

# Influência de Inversores de Freqüência na Qualidade da Energia Elétrica

A. D. Callegaro, C. Rheinheimer, E. Kotlinski, T. K. Jappe<sup>1</sup>

**Resumo** - Atualmente o uso dos inversores de freqüência para acionamento de máquinas de indução trifásica, no ambiente industrial, é amplamente difundido. Contudo o inversor de freqüência, geralmente, em sua topologia possui no estágio de entrada um retificador que, conforme sua operação pode vir a afetar a qualidade da energia elétrica. Este artigo propõe um estudo da influência do AVV – acionamento de velocidade variável – no ambiente industrial, mais especificamente a THD dos mesmos, avaliando o inversor como uma carga ao sistema elétrico. Avalia-se também o enquadramento dos inversores nas normas IEEE 519 e IEC 61000-3-2. Ensaio em laboratórios são realizados, utilizando dois inversores de freqüência de uma mesma marca de fabricante, cujas técnicas de modulação PWM são antagônicas. As medições são realizadas com a plataforma de potência Dranetz/BMI.

**Palavras-chave** - distorção harmônica, inversores de freqüência, qualidade de energia.

## I. INTRODUÇÃO

Para melhor eficiência dos equipamentos e um melhor aproveitamento da energia elétrica, o emprego de inversores de freqüência em ambientes industriais, comerciais e até mesmo residenciais, tem sido uma opção muito utilizada, quando o intuito é controlar a velocidade de máquinas de indução.

Os inversores de freqüência geralmente são utilizados junto a motores de indução, para que haja a possibilidade de variação da velocidade de operação e/ou da carga acoplada ao motor. No entanto, o conteúdo harmônico gerado pelo inversor varia de acordo com esta variação de velocidade, assim, podendo causar danos à carga acoplada do inversor, bem como à rede elétrica [1].

O objetivo deste artigo é analisar a THD (distorção harmônica total) gerada por inversores de freqüência monofásicos, operando na condição de carga ao sistema elétrico. Deseja-se comparar os resultados obtidos com normas internacionalmente reconhecidas, e verificar o enquadramento dos inversores nestas normas, sem que haja utilização de qualquer tipo de sistema que venha minimizar a distorção gerada pelos mesmos.

Os inversores usados nos ensaios são de uma marca amplamente difundida no acionamento de máquinas elétricas em processos industriais.

## II. DISTORÇÃO HARMÔNICA

A principal causa da distorção harmônica na rede elétrica é a característica não-linear de alguns equipamentos. Esta não linearidade tende a causar uma distorção harmônica na corrente [2].

Correntes harmônicas nada mais são que correntes em freqüências múltiplas inteiras da freqüência fundamental, ou seja, a freqüência em que opera o sistema. Estas correntes harmônicas, quando somadas à fundamental, resultam em uma distorção harmônica na corrente, a qual, interagindo com a impedância da linha, tende a resultar em uma distorção harmônica também na tensão. Assim, mesmo que a tensão da fonte seja senoidal, a tensão no ponto de acoplamento comum (PAC) pode ser distorcida devido à interação das correntes harmônicas com a impedância da rede elétrica.

A distorção harmônica total (THD) pode ser calculada utilizando a equação (1), onde  $U_1$  é a componente fundamental,  $U_n$  são as componentes harmônicas de corrente ou tensão, e “ $n$ ” denota o número da harmônica [3].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} U_n^2}}{U_1} * 100\% \quad (1)$$

A presença de componentes harmônicas em sistemas de energia elétrica pode causar grandes danos a equipamentos que venham a fazer parte destes, como por exemplo, ruídos excessivos em motores, redução de vida útil, interferências em sistemas de comunicação, saturação de transformadores, dentre outros.

<sup>1</sup> Estudo realizado pelo Laboratório de Análise da Qualidade da Energia Elétrica – LAQUEE, financiado pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí – RS – Brasil.

A. D. Callegaro é acadêmico do curso de Engenharia Elétrica – UFSC, Florianópolis – SC – Brasil (alancallegaro@gmail.com).

C. Rheinheimer é acadêmica do curso de Engenharia Elétrica – UNIJUÍ (carol.ege@gmail.com).

E. Kotlinski é professor do curso de Engenharia Elétrica – UNIJUÍ (eliseu.kotlinski@gmail.com).

T. K. Jappe é mestrando pelo INEP – UFSC, Florianópolis – SC – Brasil (tiagokj@gmail.com).

### III. NORMAS E RECOMENDAÇÕES

É importante que equipamentos de características não lineares, geradores de alto conteúdo harmônico, como o estágio de entrada dos inversores de frequência, sigam normas e recomendações que estabeleçam limites aceitáveis de distorção harmônica, sem que estes causem danos ao sistema. No Brasil, por falta de normas específica, a orientação é que seja observado o que estabelecem as normas IEEE 519 e IEC 61000-3-2.

O IEEE, em seu *paper* IEEE 519/1992, intitulado “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, recomenda como aceitáveis níveis de distorção harmônica de tensão, no PAC, inferiores a 3% quando se trata de distorção individual, sendo que a distorção harmônica total não pode ultrapassar 5% [3], como mostra a Tabela 01.

TABELA 01:

LIMITE DA DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO PARA SISTEMAS ELÉTRICOS ESTABELECIDOS PELA NORMA IEEE 519/1992.

Tensão no PAC	Distorção individual	Distorção total
Inferior a 69 kV	3,0%	5,0%

Fonte: IEEE 519/1992

Os limites de distorção harmônica de corrente, estabelecidos pelo IEEE, estão conforme a Tabela 02, que apresenta os valores limites das ordens harmônicas para a classe de 120V a 69kV.

TABELA 02:

LIMITES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA DE CORRENTE PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO (120V A 69kV), SEGUNDO A IEEE 519/1992

Máxima Distorção de Harmônicas de Corrente em (%) de $I_{nom}$				
Ordem das Harmônicas Individuais (Harmônicas Impares)				
$I_{cc}/I_{nom}$	<11	11≤h<17	17≤h<23	THD
<20	4,0	2,0	1,5	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	15,0
>100	15,0	7,0	6,0	20,0

Harmônicas Pares são limitadas em 25% da harmônicas impares acima indicadas. Distorções de corrente que resultem em off-set CC, não serão permitidas.

Onde:  $I_{cc}/I_{nom}$  = relação entre a máxima corrente de curto circuito no PAC e a corrente nominal relativa a demanda da carga (componente da frequência fundamental) no PAC

Fonte: IEEE 519/1992

No entanto, a IEEE 519 não recomenda aos fabricantes, limites de distorção harmônica especificamente para inversores de frequência.

Já a norma europeia IEC 61000-3-2, intitulada “Harmonic limits for equipment with input currents <16A per phase”, estabelece limites de distorção harmônica de corrente para sistemas com menos de 16A por fase. Esta separa diferentes tipos de equipamentos por classes e estabelece limites de correntes equivalentes a cada harmônico contido no sistema.

TABELA 03

LIMITES DE HARMÔNICOS DE CORRENTE EM EQUIPAMENTOS DE CLASSE A ESTABELECIDO PELA NORMA IEC 61000-3-2

Ordem do Harmônico	Limite de Corrente (A)
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21

Fonte: IEC 61000-3-2

Os inversores de frequência, abordados neste artigo, enquadram-se na Classe A, segundo o estabelecido pela IEC 61000-3-2, portanto apresentam limites de frequências harmônicas de corrente conforme a Tabela 03.

Com relação a harmônicos de tensão, a IEC 61000-3-2 limita os níveis individuais das tensões harmônicas conforme o mostrado na Tabela 04. Com referência ao termo de compatibilidade a períodos superiores a um minuto a norma limita o valor para a distorção harmônica total da tensão em 8% [4].

TABELA 04:

NÍVEIS INDIVIDUAIS DE TENSÕES HARMÔNICAS EM BAIXA TENSÃO ESTABELECIDOS PELA IEC 61000-3-2

Harmônicas Impares não múltiplas de 3		Harmônicas Impares múltiplas de 3	
Ordem (h)	Distorção(%)	Ordem (h)	Distorção(%)
5	6	3	5
7	5	9	1,5
11	3,5	15	0,4
13	3	21	0,3

Fonte: IEC 61000-3-2

### IV. INVERSORES DE FREQUÊNCIA

A estrutura típica e simplificada de um inversor de frequência é apresentada na Figura 01. A operação desse conversor permite que seja aplicada à carga uma frequência diferente da entrada, fundamento esse, essencial no controle de máquinas de indução.

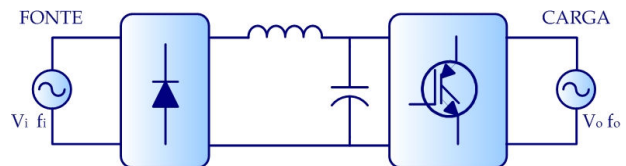


Fig. 01. Diagrama simplificado de um inversor de frequência

O estágio de entrada configura-se como um circuito retificador, que pode ser tanto monofásico quanto trifásico, dependendo da potência nominal da carga alimentada. Geralmente inversores de frequência comerciais possuem entrada tanto monofásica quanto trifásica em aplicações com baixas potências.

Sob o ponto de vista de qualidade de energia elétrica, caso não haja nenhum sistema de minimização de harmônicas, o estágio de entrada do AVV, é extremamente prejudicial para a

rede. Isso é devido à corrente drenada pelo conversor, a qual apresenta forma de onda pulsada contendo componentes harmônicos de baixa ordem [5].

Destaca-se ainda na Figura 01, o link CC composto por um circuito LC com função de filtro, para manter a tensão CC constante e isenta de ondulações. Finalmente o estágio de saída do conversor apresenta uma ponte inversora que opera com elevada frequência de comutação. Através de modulação adequada, pode-se controlar a amplitude bem como a frequência da forma de onda aplicada à carga.

## V. ENSAIOS REALIZADOS

Dois tipos de inversores de uma determinada marca foram utilizados para a realização de ensaios em laboratório. Ambos os inversores foram alimentados em 220V através de uma fonte de tensão controlada *Califórnia Instruments*, operando na frequência de 60Hz.

Os inversores utilizados apresentam especificações conforme a Tabela 05. O primeiro ensaio foi realizado utilizando o Inversor 1 e, posteriormente, realizado o segundo ensaio com o Inversor 2.

TABELA 05

ESPECIFICAÇÕES DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA UTILIZADOS EM ENSAIOS - LAQUEE- ABRIL/2006

	Entrada		Saída		
	Tensão	Corrente	Tensão	Corrente	Frequência
<b>Inversor 1</b>	0 a 220V	5,5A	0 a 220V	2,4A	0 a 300Hz
<b>Inversor 2</b>	220/240V	8,8A	220/240V	4A	0 a 60Hz

Fonte: Ensaios LAQUEE

As medições foram realizadas com a plataforma de potência Dranetz/BMI, sendo este conectado na entrada dos inversores, obtendo assim medições do inversor operando na condição de carga à rede elétrica. A frequência entregue a carga varia de 10Hz à 60Hz, sendo obtidos os dados de tensão e corrente a cada variação de 10Hz.

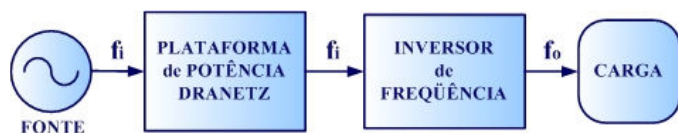


Fig. 02. Diagrama simplificado das medições realizadas em inversores

## VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Após a realização das medições, os resultados obtidos foram analisados através do software Dranview, específico para a plataforma de potência Dranetz, obtendo-se os respectivos espectros harmônicos, valores de THD, e formas de onda de tensão e corrente equivalentes às medições.

### A. Ensaio 1

No ensaio realizado com o Inversor 1, são observadas formas de onda de tensão e corrente em medição feita na entrada do mesmo. As figuras 03 e 04 apresentam as formas de onda de tensão e corrente do inversor operando nas frequências de 10 e 60Hz, respectivamente. Nota-se que a corrente de entrada do inversor apresenta forma de onda pulsada, típica de sistemas com característica de retificador monofásico.

As correntes apresentaram valores de pico iguais 3,7A e 22,5A, com o inversor fornecendo frequências de 10 e 60Hz, respectivamente.

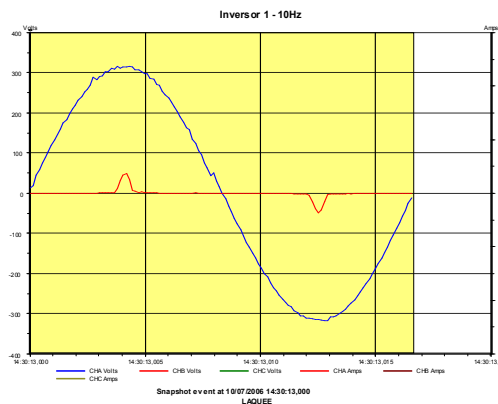


Fig. 03. Formas de onda de tensão e corrente na entrada do Inversor 1 à 10Hz

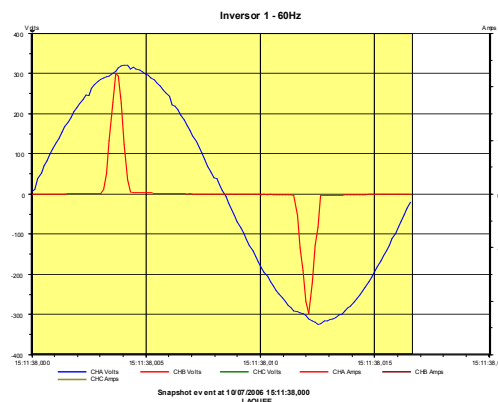


Fig. 04. Formas de onda de tensão e corrente na entrada do Inversor 1 à 60Hz

As figuras 05 e 06 mostram os espectros harmônicos de corrente referentes às frequências de 10Hz e 60Hz, respectivamente. Nota-se a expressiva amplitude da 3ª harmônica, e harmônicas de baixa ordem, o que acontece em qualquer frequência que o inversor esteja fornecendo à carga.

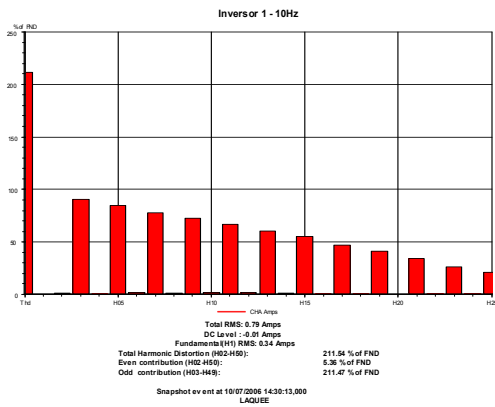


Fig. 05. Espectro Harmônico da corrente de entrada do Inversor 1 à 10Hz

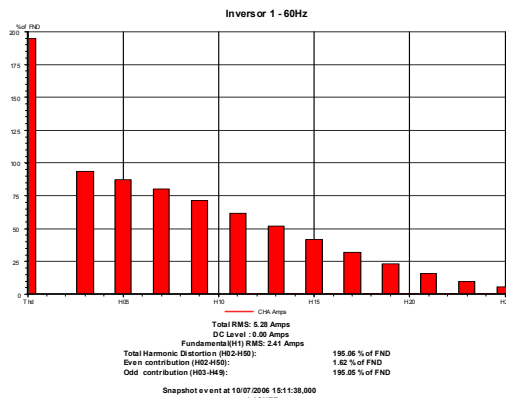


Fig. 06. Espectro Harmônico da corrente de entrada do Inversor 1 à 60Hz:

TABELA 06  
DISTORÇÃO HARMÔNICA GERADA PELO INVERSOR 1 - LAQUEE - JULHO/2006

Frequência (Hz)	THDi (%)	THDv (%)
10	211,54	0,77
20	207,88	1,30
30	203,04	1,27
40	199,50	0,99
50	195,97	0,93
60	195,06	1,18

Fonte: Ensaios LAQUEE

Na Tabela 06, é apresentado um resumo dos dados obtidos nos ensaios realizados com o Inversor 1. Nota-se que a distorção harmônica de tensão apresenta valores relativamente pequenos, em quanto a distorção de corrente é significativa. Não é notada uma grande influência da frequência que o inversor oferece à carga, na porcentagem de distorção harmônica causada pelo mesmo.

TABELA 07  
DISTORÇÃO SEGUNDO A ORDEM DO HARMÔNICO INVERSOR 2 - LAQUEE - JULHO/2006

Ordem do Harmônico	Distorção 10Hz		Distorção 60Hz	
	(%)fnd	RMS	(%)fnd	RMS
3	90	0,31	93	2,24
5	85	0,29	90	2,16
7	80	0,27	80	1,93
9	75	0,25	70	1,69
11	70	0,24	65	1,57
13	65	0,20	52	1,25

Fonte: Ensaios LAQUEE

As amplitudes dos harmônicos de corrente são analisadas individualmente através da Tabela 07. Nesta pode-se fazer uma comparação com os limites estabelecidos pela norma IEC 61000-3-2.

Nota-se que à 10Hz todos harmônicos apresentam valores menores que o estabelecido, porém à 60Hz, apenas o terceiro harmônico enquadra-se à norma.

## B. Ensaio 2

Da mesma forma que o primeiro ensaio, no Ensaio 2 foram realizadas medições na entrada do Inversor 2, com sua frequência variada de 10 à 60Hz.

Como ocorrido no ensaio anterior, a corrente de entrada apresentou novamente forma de onda pulsada, como mostram as figuras 7 e 8. Conforme o aumento da frequência de operação dos inversores, novamente constatou-se o aumento da corrente de entrada, obtendo-se valores de pico iguais a 4A e 18A, com a frequência de carga operando a 10Hz e 60Hz, respectivamente.

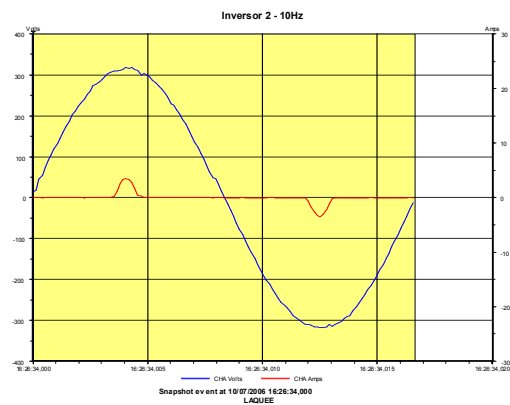


Fig. 07. Formas de onda de tensão e corrente na entrada do Inversor 2 à 10Hz

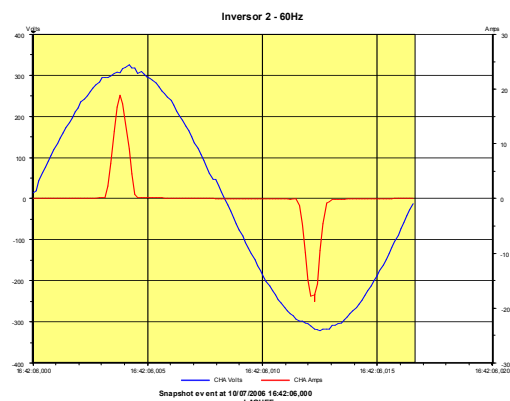


Fig. 08. Formas de onda de tensão e corrente na entrada do Inversor 2 à 60Hz

Independente da frequência fornecida pelo inversor, a harmônica de ordem três apresentou maior influência nas correntes de entrada do mesmo, como mostram os espectros harmônicos nas figuras 08 e 09.

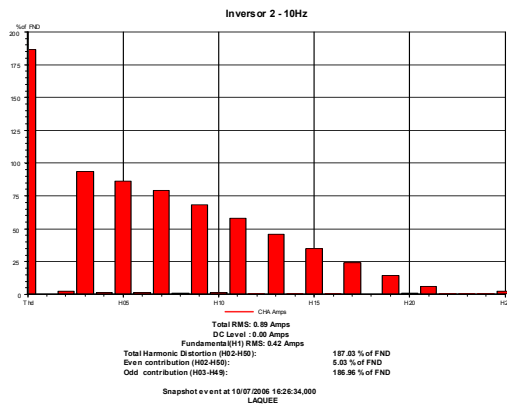


Fig. 08. Espectro Harmônico da corrente de entrada do Inversor 2 à 10Hz

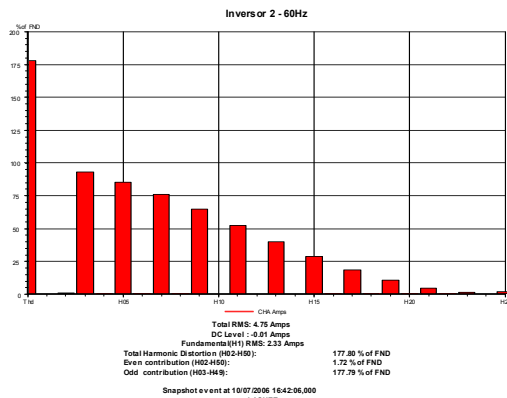


Fig. 09. Espectro Harmônico da corrente de entrada do Inversor 2 à 60Hz

Na Tabela 08 tem-se um resumo de distorção harmônica total, obtida através dos ensaios com o Inversor 2. Nota-se que, a distorção de corrente apresenta valores inferiores aos obtidos em ensaios com o Inversor 1, porém esta diferença não se dá de forma significativa. Mais uma vez a variação de frequência não alterou significativamente porcentagem da distorção gerada.

TABELA 08  
DISTRORÇÃO HARMÔNICA GERADA PELO INVERSOR 2 - LAQUEE- JULHO/2006

Frequência (Hz)	THDi (%)	THDv (%)
10	187,03	0,75
20	179,07	0,95
30	178,23	1,01
40	177,65	1,02
50	176,52	1,02
60	177,80	1,01

Fonte: Ensaios LAQUEE

TABELA 09  
DISTRORÇÃO SEGUNDO A ORDEM DO HARMÔNICO INVERSOR 2 - LAQUEE- JULHO/2006

Ordem do Harmônico	Distorção 10Hz		Distorção 60Hz	
	(%)fnd	RMS	(%)fnd	RMS
3	93	0,39	93	2,16
5	85	0,37	80	1,86
7	80	0,34	75	1,74
9	65	0,27	65	1,51
11	60	0,25	55	1,28
13	45	0,19	40	0,93

Fonte: Ensaios LAQUEE

As amplitudes das correntes harmônicas são mostradas individualmente na Tabela 09. Pode-se constatar que, quando à frequência de 60Hz, apenas a harmônica de ordem três apresenta conformidade com a norma IEC 61000-3-2. No entanto, quando a frequência fornecida pelo inversor é de 10Hz, todas as correntes harmônicas apresentam-se em regularidade.

## VII .CONCLUSÕES

De forma geral pode-se dizer que ambos inversores apresentaram desempenhos semelhantes, com uma diferença não muito significativa entre as THDs. Porém, o Inversor 2 apresentou valores menores de distorção harmônica de corrente, em todas as frequências fornecidas pelo mesmo, podendo-se dizer que este é menos prejudicial à qualidade da energia elétrica.

Quanto à variação de frequência fornecida pelos inversores, não pode-se dizer que houveram grandes variações na porcentagem de distorção harmônica gerada. Porém, constatou-se que, quanto maior a frequência fornecida pelo inversor à carga, maior a corrente drenada pelo mesmo, resultando em correntes harmônicas de amplitudes maiores. Pode-se concluir que, os inversores geram menos distorção harmônica, quando fornecem menores frequências à carga.

Em relação às normas citadas, os inversores ensaiados apresentam parcial irregularidade com a IEC 61000-3-2. Quando a frequência fornecida pelos inversores foi 60Hz, apenas a harmônica de ordem três apresentou valores inferiores ao estabelecido. No entanto, à 10Hz, todas as harmônicas apresentaram enquadramento.

Em comparação dos resultados obtidos nos ensaios com a IEEE 519, a porcentagem de distorção de corrente mostrara-se superior aos limites aceitáveis.

Neste estudo não pode-se fazer uma análise do enquadramento da distorção harmônica de tensão nas normas IEC 61000-3-2 e IEEE 519, uma vez que, nos ensaios, não foram utilizados elementos simulando a impedância da rede. Em um caso real, a impedância de linha certamente acarretaria em uma distorção harmônica na tensão maior que a obtida nos ensaios realizados.

No Brasil, inexistência de regulamentação estabelecendo limites de distorção harmônica gerada por equipamentos, resulta em uma baixa qualidade na energia elétrica. Para minimizar a poluição na qualidade da energia, os fabricantes de equipamentos deveriam obedecer os limites de distorção toleráveis por normas internacionais, o que acaba não ocorrendo. Seria interessante a criação de normas brasileiras que regulamentem os equipamentos produzidos dentro do país.

## VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ROSSA, Adalberto J.; TORRI, Paulo J.; FATOR DE POTÊNCIA E DISTRORÇÃO HARMÔNICA EM INSTALAÇÕES COM INVERSORES DE FREQUÊNCIA. *Eletricidade Moderna*. Ano XXVIII, n. 316, p. 38-57, 2000.

[2] GALHARDO, Marcos A. B.; PINHO, João T.; CONCEITOS DE DISTORÇÃO E NÃO-LINEARIDADES. In: **Seminário Brasileiro sobre a Qualidade da Energia Elétrica**, 5, 2003, Aracaju.

[3] IEEE standard 519, 1992: IEEE RECOMMENDED PRACTICES AND REQUIREMENTS FOR HARMONIC CONTROL IN ELECTRICAL POWER SYSTEM.

[4] CEI/IEC 61000-3-2, 2000: ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) – Part 3-2: Limits – LIMITS FOR HARMONIC CURRENT EMISSIONS (EQUIPMENT INPUT CURRENT <16A PER PHASE).

[5] ALVES, Joable A.; HORNBERG, Edson; HIGH AND LOW ORDER HARMONICS FOR FREQUENCY INVERTERS. **VI INDUSCON**. Joinville, 2004.

[6] KEHLER, Clóves J.; A CORRETA APLICAÇÃO DA NORMA IEEE 519 NA INDÚSTRIA E O DESEMPENHO DOS ACIONAMENTOS. **Eletricidade Moderna**. Ano XXXII, n. 358, p. 106-113, 2004.

**Caroline Rheinheimer**, é acadêmica do curso de Engenharia Elétrica pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI. Desde 2005 é bolsista de iniciação científica no Laboratório de Análise da Qualidade da Energia Elétrica – LAQUEE. Áreas de interesse: Qualidade de Energia Elétrica, Transmissão e Distribuição de Energia.

**Eliseu Kotlinski**, possui graduação em Licenciatura Plena Em Matemática pelo Instituto de Ensino Superior Imaculada Conceição (1993) , graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (1990). Atualmente é professor titular da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI, e coordenador do Laboratório de Análise da Qualidade da Energia Elétrica – LAQUEE. Áreas de interesse: Qualidade de Energia Elétrica, Transmissão e Distribuição de Energia.

**Tiago Kommers Jappe**, possui graduação em Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica, pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUI (2006). Atualmente cursa mestrado no Instituto de Eletrônica de Potência - INEP - UFSC. Área de Interesse: Controle Digital de Conversores Estáticos de Potência, Conversores com Alto Fator de Potência, Qualidade de Energia Elétrica.

## IX .BIOGRAFIAS

**Alan Dorneles Callegaro**, é acadêmico do curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, bolsista de iniciação científica no Instituto de Eletrônica de Potência – INEP. Área de interesse: Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia Elétrica.