

**V SEMINÁRIO NACIONAL
DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**
INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

Promoção:



ESTUDO DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DA DISPERSÃO DE TRANSFORMADORES DE BAIXA FREQUÊNCIA COMO FILTRO EM UMA UPS DE 6KVA COM MODULAÇÃO PWM 3 NÍVEIS

Halisson Alves de Oliveira *, Lucas Maciel Menezes *, Raphael Amaral da Câmara *, Cícero Marcos Tavares Cruz *, Armando Walter Cavero Miranda **

* Universidade Federal do Ceará

** Microsol

GRUPO: A B C D E

TEMA: Eletrônica de Potência

PALAVRAS CHAVE: UPS, Transformador, Perdas, PWM Senoidal. Conversor CC-CA.

RESUMO – Este artigo apresenta um estudo de perdas no núcleo em um transformador de baixa frequência sendo alimentado por uma tensão senoidal e por uma tensão em formato PWM senoidal. As perdas no núcleo são comparadas nos dois casos, sendo verificada a possibilidade da utilização da dispersão do transformador como elemento de filtro para um inversor com modulação PWM senoidal de 6KVA. O estudo visa também à redução de custos na UPS com a retirada do indutor de filtro e utilização do transformador como elemento filtrante, isolamento galvânico e meio de elevação da tensão de saída do inversor da UPS.

ABSTRACT – This paper presents a study of low frequency power transformer losses with a sinusoidal and a Pulse Width Modulation sinewave input voltage in a commercial UPs. Two cases are compared, the first one is a inverter with PWM control technique with a LC filter and after a low frequency power transformer. The second case is the transformer connected directly in the inverter output without the LC filter. The study motivation is lower the UPS cost with the LC filter removed, without any output voltage distortion.

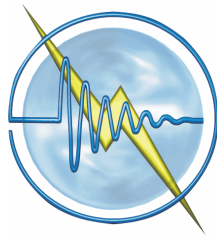
INTRODUÇÃO

A qualidade no fornecimento de energia elétrica é um dos principais fatores, atualmente, em todos os setores da sociedade, especialmente, aqueles que possuem cargas vitais como: sistemas industriais, de telecomunicações, de informática e equipamentos hospitalares de suporte à vida

sensíveis, entre outros. Estas fontes são conhecidas internacionalmente pelo termo *UPS (Uninterruptible Power Supply)*, popularmente conhecidas no Brasil como *No-Break*. Sistemas *UPS* provêm energia elétrica com qualidade, por conta disso, é grande a demanda por fontes ininterruptas de energia. Estes sistemas de fato protegem cargas sensíveis contra grande parte dos distúrbios que ocorrem na tensão de fornecimento da concessionária de energia, dentre os quais se destacam: os surtos de tensão que envolvem as situações de subtensão e sobretensão, interrupções de qualquer magnitude na rede elétrica e oscilações transitórias na frequência [1].

O foco deste trabalho é apresentar um estudo na utilização de um transformador de baixa frequência como elemento de filtro aproveitando sua dispersão, sendo medido as perdas no núcleo com o transformador sem carga e sendo aplicado uma tensão com formato senoidal com frequência de 60Hz e uma tensão com formato PWM senoidal em 40KHz.

O estudo foi realizado utilizando como fonte fornecedora da tensão um inversor de 6KVA que foi projetado anteriormente para tal. Para se obter a tensão com formato senoidal o inversor da UPS foi conectado ao primário do transformador aplicando-se uma tensão em 60Hz de 105V Efícaz. Foram medidas as perdas no núcleo com instrumentação analógica e realizados os devidos cálculos e com o auxílio de um osciloscópio com função de analisador de potência. A medição verificou a potencia requerida no transformador para sua magnetização. As medições foram



III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO,
EMPREGABILIDADE E EMPREENDEDORISMO

realizadas com o transformador a temperatura ambiente de 25°C e a temperatura de 60°C. Após as medições serem realizadas os valores foram comparados. A seguir foi realizado a retirada do filtro LC do inversor e conectado o primário do transformador diretamente a tensão com formato PWM senoidal de 40Khz para novamente serem realizadas as medições e comparações onde os resultados serão discutidos adiante.

O diagrama de blocos da UPS projetada é apresentado na Fig. 1. Logo em seguida será realizada uma análise teórica da metodologia de projeto e os resultados experimentais do protótipo.

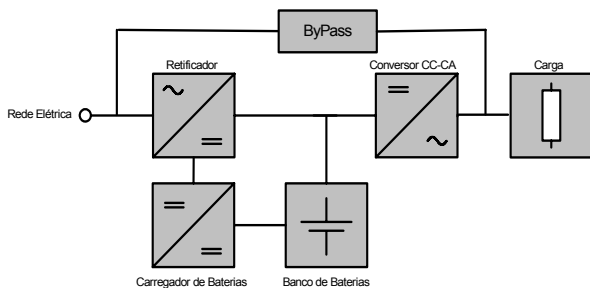


Fig. 1. Diagrama de blocos da UPS utilizada.

DESCRIÇÃO DA TOPOLOGIA PROPOSTA

Na descrição da topologia adotada será tratado apenas o bloco do conversor CC-CA (Inversor) acima citado, do tipo de modulação como também seu controle, do filtro LC e do transformador utilizado nos ensaios, pois o restante dos blocos da UPS não foi utilizado para o estudo.

Na UPS proposta, a topologia do inversor escolhida foi a ponte completa com filtro LC na sua saída devido as suas características de robustez e por ser uma topologia bastante difundida. Dentre as modulações estudadas no início de projeto adotou-se à modulação unipolar por possuir características de ondulação de corrente e tensão nos componentes do filtro de saída significativamente menores, baixas perdas nos interruptores dentre outras. Os modos de operação do conversor não serão abordados aqui pois os mesmos não tem uma relevância significativa para o estudo em questão.

METODOLOGIA DE PROJETO DO INVERSOR

As especificações preliminares de projeto para o inversor de tensão são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Especificações do Projeto.

Potência de saída total	$S_o = 6kVA$
Tensão eficaz de entrada	$V_1 = 220Vca$
Tensão média de saída do inversor	$V_o = 105Vca$
Frequência da rede	$f_r = 60Hz$

Na Tabela 2 são mostrados os parâmetros adotados para a realização do projeto.

Tabela 2. Parâmetros Adotados no Projeto

Frequência de comutação	$f_s = 20kHz$
Ondulação de tensão na saída	$\Delta V_o = 2,5\% \cdot V_o$
Ondulação da corrente na saída	$\Delta I_1 = 10\% \cdot I_{1(pico)}$
Rendimento teórico	$\eta = 0,90$

O esquema da topologia em ponte completa adotado no projeto é apresentado na Fig. 2.

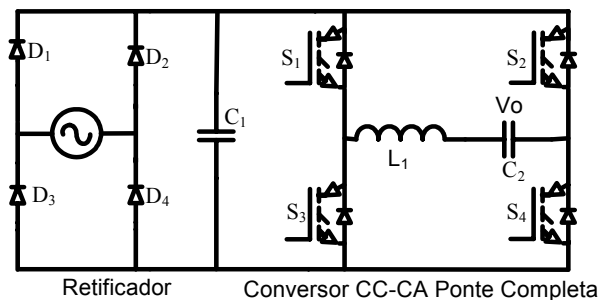


Fig. 2. Topologia do conversor CC-CA

A indutância é calculada para a máxima ondulação de corrente. O valor da indutância de L_f é obtido a partir de (1):

$$L_f = \frac{(V_{in} - V_o \sqrt{2}) \cdot M}{2 \cdot \Delta I \cdot f_{ch}} = 160 \mu H \quad (1)$$

A corrente eficaz que circula através do indutor L_f é calculada a partir de (2):

$$I_{eficaz} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^\pi \left[\sqrt{f_{ch} \cdot \int_0^{M \cdot \sin(\phi)} (\sqrt{2} \cdot I_{Oeficaz} \cdot \sin(\phi))^2 dt} \right]^2 d\phi}$$

$$I_{eficaz} = 29,10 A. \quad (2)$$

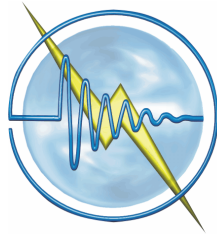
O valor da corrente de pico que circula através de L_f é dado por (3):

$$I_{0pico} = FC \cdot I_{Oeficaz} = 142,85 A. \quad (3)$$

A máxima tensão sobre os interruptores é calculada a partir da equação (4):

$$V_{max} = V_{in} \cdot \sqrt{2} \cdot (1 + \Delta V_{ac}) = 373,35 V. \quad (4)$$

A corrente média nos interruptores é calculada através de (5):



III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO,
EMPREGABILIDADE E EMPREENDEDORISMO

$$I_{MD} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^\pi (\sqrt{2} \cdot I_{O_{eficaz}} \cdot \text{sen}(\phi)) \cdot (M \cdot \text{sen}(\phi)) d\phi = 12,34A \quad (5)$$

A corrente eficaz nos interruptores é calculada através de (6):

$$I_{eficaz} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^\pi \left[\sqrt{f_{ch}} \cdot \int_0^{f_{ch}} (\sqrt{2} \cdot I_{O_{eficaz}} \cdot \text{sen}(\phi))^2 dt \right]^2 d\phi} = 29,10A \quad (6)$$

A máxima corrente de pico nos interruptores é dada por (7):

$$I_{0_{pico}} = FC \cdot I_{0_{eficaz}} = 142,85A \quad (7)$$

A tensão reversa máxima sobre os diodos é obtida através de (8):

$$V_{max} = V_{in} \cdot \sqrt{2} \cdot (1 + \Delta V_{ac}) = 373,35V \quad (8)$$

A corrente média que circula através dos diodos em antiparalelo é dada por (9):

$$I_{MD} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^\pi (\sqrt{2} \cdot I_{O_{eficaz}} \cdot \text{sen}(\phi)) \cdot (1 - M \cdot \text{sen}(\phi)) d\phi = 13,37A \quad (9)$$

A tensão reversa máxima sobre a ponte retificadora é obtida através de (10):

$$V_{drev} = \sqrt{2} \cdot V_{in_{max}} = 373,35V \quad (10)$$

A corrente de pico para cada diodo da ponte retificadora é dada por (11):

$$I_{pico} = \frac{2 \cdot C_0 \cdot (V_{pico} - V_{cmin})}{t_c} = 116,09A \quad (11)$$

O valor da capacitância do barramento é dado por (12):

$$C_0 = \frac{P_{IN}}{f_{rede} \cdot (V_{pico}^2 - V_{cmin}^2)} = 7,473 \cdot 10^{-3} F \quad (12)$$

Foram adotados 12 capacitores de 360µF/450V. A Tabela 3 apresenta um resumo dos componentes especificados no projeto.

Tabela 3. Resumo dos Componentes Especificados

Indutor L _f	L = 160µH
Transformador	105V/115V
Interruptores S1 à S4	IRFP50B60PD1
Ponte Retificadora	GPBC3512A
Capacitor C1	30µF/350V
Capacitores C1 à C12	C = 360µF / 450V

METODOLOGIA DOS ENSAIOS

O ensaio foi realizado inserindo um amperímetro analógico entre a saída do filtro LC e o primário do transformador e um voltímetro em paralelo com o primário. O inversor foi ativado e os resultados obtidos foram utilizados para cálculo

das perdas no núcleo. Da mesma forma foi utilizado um osciloscópio com função de análise de potência para futura comparação com a aparelhagem analógica. Uma ponteira de corrente de alta frequência foi inserida no primário do transformador e em seus terminais a ponteira de tensão.

Para o ensaio com o transformador sendo alimentado com PWM senoidal o indutor foi retirado e o primário do transformador conectado a saída do inversor e o capacitor de filtro que antes estava em serie com o indutor foi conectado ao secundário para obtenção de uma forma de onda senoidal na sua saída.

A instrumentação foi novamente conectada ao primário do transformador, mas devido a natureza da forma de onda e da frequência de saída do inversor, não foi possível a obtenção dos valores, sendo necessário a captura das formas de onda sem a utilização da função especial do osciloscópio e tratada em software de calculo para a obtenção dos resultados.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Na obtenção dos resultados para uma tensão senoidal de 60Hz verificou-se com a utilização de instrumentação analógica uma perda de 45,2W utilizando os dados obtidos após os cálculos que constam na Fig.4.

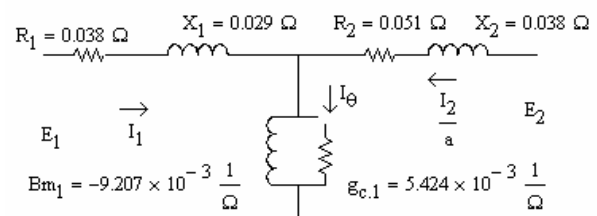


Fig. 4. Modelo T do transformador

Utilizando o osciloscópio a perda foi de 44W como demonstra a Fig.5 com o inversor ligado e o transformador com o secundário em aberto.

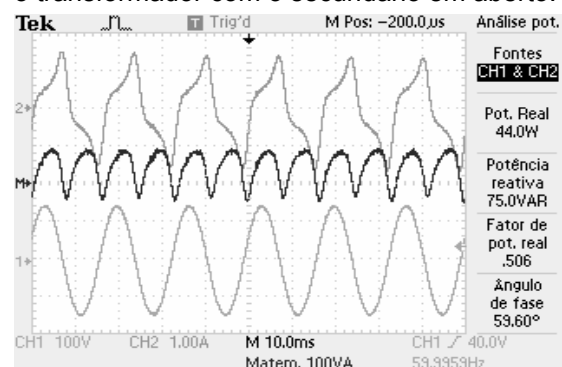
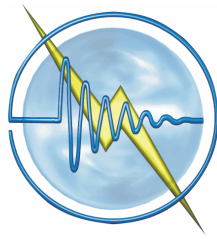


Fig. 5 Valores para cada forma de onda



III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO,
EMPREGABILIDADE E EMPREENDEDORISMO

A Fig.6 demonstra os valores de tensão no secundário do transformador (Canal 1), a corrente após no primário (Canal 3) e o PWM que foi inserido no primário do transformador (Canal 4). Estes valores serão importantes para cálculos em software matemático para obtenção das perdas no núcleo.

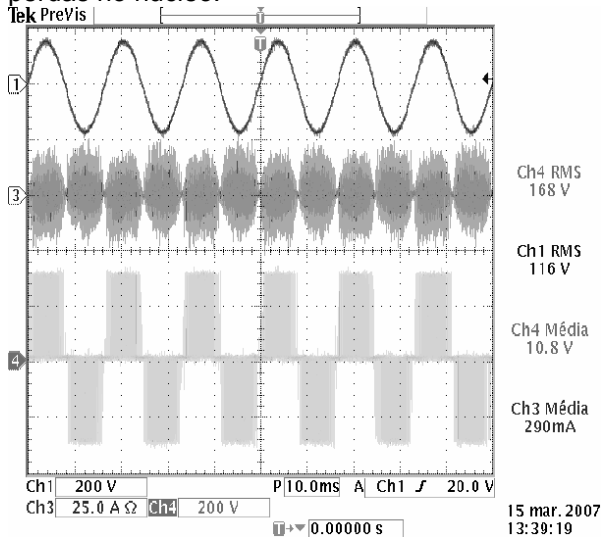


Fig. 6 Valores do Inversor com o indutor

Para o cálculo das perdas com o transformador conectado diretamente ao inversor foi utilizado um artifício de se coletar com osciloscópio o valor da tensão e da corrente no primário do transformador e utilizando software matemático calcular ponto a ponto as perdas através das formas de ondas. Os cálculos a seguir seguem a metodologia de cálculo do software e referem ao equacionamento clássico de tensão e corrente eficaz e potência média. A Fig 7 demonstra os valores coletados e analisados via software com o transformado a vazio.

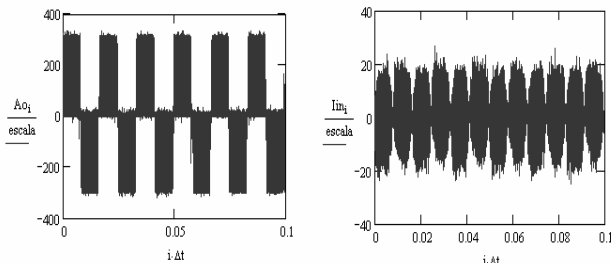


Fig. 7 Valores de tensão e corrente com transformador a vazio e alimentado com PWM senoidal.

Através de (13) e (14) calculo-se os valores de corrente e tensão eficaz da Fig.7.

$$V_{ef_1} = \sqrt{\frac{1}{(i+1) \cdot \Delta t} \cdot \sum_{n=3}^i \left[\frac{A_{o_n}}{escala} \right]^2} \rightarrow 168,23V \quad (13)$$

$$I_{ef_1} = \sqrt{\frac{1}{(i+1) \cdot \Delta t} \cdot \sum_{n=3}^i \left[\frac{I_{in_n}}{escala} \right]^2} \rightarrow 9,07A \quad (14)$$

Após os cálculos verificou-se que a potência média dada por (15) equivale a perda em vazio do transformador ao alimenta-lo com o PWM senoidal.

$$P_i = \frac{1}{(i+1) \cdot \Delta t} \cdot \left[\sum_{n=3}^i \left[\frac{A_{o_n} \cdot I_{in_n}}{escala} \right] \cdot \Delta t \right] \rightarrow 264,98W \quad (15)$$

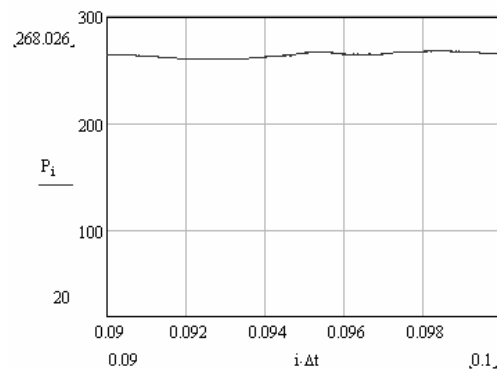


Fig.8 Potência média no primário do transformador ao se aplicar o PWM e carga referente a 80% da nominal

Aplicou-se carga no secundário do transformador referente a 80% do valor máximo e novamente adquiriu-se os valores de corrente e tensão como demonstrado na Fig.9.

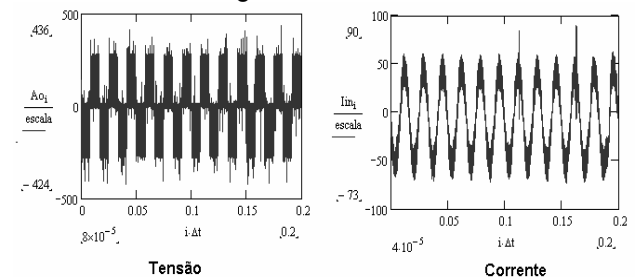
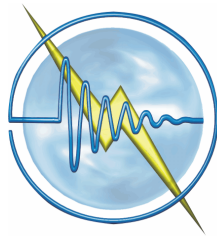


Fig. 9 Valores de tensão e corrente com transformador com carga e alimentado com PWM senoidal.

Através de (16) e (17) calculo-se os valores de corrente e tensão eficaz da Fig.9.

$$V_{ef_1} = \sqrt{\frac{1}{(i+1) \cdot \Delta t} \cdot \sum_{n=3}^i \left[\frac{A_{o_n}}{escala} \right]^2} \rightarrow 161,04V \quad (16)$$

$$I_{ef_1} = \sqrt{\frac{1}{(i+1) \cdot \Delta t} \cdot \sum_{n=3}^i \left[\frac{I_{in_n}}{escala} \right]^2} \rightarrow 35,96A \quad (17)$$



III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO,
EMPREGABILIDADE E EMPREENDEDORISMO

A potência média encontrada é dada em (18). e demonstrada na Fig.10.

$$P_i = \frac{1}{(i+1) \cdot \Delta t} \cdot \left[\sum_{n=3}^i \left[\frac{A_{O_n} \cdot I_{in_n}}{\text{escala}} \right] \cdot \Delta t \right] \rightarrow 3773,76W \quad (18)$$

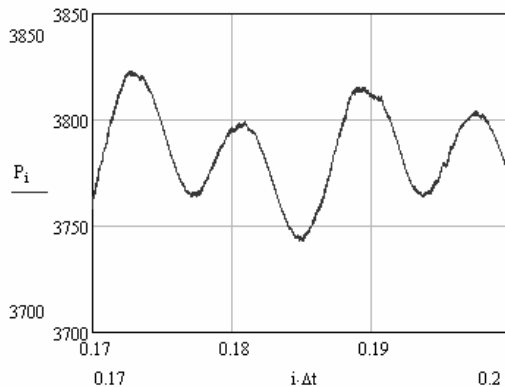


Fig.10 Potência média no primário do transformador ao se aplicar o PWM e carga referente a 80% da nominal

Então se conclui que as perdas no transformador aplicando-se PWM pode ser definida como a potência total no primário menos a potência aplicada no secundário resultando (19).

$$P_{perda} = P_{prim.} - P_0 \rightarrow 373,76W \quad (19)$$

Verificou-se que a perda foi aproximadamente 74% maior se comparada à perda se o transformador fosse alimentado com uma tensão senoidal.

CONCLUSÃO

Na análise com a UPS fornecendo a tensão senoidal, o transformador e o conversor trabalharam bem a plena carga, ou seja, 4,2KW, mas devido ao estudo em questão não foi possível conectar plena carga ao se aplicar o PWM diretamente ao transformador, chegando ao máximo de 3,4KW, ou seja, 80% da potência máxima ao qual a UPS fora projetada. Devido a esta limitação os ensaios para os dois casos foram limitados a esta potência. Verificou-se que na análise com tensão senoidal, o transformador obteve uma perda aceitável de aproximadamente 100W com carga e atendeu ao requisito do projeto de isolar galvanicamente e elevar a tensão de saída do conversor cc-ca. O estudo tinha a finalidade de utilizar a dispersão do transformador ao se retirar o indutor de filtro e analisar se as perdas no transformador seriam muito superiores as perdas utilizando o indutor de

filtro. Verificou-se que a perda no transformador aumentou consideravelmente chegando a 74% acima da perda com o filtro indutivo e o conversor não foi capaz de fornecer potência de 4,2KW ao qual fora projetado. Conclui-se que a idéia de redução de custo e volume ao retirar o indutor de filtro e conectar diretamente o mesmo transformador que era utilizado não tem viabilidade, pois compromete a confiabilidade da UPS, aumenta consideravelmente as perdas e provoca a limitação de potência fornecida pela UPS.

Uma tentativa de se realizar este tipo de mudança seria reprojatar um transformador com uma dispersão elevada.

REFERÊNCIAS

- [1] C.G.C.Branco, (2005) Sistema Ininterrupto de Energia de Dupla Conversão, Não Isolado, com Tensões de Entrada e Saída Universais. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Ceará.
- [2] Gerent, Fernando H. **Metodologia de Projeto de Inversores Monofásicos de Tensão para Cargas não Lineares**. Florianópolis, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia. Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [3] René P.T. Bascopé; A. J. Perin. **O Transistor IGBT Aplicado em Eletrônica de Potência**. 1ª Edição. Florianópolis. Editora: Sagra, 2000.
- [4] Aldo Boglietti, Paolo Ferraris, Mario Lazzari, and Michele Pastorelli. **About the Possibility of Defining a Standard Method for Iron Loss Measurement in SoftMagnetic Materials with Inverter Supply**. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 33, NO. 5, SEPTEMBER/OCTOBER 1997
- [5] BAKER, David M.; AGELIDIS, Vassilios G.; NAYAR, Chem V.; 1997. **A Comparison of Tri-Level and Bi-Level Current Controlled Grid-Connected Single-Phase Full-Bridge Inverters**. Em ISIE'97, vol. 2, pág. 463 – 468.
- [6] Fernando Haeming Gerent. **Metodologia de Projeto de Inversores Monofásicos de Tensão para Cargas Não-Lineares**. Florianópolis, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia. Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.