

## Influência dos Inversores PWM na Qualidade da Energia

José Policarpo G. Abreu    Nery O. Junior    Antonio Carlos C. Pereira

Instituto de Engenharia Elétrica - EFEI  
Av. BPS, 103 - 37500 - 000 - Itajubá (MG)  
e-mail: Polica @ iee.efei.mg.br

**Resumo** - A utilização dos inversores de frequência do tipo PWM tem aumentado vertiginosamente, pois estes contribuem para o aumento da produtividade industrial e para o uso mais eficiente da energia elétrica, porém deterioram a qualidade da energia. Considerando a importância de um conhecimento mais profundo das influências dos inversores na qualidade da energia, surge esse trabalho que, além de investigações teóricas, propõe soluções práticas para uma utilização mais racional desses dispositivos.

**Palavra-chave** - Inversores PWM, qualidade de energia

**Abstract** - The use of PWM type frequency inverters has increased so largely for thus contribute with the industrial productivity and efficiency in the use of electrical energy, though degrading the power quality. Considering the importance of a deeper knowledge of the influence of those inverters in the quality of energy, we propose this work which, besides theoretical investigations, also presents practical solutions for more rational use of these devices.

**Keywords** - PWM inverters, Power quality

### 1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica passa hoje a ser encarada de uma maneira bastante diferente, tanto do ponto de vista do consumidor, seja ele industrial, comercial ou residencial, quanto do ponto de vista do fornecedor.

A eletrônica de potência e a tecnologia de controle proliferam na área industrial, aumentando significativamente a quantidade de cargas perturbadoras e também de cargas sensíveis a essas perturbações. Exemplos marcantes são: acionamentos de velocidade variável, dispositivos de controle, PLC's, SDCD's entre outros.

Um dos efeitos hoje considerado bastante pernicioso é, sem dúvida, a perturbação no nível de tensão do sistema, ocasionando perdas de produção na indústria, cujo processo produtivo esteja baseado em sofisticados sistemas eletrônicos.

Dentre as cargas não lineares, encontram-se, por exemplo, os já populares inversores de frequência, entre eles os inversores PWM, que são largamente utilizados em aplicações que não tem apresentado alto rigor técnico, quando de sua especificação e conseqüente aplicação. Entretanto, por suas características, estes equipamentos apresentam-se como poluidores da rede de alimentação e ao mesmo tempo sensíveis à esta mesma poluição, fenômeno que tem sido agravado, quando instalados em redes de baixo nível de curto-circuito.

A importância de um estudo específico prende-se ao fato de que a análise criteriosa da interrelação do

inversor com a rede, torna-se mais imperiosa, sobretudo pelo aumento vertiginoso do número de unidades instaladas, pois estes dispositivos, contribuem para o aumento da produtividade industrial e para o uso mais eficiente da energia elétrica, porém aumentam as exigências quanto à qualidade da energia consumida. Este crescimento progressivo, pode, sem dúvida, levar a funcionamento precário ou mesmo a inevitáveis paradas de sistemas industriais, configurando vultuosos prejuízos financeiros. Soluções por parte de concessionárias de energia elétrica e de consumidores industriais, devem ser discutidas e implementadas em conjunto, com intuito de assegurar energia de boa qualidade

### II -DISTORÇÕES ORIUNDAS DOS INVERSORES TIPO PWM

O intuito desse trabalho, é investigar a influência dos inversores de frequência PWM, nos sistemas com baixa capacidade de absorção dos harmônicos, ou seja, pontos do sistema com baixa potência de curto circuito. As correntes distorcidas produzidas pelo inversores, irão fluir pelo sistema elétrico e por conseqüência nas impedâncias do mesmo, que possuem um valor considerável devido a baixa capacidade de curto circuito. Isso poderá provocar distorções indesejáveis da tensão no ponto de acoplamento comum ( PAC ) da instalação com o sistema elétrico, e/ou distorções dentro da

instalação. As formas de ondas, os harmônicos e o nível de distorção das correntes e tensões do sistema, serão obtidas por meio de simulações utilizando o software EMTP . A eficácia desse software e do modelo do inversor que foi implementado para as simulações, poderá ser comprovado, através de resultados práticos obtidos em laboratórios.

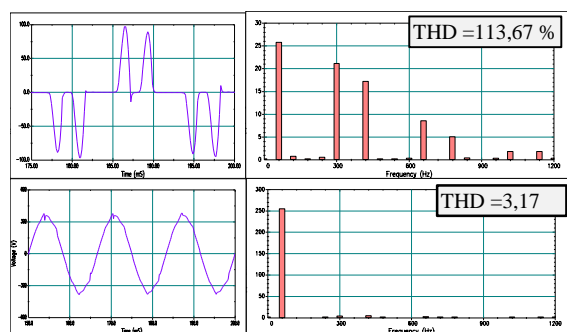


Fig. 1 - Corrente de linha e tensão fase neutro no PAC para o caso em que a  $P_{cc} = 300 \cdot P_{conv}$ .

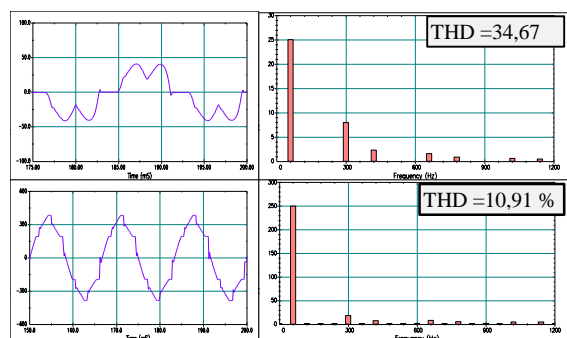


Fig. 3- Corrente de linha e tensão fase neutro no PAC para o caso em que a  $P_{cc} = 20 \cdot P_{conv}$ .

Relação $P_{cc} / P_{conv}$	THD - Corrente de linha	THD - Tensão fase -neutro
300	113,67 %	3,17 %
100	93,91 %	4,46 %
80	76,40 %	5,84 %
60	63,79 %	6,41 %
40	48,52 %	7,45 %
20	34,67 %	10,91 %

Tabela 1 - THD'S para diversas relações  $P_{cc}/P_{conv}$ .

Analisando os dados da tabela acima e as formas de ondas das correntes e tensões , podemos verificar que:

Picos de corrente nos circuitos retificadores, são limitados pelas impedâncias dos alimentadores do circuito . Portanto, as formas de onda da correntes de linha, terão características diferentes para diferentes impedâncias de linha e condições de carga. Como

resultado, inversores sendo alimentados por sistemas com pequenas impedâncias de linha , ou seja, alta capacidade de curto circuito, terão uma forma de onda de corrente com pulsos estreitos e picos elevados , e que possuem uma elevada distorção harmônica, conforme a figura 4.3 . As componentes harmônicas de tais formas de ondas, podem causar interferências indutivas em equipamentos sensíveis conectados no mesmo barramento. Por outro lado, a distorção harmônica da tensão será relativamente baixa , devido a baixa impedância equivalente do sistema o que assegura uma baixa penetração harmônica.

Em sistemas com baixa potência de curto circuito, a penetração harmônica é elevada , como por exemplo, o caso em que a  $P_{cc} = 20 \cdot P_{conv}$  . Embora a distorção harmônica de corrente seja relativamente baixa, a tensão tem uma elevada distorção (  $THD = 10.91\%$  ), quando comparada ao caso em que a  $P_{cc} = 300 \cdot P_{conv}$  , onde a distorção harmônica total é igual a 3,6 % .

O circuito retificador injeta uma corrente pulsante como mostrada nas simulações. Como podemos observar, a forma de onda da corrente é rica em harmônicos . Na análise dos distúrbios gerados por esses harmônicos no sistema elétrico ,os conversores são modelados como fontes de correntes harmônicas que injetam harmônicos de corrente nas impedâncias do sistema, gerando distorções na forma de onda da tensão. Essas distorções na barra onde esta localizada o conversor, será tanto maior quanto menor for a potência de curto circuito do sistema onde o mesmo está localizado. IEEE standard 519 recomenda para sistemas abaixo de 69 kv, que a distorção na tensão seja inferior a 5%. Níveis de distorção inferiores de tensão foram recomendados para sistemas operando em alta tensão. Portanto, baseando-se nos dados da tabela 4.1, pode-se prever , que sistemas cuja potência de curto circuito em torno a 100 vezes a potência do(s) inversor(es) ou menos, tem uma tendência a sofrer distúrbios na forma de onda da tensão, com índices de distorção preocupantes.

Em muitos casos, é possível reduzir os problemas das distorções harmônicas, pela inserção de um reator de linha ou um transformador de isolamento na entrada do inversor, essas indutâncias aumentam a impedancia de linha e reduzem os picos da corrente. Frequentemente, reatâncias são deliberadamente adicionadas pelos fabricantes, tanto no lado AC quanto no lado DC, com o intuito de realizar a regulação, diminuir as distorções , ou para satisfazer o fator de potência requerido pelo consumidor. Muitas vezes, esta operação é ineficiente ou até mesmo prejudicial para o sistema, no que diz respeito a qualidade da energia.

O indutor de alisamento, pode ser colocado tanto no lado AC quanto no lado DC, quanto maior o seu valor, menor serão as ondulações da corrente. Porém, existem restrições para o aumento desse

elemento, pois o mesmo, pode gerar quedas de tensão indesejáveis ou diminuir o tempo de resposta do circuito as variações de carga.

### III - INFLUENCIA DOS INDUTORES NAS DISTORÇÕES

Amplas recomendações foram difundidas no sentido de se colocar indutores na entrada de inversores PWM de baixa tensão . A performance do controle de velocidade dos inversores, é muito boa sem qualquer indutância no link dc ou na linha. Dependendo do sistema elétrico no qual o inversor esta instalado, a falta do indutor pode ser ou não um problema o fabricante realmente não poderia ser totalmente responsabilizado pelo não fornecimento do indutor no link dc ou no circuito externo, uma vez que o inversor pode ser usado em sistemas com potência de curto circuito bem distintas.

As figuras a seguir, mostram a atuação dos filtros indutivos, colocados no link DC e na linha.

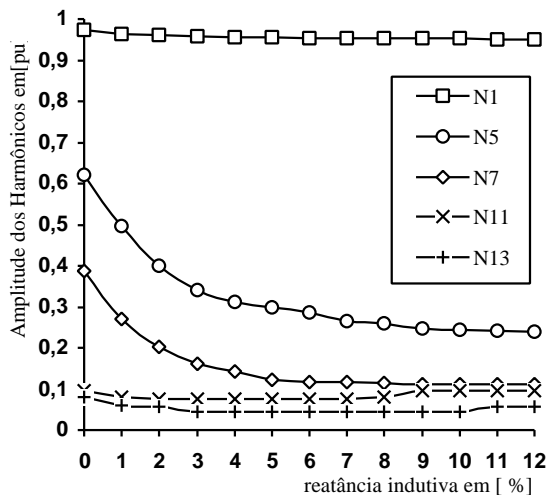


Fig. 3 - Variação das amplitudes dos harmônicos com indutores colocados no link DC

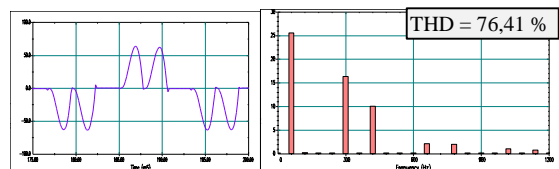


Fig. 4 - Corrente de linha para o caso em que a  $P_{cc} = 80.P_{conv}$ . sem filtro indutivo

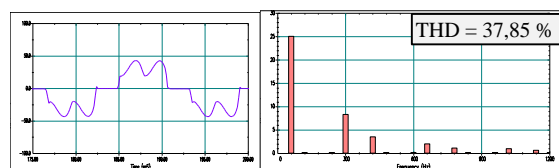


Fig. 5 - Corrente de linha para o caso em que a  $P_{cc} = 80.P_{conv}$ . com um filtro de 4% no link DC

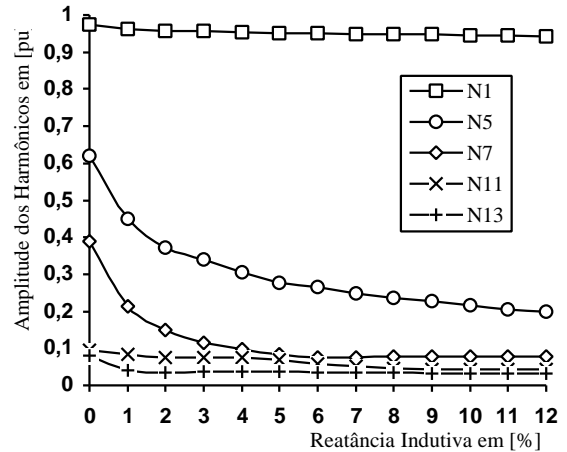


Fig. 6 - Variação das amplitudes dos harmônicos com indutores colocados no link DC

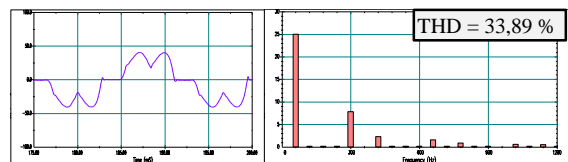


Fig. 7 - Corrente de linha para o caso em que a  $P_{cc} = 80.P_{conv}$ . com um filtro de 4% na linha

A corrente de linha e suas distorções harmônicas, quando o filtro está localizado na linha, tem praticamente o mesmo comportamento de quando o filtro se encontra no link DC. O filtro na linha, é de 10 a 15 % mais efetivo que o filtro no link DC de mesma indutância na redução das distorções harmônicas, porém a queda de tensão nos filtros colocados na linha é superior a queda de tensão nos filtros localizados no link DC. Essa queda de tensão, reduz a tensão sobre o capacitor, e conseqüentemente, a tensão de saída do inversor. Dependendo do projeto do inversor, a redução na tensão de saída, pode resultar na degradação da performance dos motores no instante da partida ou nas condições de sobrecarga.

Indutores superiores a 5% já não serão tão efetivos na redução dos harmônicos, e provavelmente irão interferir num perfeito funcionamento do inversor.

### IV - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS : MEDIÇÃO x SIMULAÇÃO

Foram feitos testes em laboratório, para se comprovar a eficiência do modelo implementado no software EMTP, e alguns desses resultados estão ilustrados nas figuras 7 e 8 a seguir:

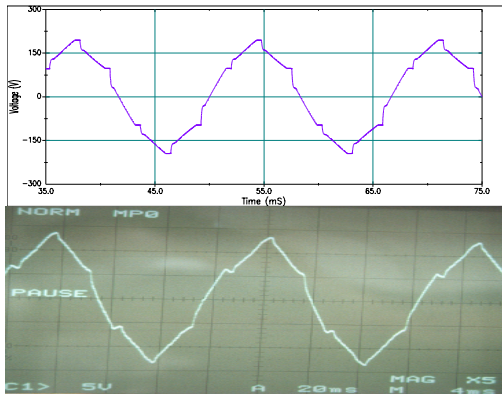


Figura 8- Comparação entre a tensão fase neutro obtida na Simulação e a medição, realizada no laboratório, para o caso em  $P_{cc} = 33 P_{conv}$

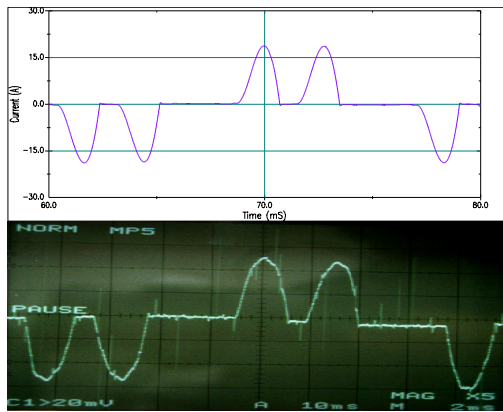


Figura 9 - Comparação entre a tensão fase-fase obtida na Simulação e a medição, realizada no laboratório, para o caso em  $P_{cc} = 110 P_{conv}$

As figuras acima ( 4.16 a 4.24 ), mostram que os resultados da simulação estão muito próximos dos resultados obtidos através das medições, o que comprova a eficiência do modelo implementado .

## V - INFLUÊNCIA DOS TRANSFORMADORES, FILTROS, E OUTRAS CARGAS

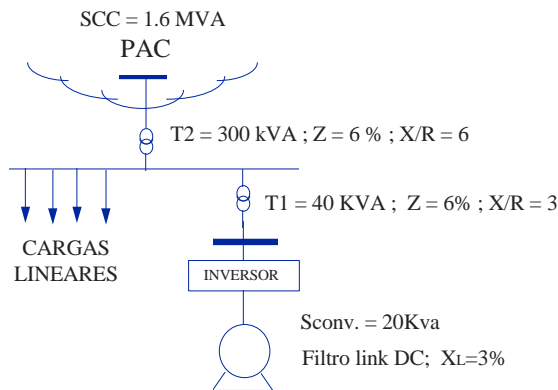


Fig.10 - Sistema utilizado para analisarmos as influências de outros equipamentos

Para verificarmos as influências de outros elementos do sistema nas distorções, serão realizadas as simulações para os seguintes casos:

Caso 1- Somente o inversor (sem o filtro de 3% no link DC) , com a carga linear

Caso 2- inversor (sem o filtro de 3% no link DC) com o trafo T1 e a carga linear

Caso 3- Inversor ( com o filtro de 3% no link DC) com o trafo T1 e a carga linear

Comparando-se as formas de ondas da figura 11, quando não se utilizava o transformador , com a figura 12 com um transformador de alimentação do inversor, Percebe-se que o transformador irá funcionar como um filtro de linha, melhorando consideravelmente as formas de ondas da corrente de linha e principalmente as distorções no PAC, que passou de 5,53 % ( figura 11 ), para 2,73 % ( figura 12 ).

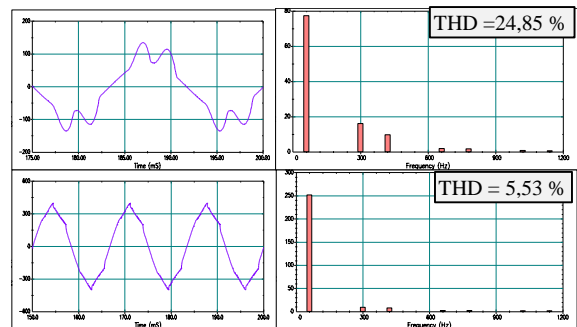


Fig. 11 - Corrente de linha e tensão fase neutro no PAC, para o caso 1

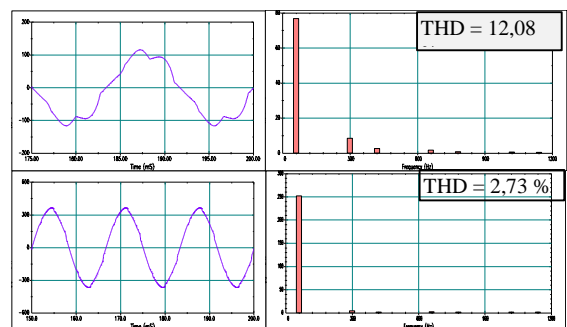


Fig. 12 - Corrente de linha e tensão fase neutro no PAC, para o caso 2

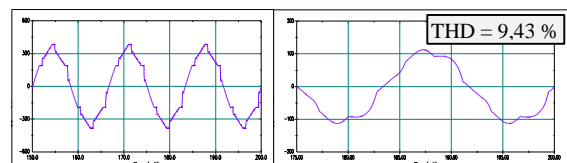


Fig. 13 - tensão fase neutro na entrada do inversor, para o caso 2

Se o fabricante estivesse fornecido um filtro DC de 3% de reatância indutiva, esse filtro teria uma influência limitada nas distorções da corrente ou tensão do sistema, conforme mostra a figura 14. Portanto, a utilização de filtros indutivos na linha ou no link DC pode não resolver o problema de distorções excessivas em um sistema, podendo muitas vezes, ocasionar quedas de tensões indesejáveis que irão prejudicar um perfeito funcionamento do inversor.

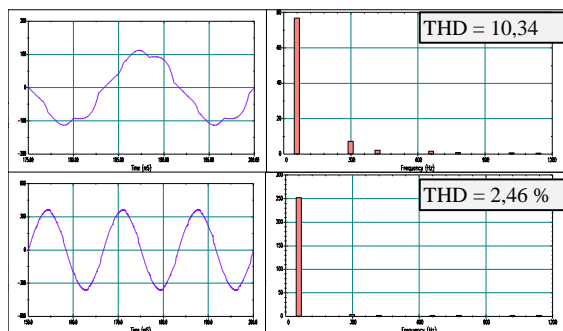


Fig. 14 - Corrente de linha e tensão fase neutro no PAC, para o caso 3

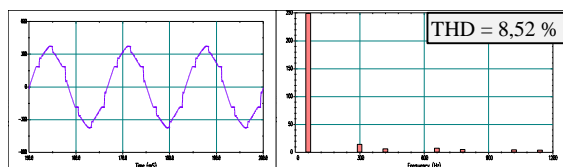


Fig. 15 - tensão fase neutro na entrada do inversor, para o caso 3

Vale aqui ressaltar, que embora a inclusão do transformador de alimentação ou de um reator de linha para o inversor, melhore consideravelmente as distorções harmônicas no PAC, a tensão na entrada do inversor, fica mais distorcida do que antes da inclusão de um desses elementos. Isso se deve, ao aumento da impedância equivalente “vista” pelo inversor, com isso, a relação entre a potência de curto circuito na entrada do inversor e a potência do inversor diminui. Como já foi discutido anteriormente, esse é um dos fatores que determinam o nível de distorção do ponto de acoplamento do inversor. As figuras 13 e 15, ilustram essas distorções da tensão na entrada do inversor.

Pelo o que foi exposto acima, os resultados da inserção do transformador 2 já são previsíveis, ou seja, devido a sua reatância indutiva ser muito baixa (0,4% na base do inversor), ela contribuirá de forma discreta, na melhoria da distorção da tensão no PAC, mas também, irá contribuir para o aumento da distorção da tensão nas cargas alimentadas por este.

Com uma regra básica, para prever se o inversor vai ou não necessitar de uma indutância adicional para controle dos harmônicos, e que deve ser utilizada, quando não se conhece os dados de todo o sistema, é verificar a relação entre a potência do inversor e potência do trafo. Se a relação for inferior a 0.33, então não teremos problemas de distorção da tensão, Se a relação é maior que 0.33 a utilização do indutor deve ser estudada, pois isso implica numa potência de curto circuito no secundário do transformador, inferior a cem vezes a potência do conversor.

## VI - CONCLUSÕES

Todo projeto de instalação e especificação de um inversor, deve receber algum tipo de estudo preliminar de harmônicos, sempre que a relação entre a potência de curto circuito estiver em torno de cem vezes a potência do conversor ou menos, ou ainda, se houver um transformados de alimentação, cuja potência for menor que três vezes a potência do conversor. Se o sistema tende a apresentar problemas de distorção harmônica, a aplicação de um filtro indutivo deve ser estudada, se necessário, o mesmo deve de preferencia ser colocado no link DC. Porém, dependendo da configuração do sistema, a inserção do filtro pode não resolver o problema e ainda prejudicar o performance do inversor. Portanto, não se deve se precipitar em encontrar uma solução para o problema, mas sim verificar todas as alternativas possíveis, de modo a encontrar uma solução de compromisso, que atenda tanto as exigências da concessionária, quanto os padrões de qualidade da energia dentro da instalação.

## VII -REFERÊNCIAS

- [1] James Will Gray and Frank J. Haydock, “Industrial power quality considerations when installing adjustable speed drives systems” IEEE Trans. Industry Application, Vol. IA-32, no.3, pp. 646-654, May/June 1996.
- [8] Thomas H. Ortmeier, Michael Grizer. “ Harmonic evaluation of inductor location in a variable speed drive ” IEEE International Conference on Harmonics in Power Systems, Atlanta, September 22 - 25, 1992
- [18] Joachim Holtz, “Pulsewidth modulation for electronic power conversion,” Proceedings of the IEEE, Vol. 82, no. 8, pp. 1194-1214, August 1994.

[22] IEEE : Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems. IEEE Standard 519, 1992