é submetido a uma queda na rede de 20% da nominal que depois será restabelecido para normalidade, como feito no teste meia carga a resposta a esse distúrbio está na Figura 13 abaixo:

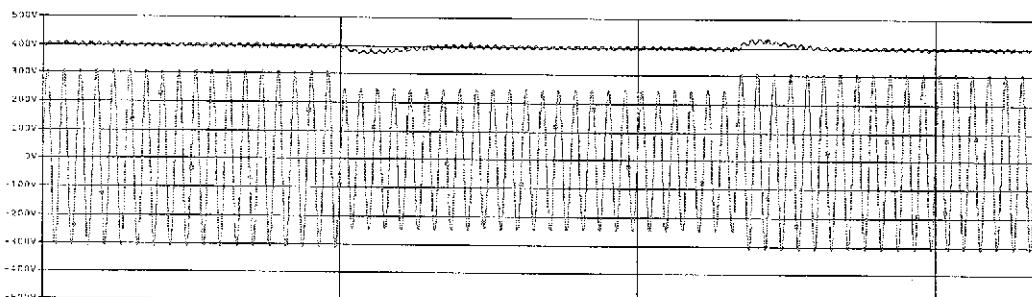


Figura 13: Teste de degrau na rede Entrada verde e saída vermelho.

Quando há uma queda na rede de 20% vemos que há um undershoot de 5.5% com uma tensão mínima de 378 V com um tempo de restabelecimento de 6 ciclos de rede, quando a tensão da rede volta para padrão, temos um overshoot de 6% com tensão média máxima de 324 V e estabelecendo em 6 ciclos de rede. O controle está atuando bem quando há uma queda na rede, sempre regulando a tensão em 400V.

Vamos fazer a análise espectral das harmônicas atuando em plena carga, com resultados da simulação temos que o ângulo de fase é  $0^\circ$  e uma  $DHT_i = 3.22\%$  usando as fórmulas apresentadas de (1) a (4) encontramos um FP de 0.9995, e observando que todas as componentes estão abaixo do que a norma permite IEC-61000-3-2 (Classe A), mostrado na Figura 14.

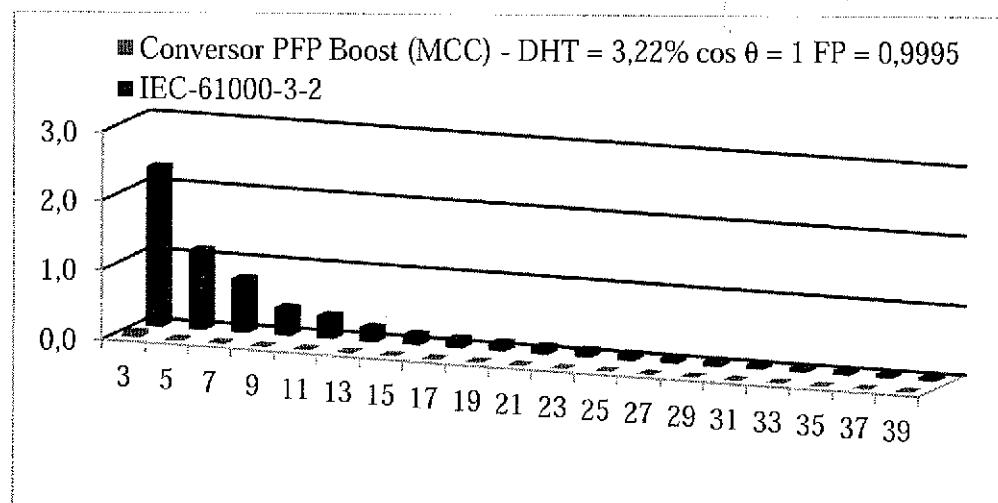


Figura 14: DHT plena carga

Quando se der o degrau na carga, e vai para meia carga observamos que uma  $DHT_i = 4.00\%$ , que não teve grande aumento quando comparado a em plena carga, e analisando todas as componentes sempre abaixo da especificação da norma, e com um fator de potência sempre alto mostrado na Figura 15.

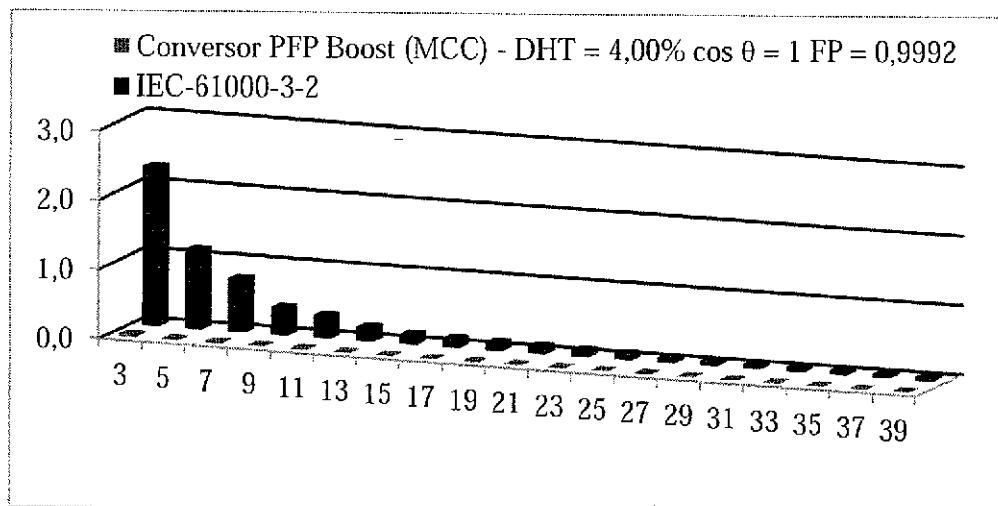


Figura 15: DHT teste de meia carga.

## 5. Considerações finais.

A proposta desse trabalho era a análise do Boost PFP com controle por histerese, analisando e equacionando sua dinâmica de funcionamento. O projeto dos controladores foi implementado com duas malhas de controle, uma fazendo a regulação da tensão e gerando referência para a malha de corrente, e uma malha de corrente forçando a mesma a seguir a forma senoidal por controle de histerese.

Conclui-se que o conversor Boost PFP com controle por histerese, teve um bom desempenho na correção do fator de potência e uma baixa  $DHT_i = 3.22\%$  e um elevado fator de potência de 0.9995. Também foi analisada a regulação da tensão que esteve em 400 V, o mesmo foi submetido a teste de degrau de meia carga e na rede variando em 20%, e o controle sempre



atuando bem, restabelecendo sempre em menos de 10 ciclos de rede, e com overshoot e undershoot sempre abaixo de 6.25%, o conversor também atuou com desempenho satisfatório com perturbações no sistema.

Por fim pode-se afirmar que o conversor Boost PFP com controle por histerese é uma ótima ferramenta para auxiliar na qualidade da energia elétrica, visto que o mesmo apresentou baixa distorção harmônica e elevado fator de potência, por fim não injetando harmônicas no sistema e não o comprometendo.

## 6. Referências bibliográficas.

BARBI, I. Conversores CC- CC Básicos não isolados. 2ed Florianópolis. 2006.

CEZAR, Eduardo lenz. Controle não linear de um pré- regulador isolado com PFC e acoplamento auxiliar. 2011, 173f. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica) Universidade federal do Ceará, Fortaleza 2011.

HART, D.W. Eletronica de potência: analise e projetos de circuitos. Porto alegre: Mc Graw Hill 2012.

[http://www.aneel.gov.br/visualizar\\_texto.cfm?idtxt=1621](http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1621) acessado em: 14/01/2015 23:20

LEAO, R. P. S.; SAMPAIO, R. F.; ANTUNES, F. L. M.; Harmônicos em sistemas elétricos. Rios de janeiro: Elsevier, 2014.

MELO, M B C. Avaliação do impacto da qualidade de energia elétrica na produção industrial: proposta de metodologia. Produto & Produção, vol. 9, n. 3, p. 15-25, out. 2008.

NASCIMENTO, Rogerio pinto do. Propostas de procedimentos para projetar filtros harmônicos a partir de um programa de penetração harmônica, incluindo cálculos de desempenho e de suportabilidade. 2007, 238f. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica) Universidade federal de Uberlândia, Uberlândia 2007.

POMILIO, J. A. **Pré-Reguladores de Fator de Potência – PFP**. Primeira edição. Campinas: FEE, 2007.

RIBEIRO, Cristiano felipe. Influencia dos Harmônicos na qualidade da energia elétrica. 2007, 56f Monografia (graduação em engenharia de controle e automação) Universidade federal de Ouro preto, Ouro preto 2007.

SEDRA, A, S; Smith, K. C. Microeletrônica. 5 ed, São Paulo: Pearson 2007.

SILVA, Luiz carlos evangelista da. Efeitos das Distorções Harmônicas (Tensões e Correntes) e Desequilíbrios (Tensões) em Medidores Eletrônicos Trifásicos de Energia Elétrica Ativa. 2008, 202f. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica) Universidade estadual paulista, Ilha solteira 2008.