



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ - 22  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO XIII  
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE  
ENERGIA - GCQ**

**ESTUDO DE RAMAIS RURAIS QUE UTILIZAM CONDUTORES NÃO CONVENCIONAIS SOB O ASPECTO  
DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

**Renata K. S. Silva \* Euler B. Santos Gentil M. M. Júnior Antônio C. B. Alves Adalberto J. Batista**

**Escola de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Federal de Goiás**

**RESUMO**

Este trabalho apresenta um estudo sobre a qualidade da energia elétrica em ramais rurais que utilizam condutores não convencionais. O condutor objeto deste trabalho é o arame de aço galvanizado.

Um estudo comparativo é realizado utilizando medições em ramais rurais que utilizam condutores convencionais e não convencionais. Através dos resultados obtidos verifica-se a viabilidade, quanto à qualidade da energia elétrica, do uso do arame de aço como condutor elétrico em linhas de distribuição rurais.

**PALAVRAS-CHAVE**

Distorção harmônica, Fator de potência, Condutores não convencionais.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O não acesso à energia elétrica impõe inúmeros problemas sócio-econômicos às populações rurais. Deste modo, a eletrificação rural se apresenta como um importante benefício social que contribui para a melhoria da qualidade de vida destas populações.

O desenvolvimento de tecnologias alternativas que levem energia elétrica às comunidades rurais a um custo acessível deve ser estimulado, porém deve-se observar se os indicadores da qualidade da energia elétrica para estas tecnologias apresentam valores aceitáveis.

Este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo que permita verificar a viabilidade, do ponto de vista da qualidade da energia elétrica, do uso do aço como condutor elétrico em linhas de distribuição rural. A proposta do aço como condutor elétrico ocorre por este ser um produto constituído de matéria prima nacional, apresentando deste modo um valor comercial menor que o cobre e o alumínio.

A metodologia desenvolvida neste trabalho é teórico experimental, sendo a parte experimental baseada em medições realizadas em campo, utilizando o analisador de energia trifásico *Power Platform 4300 Dranetz BMI*.

As medições em campo são realizadas em ramais rurais existentes com o propósito de investigar alguns indicadores da qualidade da energia elétrica.

Um programa computacional foi elaborado com o objetivo de realizar o tratamento dos dados obtidos das medições e determinar vários parâmetros relacionados à qualidade da energia elétrica.

**2.0 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Os sinais instantâneos e periódicos de tensão e corrente são obtidos nas instalações do consumidor rural utilizando um equipamento que realiza aquisição de dados.

Considerando a existência de harmônicos, a onda de tensão pode ser representado, de acordo com a série de Fourier descrita na equação [1], como em (1).

$$v(t) = V_o + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t + \theta_n) \quad [1]$$

onde:

$V_o$  - valor da componente contínua da onda de tensão;

$V_n$  - valor eficaz do harmônico de ordem "n" da onda de tensão;

$\theta_n$  - ângulo de fase da harmônica de ordem "n" da onda de tensão;

n - ordem harmônica.

Sendo:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad [2]$$

onde:

f - é a frequência da componente fundamental. Neste trabalho será considerado f = 60 Hz por se tratar do sistema elétrico brasileiro.

O valor eficaz da onda de tensão ( $V_{ef}$ ) é calculado de acordo com [3], como em (2).

$$V_{ef} = \left[ \sum_{n=0}^{\infty} V_n^2 \right]^{1/2} \quad [3]$$

Analogamente, a onda de corrente considerando a presença de harmônicos pode ser representado de acordo com [4].

$$i(t) = I_o + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \beta_n) \quad [4]$$

onde:

$I_o$  - valor da componente contínua da onda de corrente;

$I_n$  - valor eficaz do harmônico de ordem "n" da onda de corrente;

$\beta_n$  - ângulo de fase da harmônica de ordem "n" da onda de corrente;

n - ordem harmônica.

O valor eficaz da onda de corrente ( $I_{ef}$ ) é calculado de acordo com [5].

$$I_{ef} = \left[ \sum_{n=0}^{\infty} I_n^2 \right]^{1/2} \quad [5]$$

Neste trabalho, o estudo da potência é feito com base no equacionamento da potência descrito em (3), (4).

A potência instantânea é definida pelo produto dos sinais instantâneos de tensão e corrente, segundo [6], como em (5).

$$p(t) = v(t)i(t) \quad [6]$$

A potência ativa (P) é o valor médio da potência instantânea, e pode ser obtida por [7].

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\theta_n - \beta_n) \quad [7]$$

O cálculo da potência reativa (Q) é realizado de maneira tal que resulte uma parcela em quadratura com P. Assim sendo, Q é obtida através de [8].

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin(\theta_n - \beta_n) \quad [8]$$

Além das componentes retro mencionadas, este equacionamento propõe ainda a existência de uma terceira componente denominada de potência de distorção (D), a qual é obtida através da expressão [9].

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad [9]$$

onde:

S - é a potência aparente obtida através do produto dos valores eficazes de tensão e corrente, segundo [10].

$$S = V_{ef} I_{ef} \quad [10]$$

O fator de potência (FP) representa um importante parâmetro de qualidade da energia, uma vez que quantifica a eficácia da utilização da energia elétrica. O valor de FP é obtido através de [11], segundo (4).

$$FP = \frac{P}{S} \quad [11]$$

Considerando apenas a componente fundamental o fator de potência pode ser calculado de acordo com [12], o qual será aqui denominado de fator de deslocamento (FD), como em (6).

$$FD = \cos(\theta_1 - \beta_1) \quad [12]$$

Neste trabalho, para possibilitar um estudo comparativo, o fator de potência será calculado por [11] e [12]. O valor de FP obtido através de [11] representa o fator de potência verdadeiro, uma vez que leva em consideração os conteúdos harmônicos dos sinais de tensão e corrente.

O conteúdo harmônico dos sinais de tensão e corrente analisados será quantificado pelo indicador denominado de distorção harmônica total (DHT). Este indicador fornece a medida da proximidade da forma de onda de sua componente fundamental, segundo (7), e é determinado através da expressão [13], a qual pode ser aplicada tanto para tensão como para corrente.

$$DHT_M = \frac{1}{M_1} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} M_n^2} 100(\%) \quad [13]$$

onde:

$M_n$  - é o valor eficaz do n-ésimo componente harmônico da onda M observada.

### 3.0 - ESTUDO DE CASOS

A metodologia utilizada nos estudos de casos teve como filosofia medições realizadas em campo. Para tal propósito, as aquisições de dados foram efetuadas através do analisador de energia trifásico *Power Platform 4300 Dranetz BMI*.

As mencionadas medições de campo foram efetuadas em ramais rurais existentes e tiveram como objetivo possibilitar a verificação dos efeitos provocados por cargas lineares e não lineares, comumente utilizadas por consumidores rurais. Deste modo, selecionou-se para o estudo uma rede cujo tronco é constituído de condutor de alumínio, possuindo ramais rurais com condutores de aço e também de alumínio.

A escolha de dois ramais vinculados ao mesmo tronco e com ponto de derivação com distância relativamente curta entre si tem caráter de permitir comparação entre as distorções harmônicas de tensão ( $DHT_V$ ) em ambos os ramais, inclusive na situação sem carregamento. Nesta situação, o ramal com arame de aço apresentou uma  $DHT_V$  de 5,06%, enquanto que a  $DHT_V$  para o ramal com condutor de alumínio foi de 5,02%. Deste modo, a diferença que se observa, quando o ramal com condutor de alumínio é considerado como referência, é de 0,04%. A Figura 1 ilustra a realização de medições efetuadas em ramal rural que utiliza condutor não convencional.



FIGURA 1 – Medição realizada em ramal rural que utiliza condutor não convencional.

Neste trabalho são apresentados dois estudos de casos, quais sejam:

Caso I: neste caso foram analisados os efeitos de cargas lineares e não lineares quando o condutor do ramal é constituído de condutor não convencional, neste trabalho o arame de aço galvanizado (# 5,94 mm<sup>2</sup>);

Caso II: neste caso foram analisados os efeitos de cargas lineares e não lineares quando o ramal é constituído de condutor convencional, neste trabalho o condutor de alumínio com alma de aço (# CAA 4 AWG).

As medições foram realizadas, nas mesmas condições para ambos os casos, no que se refere à natureza das cargas utilizadas, conforme Tabela 1. É oportuno ressaltar que ambos os ramais são monofásicos com comprimento de aproximadamente 1 km.

TABELA 1 – Descrição das cargas utilizadas nos estudos de caso.

Situação	Descrição
Carga A	Chuveiro
Carga B	Televisão
Carga C	Lâmpadas fluorescente compacta
Carga D	Geladeira + Televisão + Lâmpadas fluorescente compacta + Lâmpadas incandescente + Chuveiro

Antes de se iniciar as medições com as cargas descritas na Tabela 1, mediu-se a tensão instantânea da rede de alimentação sem carga, a fim de verificar a forma de onda da tensão.

#### 4.0 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para o processamento dos dados obtidos das medições em campo, elaborou-se um programa computacional com base em métodos da análise numérica e na transformada rápida de Fourier. Os parâmetros relativos à qualidade da energia elétrica obtidos com este programa viabilizam a emissão de diagnósticos importantes relativos aos ramais observados.

O conteúdo harmônico dos sinais analisados pode ser obtido através do espectro de frequência, o qual representa os valores percentuais das amplitudes de cada componente harmônica em relação à fundamental.

É oportuno salientar que embora os gráficos relativos ao espectro harmônico apresentem as componentes harmônicas até a vigésima quinta ordem, em todas as operações foram consideradas as harmônicas até a sexagésima quarta ordem.

Para melhor visualizar os resultados obtidos, serão apresentadas as formas de onda instantâneas de tensão e corrente, bem como seus espectros harmônicos através do funcionamento individual de cargas lineares e não lineares e o funcionamento simultâneo das mesmas.

##### 4.1 Resultados obtidos em ramal rural que utiliza condutor convencional

Nesta seção serão ilustrados alguns dos resultados obtidos com as medições realizadas no ramal rural que utiliza o condutor de alumínio com alma de aço.

A primeira carga analisada é a Carga A (chuveiro). As Figuras 2 e 3 ilustram os gráficos referentes às ondas de tensão e corrente, respectivamente.

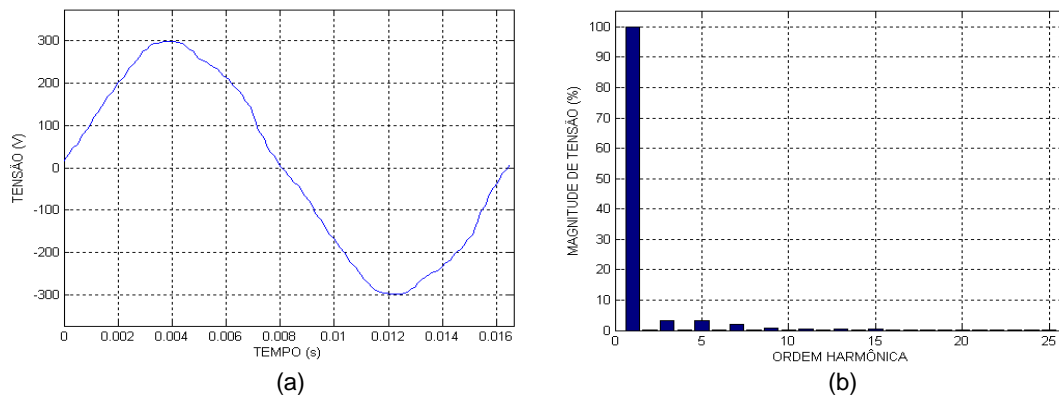


FIGURA 2 – Gráficos da onda de tensão referentes à Carga A, Caso I – (a) Onda no domínio do tempo, (b) Espectro harmônico.

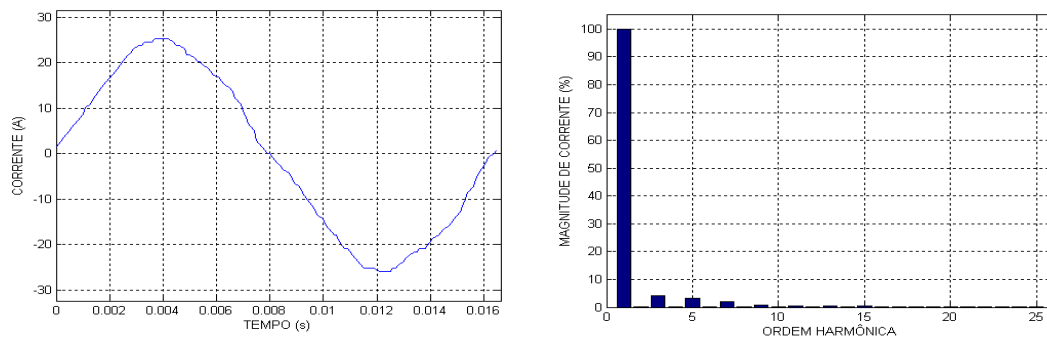


FIGURA 3 – Gráficos da onda de corrente referentes à Carga A, Caso I – (a) Onda no domínio do tempo, (b) Espectro harmônico.

Nas Figuras 2 e 3 observa-se um formato similar entre as formas de onda instantâneas de tensão e corrente e os conteúdos harmônicos destas ondas, caracterizando o comportamento linear desta carga.

Pelo fato de que as ondas de tensão nas Cargas B (Televisão) e D (Geladeira + Televisão + Lâmpadas fluorescente compacta + Lâmpadas incandescente + Chuveiro) serem bastante similar àquela apresentada na Figura 2, serão apresentados apenas os gráficos referentes às ondas de corrente nas mencionadas cargas.

A forma de onda instantânea, bem como o correspondente espectro harmônico referentes à onda de corrente na Carga B podem ser observados na Figura 4.

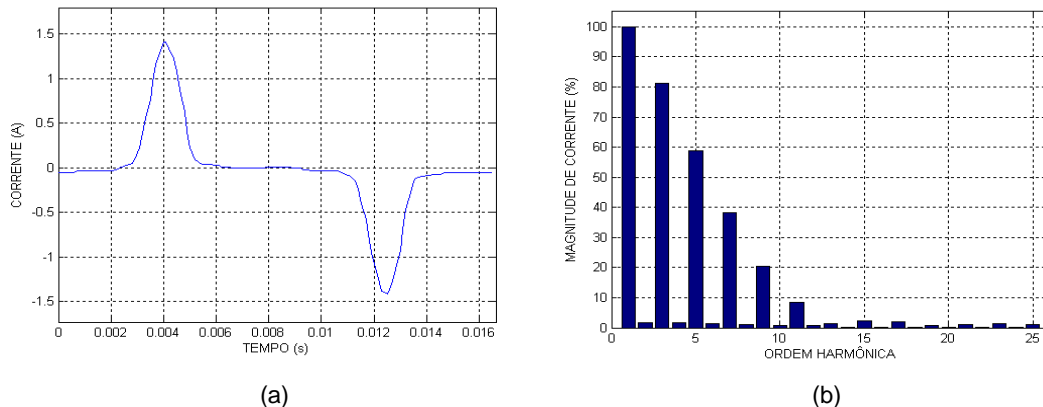


FIGURA 4 – Gráficos da onda de corrente referentes à Carga B, Caso I – (a) Onda no domínio do tempo, (b) Espectro harmônico.

Na Figura 4 pode-se observar que a forma de onda instantânea de corrente na Carga B difere da forma de onda da tensão, o que pode ser comprovado pelos espectros harmônicos destes sinais. Este fato caracteriza o comportamento não linear desta carga.

Com o objetivo de verificar os efeitos do funcionamento simultâneo de cargas lineares e não lineares serão apresentados os gráficos relativos à onda de corrente na Carga D, conforme Figura 5.

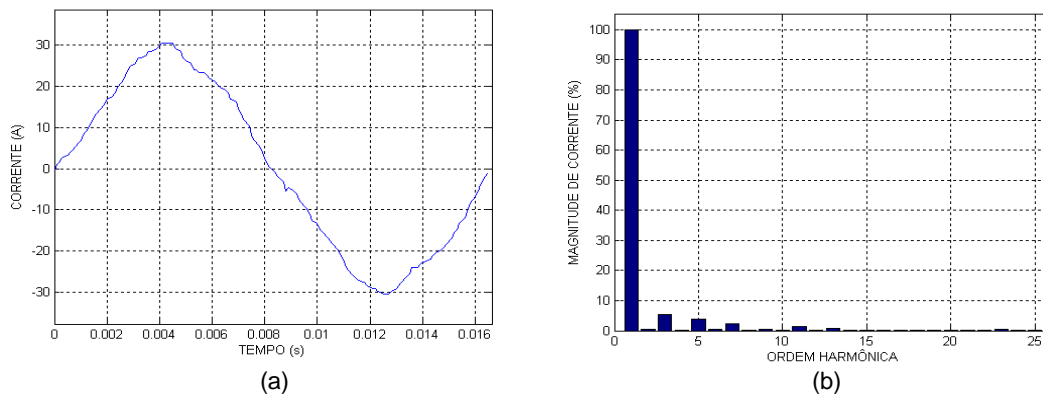


FIGURA 5 – Gráficos da onda de corrente referentes à Carga D, Caso I – (a) Onda no domínio do tempo, (b) Espectro harmônico.

Pode-se observar na Figura 5 que o funcionamento simultâneo de cargas lineares e não lineares contribui para uma diminuição do conteúdo harmônico da onda de corrente.

#### 4.2 Resultados obtidos em ramal rural que utiliza condutor não convencional

A seguir serão ilustrados alguns dos resultados obtidos com as medições referentes ao ramal rural que utiliza o arame de aço como condutor elétrico.

Os gráficos relativos às formas de onda da tensão e corrente instantâneas, bem como seus espectros harmônicos, relativos à Carga A estão ilustrados nas Figuras 6 e 7.

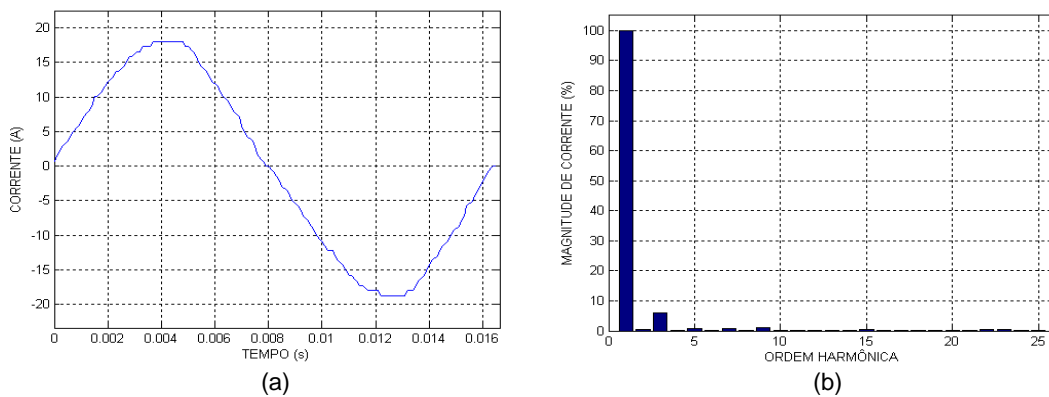
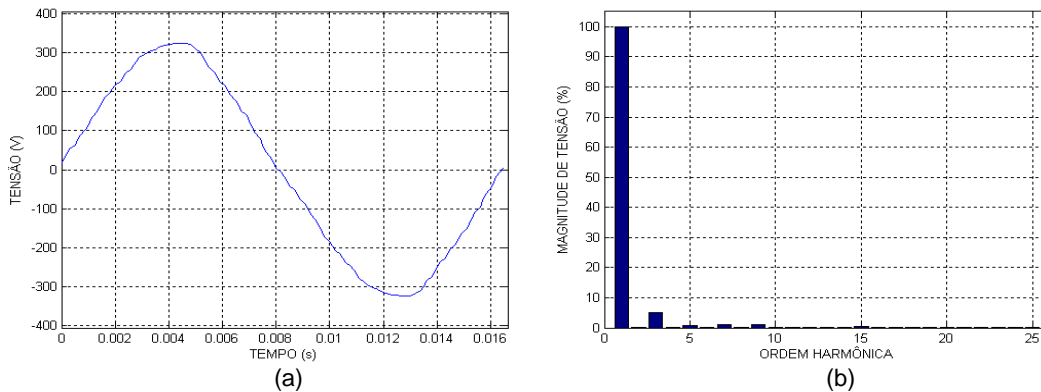


FIGURA 7 – Gráficos da onda de corrente referentes à Carga A, Caso II – (a) Onda no domínio do tempo, (b) Espectro harmônico.

O espectro harmônico das ondas de tensão e de corrente mostra claramente um aspecto linear para a carga utilizada, com influência praticamente insignificante do condutor não convencional.

A forma de onda da tensão apresentada na Figura 6 é similar àquela presente nas demais cargas, portanto, serão apresentadas apenas as formas de onda de corrente através das Cargas B e D.

Deste modo, os gráficos relativos à onda de corrente através da Carga B estão apresentados na Figura 8.

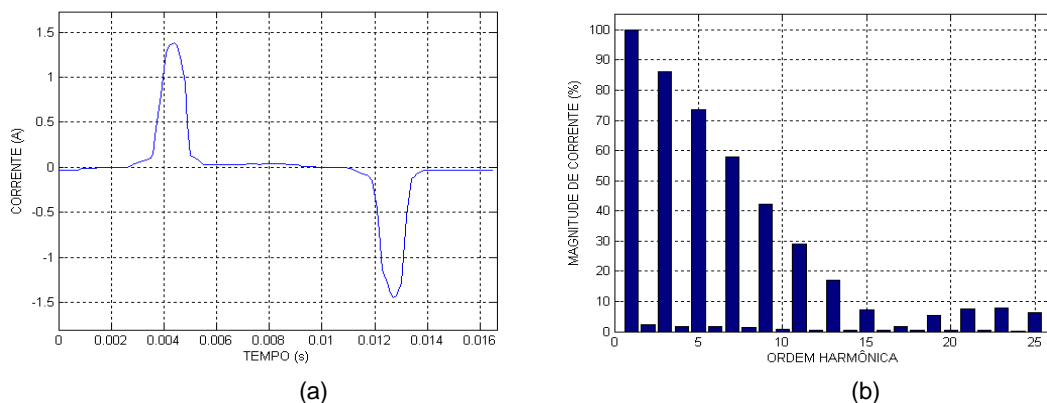


FIGURA 8 – Gráficos da onda de corrente referentes à Carga B, Caso II – (a) Onda no domínio do tempo, (b) Espectro harmônico.

Com relação às ondas de tensão e corrente, apresentados nas Figuras 6 e 8, observa-se que os mesmos são bastante diferentes, caracterizando deste modo o comportamento não linear da Carga B.

A Figura 9 ilustra a forma de onda instantânea e o espectro harmônico correspondente à onda de corrente na carga D.

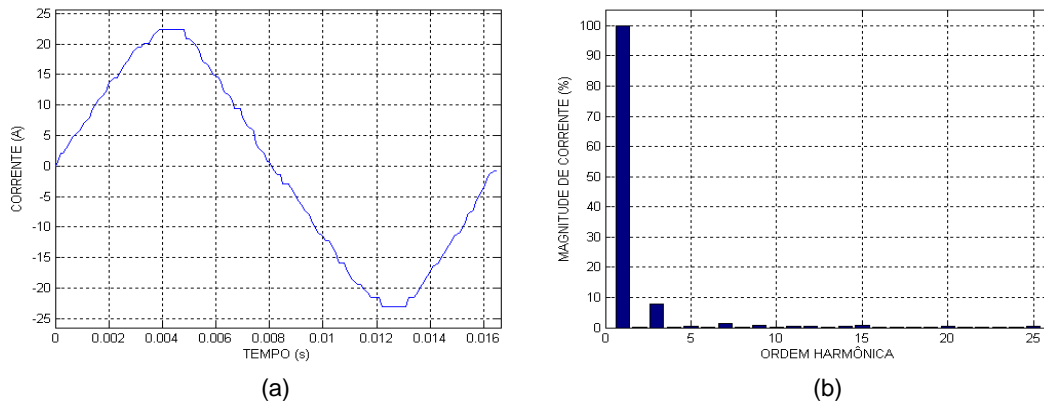


FIGURA 9 – Gráficos da onda de corrente referentes à Carga D, Caso II – (a) Onda no domínio do tempo, (b) Espectro harmônico.

Pode-se observar na Figura 9 que o funcionamento simultâneo de cargas lineares e não lineares contribui também para uma diminuição na distorção harmônica total da onda de corrente, como o que ocorre no ramal que utiliza condutor convencional.

Para ilustrar os resultados quantitativos obtidos com os estudos de caso desenvolvidos neste trabalho é apresentada a Tabela 2.

TABELA 2 – Resultados quantitativos obtidos com os estudos de caso, considerando os Casos I e II.

Situação		Grandezas							
		DHT <sub>v</sub> (%)	DHT <sub>i</sub> (%)	P (W)	Q (VAr)	D (VAr)	S (VA)	FD	FP
Carga A	Caso I	5,1603	5,8690	3510,0366	-68,5563	88,5327	3511,8219	0,9998	0,9995
	Caso II	5,2410	6,2583	2765,7923	-53,2710	87,3465	2767,6839	0,9998	0,9993
Carga B	Caso I	4,7018	131,3802	63,2540	6,72	85,0674	106,2200	0,9933	0,5955
	Caso II	4,7312	139,2334	58,0426	8,3188	77,9058	97,5062	0,9863	0,5953
CARGA C	Caso I	5,2679	121,2985	44,2441	-12,8416	52,9289	70,1707	0,9648	0,6305
	Caso II	4,6965	128,8738	37,9691	-7,7929	48,9807	62,4619	0,9855	0,6079
Carga D	Caso I	5,2513	7,3434	3998,6241	-34,5002	147,5454	4001,4941	0,99996	0,99928
	Caso II	4,7820	8,3569	6530,9994	171,3391	307,2273	6540,4662	0,9996	0,9986

Com base nos resultados apresentados na Tabela 2 é possível realizar uma comparação entre alguns indicadores e grandezas relacionadas à qualidade da energia elétrica para o ramal rural com condutor convencional e para o ramal rural com condutor não convencional. Neste contexto, destaca-se a distorção harmônica total da corrente e o fator de potência. Assim sendo, elaborou-se a Tabela 3 a qual apresenta a Diferença 1 que corresponde ao valor da diferença absoluta entre as DHT<sub>i</sub> do Caso II em relação ao Caso I, e a Diferença 2 que corresponde ao valor da diferença percentual entre os FP tomando como referência o Caso I.

TABELA 3 – Diferenças entre os Casos I e II referentes aos valores de DHT<sub>i</sub> e FP.

Situação	Diferença 1 (%)	Diferença 2 (%)
Carga A	0,3893	0,020
Carga B	7,8532	0,033
Carga C	7,5753	3,584
Carga D	1,0135	0,068

## 5.0 - CONCLUSÕES

O estudo realizado mostrou que o funcionamento simultâneo de cargas lineares e não lineares, para ambos os Casos I e II, contribui para uma melhoria nos índices de qualidade da energia elétrica, principalmente no que se refere aos valores de DHT<sub>i</sub> e FP.

Pelos valores apresentados na Tabela 3 pode-se concluir que as diferenças verificadas indicam no sentido de que o condutor não convencional investigado é viável, para cargas instaladas relativamente pequenas (até 10 kVA) e com extensão também pequena (aproximadamente 1 km).

#### 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) EMANUEL, A. E. Apparent Power: A Practical Approach to its Resolution. 1998.
- (2) DORF, R. C., SVOBODA, J. A. Introduction to Electric Circuits. 5th edition. New York. Jonh Wiley & Sons inc., 2001.
- (3) DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. Electrical Power Systems Quality. Ed. McGraw-Hill, USA, 1995.
- (4) SANTOS, E. B., MORAES JR., G. M., ALVES, A. C. B., MEDEIROS, C. A. G. Harmônicas Provocadas por Cargas de Instalações Elétricas Residenciais em Sistemas de Distribuição de Energia. Anais do Congresso Brasileiro de Automática. pp. 323-328. Natal, RN, 2002.
- (5) DIAS, G. A. D. Harmônicas em Sistemas Industriais. EDIPUCRS, Porto Alegre, 1998.
- (6) MORAES JR., G. M., SANTOS, E. B., RIBEIRO, M. A., SILVA, R. K. S. Análise Harmônica de Cargas Residenciais – Uma Questão de Qualidade de Energia. Artigo da I Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, pp. 1-6. Uberlândia, MG, 2003.
- (7) RASHID, M. H. Power Electronics Circuits, Device, and Applications. 2. Ed. Prentice Hall International Edition, USA, 1993.