

QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA DO CONSUMIDOR RURAL COM CONDUTOR NÃO CONVENCIONAL.

TEIXEIRA, Rodrigo Rosa; SANTOS, Euler Bueno dos.

Escola de Engenharia Elétrica e de Computação – Laboratório de Máquinas Especiais

rodrigoteixeira@hotmail.com; ebs@eee.ufg.br.

Palavras-chave: Qualidade da energia elétrica, condutor não convencional, cargas não lineares, distorções harmônicas.

1. INTRODUÇÃO

Os consumidores rurais podem ter seu posto de transformação suprido por rede constituída por cabo de alumínio, aqui denominado de condutor convencional, ou por condutor de aço, aqui denominado de condutor não convencional.

Nas instalações elétricas dos referidos consumidores é cada vez mais freqüente a presença de cargas não lineares, como por exemplo: a lâmpada fluorescente compacta e aparelho de televisão. As ondas de corrente observadas no circuito alimentador de corrente das diversas cargas não lineares têm formato não-senoidais (distorcidas). Essas ondas quando representadas através de uma expansão em série (série de Fourier), apresentam vários termos (conteúdos harmônicos). Os conteúdos harmônicos cujas freqüências são múltiplos e maiores da freqüência da componente fundamental (harmônicos de ordem superior) provocam efeitos negativos nas instalações elétricas, como por exemplo: sobre aquecimento de transformador e de condutores dos circuitos de distribuição, durante a operação. Observa-se também que no primário do transformador de distribuição a onda de corrente apresenta-se com aspecto distorcido.

Este trabalho tem como objetivo quantificar algumas grandezas e alguns indicadores da qualidade da energia elétrica em instalações de consumidores rurais, cujos ramais são constituídos de condutores não-convencionais (cordoalha de aço 3CAZ - #2,25 mm²). Assim sendo, foi desenvolvido um programa computacional que utiliza métodos da análise numérica, teoria de processamento de sinais, e um modelo de transformador que permite trabalhar com grandezas no domínio do tempo.

2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada se baseia em procedimentos teórico-experimental. Assim sendo, equipamentos de última geração, tais como: analisador de energia e um sistema de aquisição de dados são utilizados. Deste modo medições são realizadas em campo e em laboratório.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para que estes sinais fossem observados também no primário (lado de alta tensão - AT) do transformador, um modelo baseado no circuito T equivalente é utilizado. Para tal, é considerado a condição de regime permanente e o circuito da figura 1.

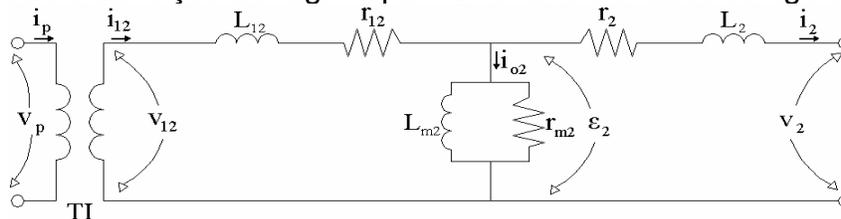


Figura 1 – Circuito equivalente T para transformador monofásico.

No circuito da figura 1 tem-se:

$i_p = i_p(t)$ - corrente instantânea no primário;

$i_{12} = i_{12}(t)$ - corrente instantânea do primário referida ao secundário;

$i_{o2} = i_{o2}(t)$ - corrente instantânea de excitação referida ao secundário;

$i_2 = i_2(t)$ - corrente instantânea no secundário;

$v_p = v_p(t)$ - tensão instantânea no primário;

$v_{12} = v_{12}(t)$ - tensão instantânea do primário referida ao secundário;

$v_2 = v_2(t)$ - tensão instantânea no secundário;

$\varepsilon_2 = \varepsilon_2(t)$ - força eletromotriz referida ao secundário;

t - variável temporal;

TI – transformador ideal;

k - relação de transformação;

r_{12}, L_{12} - resistência e indutância do enrolamento primário referidas ao secundário, respectivamente;

r_{m2}, L_{m2} - resistência associada as perdas no ferro e indutância de magnetização referidas ao secundário, respectivamente;

r_2, L_2 - resistência e indutância do enrolamento secundário, respectivamente.

As ondas de tensão e corrente de secundário (periódicas de período T) são obtidas através de medições. São considerados conhecidos as grandezas resistência e indutância do primário e secundário, resistência e indutância de magnetização, bem como a relação de transformação.

A existência de cargas não lineares pode produzir distorções nos sinais de corrente e de tensão. Assim sendo, estes podem ser escritos em termos da série de Fourier. Isto é possível com a aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT) aos sinais mencionados, de onde se obtém as amplitudes e fases de cada conteúdo harmônico.

A tensão e corrente podem ser escritas conforme as equações (1) e (2) respectivamente.

$$v(t) = V_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t + \theta_n) \quad (1)$$

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \beta_n) \quad (2)$$

Onde:

V_0, I_0 - componentes contínuas de tensão e corrente respectivamente;

V_n, I_n - valores eficazes dos harmônicos de ordem n dos sinais de tensão e corrente respectivamente;

θ_n, β_n - ângulo de fase dos harmônicos de ordem n dos sinais de tensão e de corrente respectivamente;

n - ordem harmônica.

Sendo $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$, onde f é a frequência da componente fundamental. Neste trabalho é considerado $f = 60$ Hz por se tratar do sistema elétrico brasileiro.

O valor eficaz (F_{ef}) de uma função genérica $f(t)$ periódica de período T , é obtido através da expressão (3).

$$F_{ef} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

A função $f(t)$ representa a tensão ou corrente instantânea. Assim sendo obtém-se os valores eficazes de tensão (V_{ef}) e de corrente (I_{ef}).

A potência aparente (S) é obtida conforme equação (4).

$$S = V_{ef} I_{ef} \quad (4)$$

Com os sinais instantâneos de tensão e corrente, a potência ativa é obtida utilizando a expressão (5).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t) dt \quad (5)$$

A potência reativa (Q) é calculada conforme equação (6).

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\theta_n - \beta_n) \quad (6)$$

A potência de distorção (D) é determinada pela equação (7).

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (7)$$

O fator de potência (FP), também denominado de fator de potência verdadeiro por levar em consideração os conteúdos harmônicos dos sinais de tensão e corrente, é obtido utilizando a expressão (8).

$$FP = \frac{P}{S} \quad (8)$$

O fator de deslocamento (FD) considera os ângulos de fase das componentes fundamentais da tensão e da corrente e é determinado pela equação (9).

$$FD = \cos(\theta_1 - \beta_1) \quad (9)$$

A distorção harmônica total da função $f(t)$ que fornece a relação entre os conteúdos harmônicos de um sinal distorcido em relação a componente fundamental F_1 é calculada através da equação (10).

$$DHT = \frac{1}{F_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} F_n^2} 100(\%) \quad (10)$$

Onde F_n é o valor eficaz do n -ésimo componente harmônico da função $f(t)$.

As cargas são conectadas nos circuitos terminais do secundário do transformador de distribuição. O analisador de energia é instalado próximo ao medidor de energia, onde as medições são efetuadas. No estudo de casos realizado, as cargas observadas são idênticas e denotadas por código alfa numérico conforme tab. 1.

Tabela 1 – Cargas utilizadas por consumidor rural com condutor não-convencional.

Notação	Descrição
C1	Lâmpada Incandescente
C2	Televisão
C3	Lâmpada Fluorescente
C4	Geladeira
C5	Liquidificador
C6	Chuveiro
C7	Resfriador de Leite
C8	Ordenha
C9	Resfriador + Ordenha

Inicialmente foram coletados em campo os dados referentes a valores instantâneos de tensão com transformador operando a vazio e verificando a presença de harmônicos ímpares, principalmente a do terceiro harmônico. Nesta condição, o valor da distorção harmônica total é de 2,82%, onde o valor eficaz da tensão é de 231,1V.

Posteriormente são apresentados de forma ilustrativa o valor de corrente para a carga C7 e seu respectivo espectro harmônico, pelo fato de C7 possuir um comportamento não-linear (fig. 3).

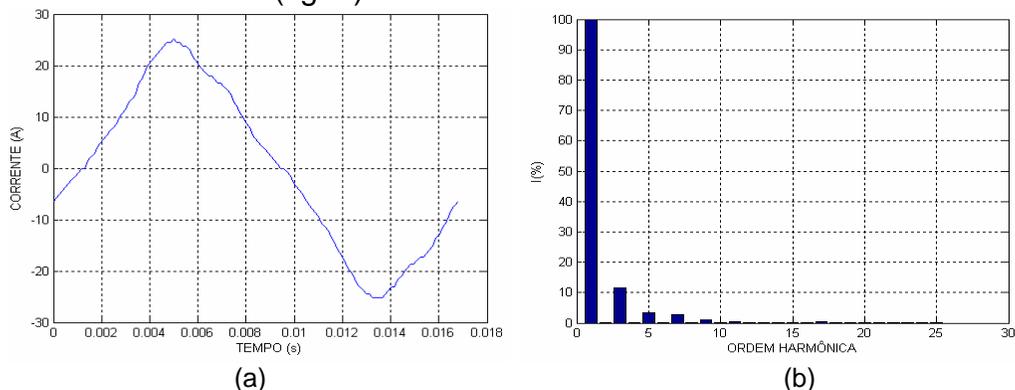


Figura 3 – (a) Corrente Instantânea; (b) Espectro harmônico; relativos a carga C7 no lado de baixa tensão do transformador.

A tab. 2 expõe valores de grandezas relacionadas à qualidade da energia elétrica, relativas às cargas da tab. 1, no lado de baixa tensão do posto de transformação.

Tabela 2 – Grandezas relacionadas à qualidade da energia elétrica para as cargas da Tab. 1.

Situação	Grandeza							
	DHT _V (%)	DHT _I (%)	P (W)	Q (VAr)	D (VAr)	S (VA)	FD	FP
C1	2,9044	2,8661	781,5671	1,6832	3,8508	781,5784	0,99999	0,99998
C2	2,9305	161,0357	56,1566	1,0554	86,5187	103,1512	0,99993	0,54441
C3	2,9886	138,5950	94,5956	28,6742	134,2678	166,7285	0,96428	0,56736
C4	2,9066	12,1576	116,3711	120,8847	22,8254	169,3409	0,69143	0,68720
C5	2,8779	16,3361	294,6324	62,4096	43,8101	304,3395	0,97828	0,96810
C6	2,3912	2,6599	4266,345	64,6905	60,0539	4267,258	0,99988	0,99979
C7	2,5177	12,4730	3222,019	1449,793	419,446	3557,983	0,91131	0,90557
C8	2,4276	11,1091	4853,376	3105,920	655,8032	5799,317	0,84082	0,83689
C9	2,1297	9,5416	8833,677	4086,784	923,9565	9776,981	0,90665	0,90352

Verifica-se que o DHT_V da tensão na condição a vazio é 2,52%, já a carga C7, cujo sinal apresentado na fig. 3, possui um DHT_I de 12,47%, portanto, caracteriza um comportamento não-linear. Contudo, nota-se também o comportamento linear das cargas C1 e C6, que possuem DHT_I de 2,87% e 2,66% respectivamente.

Utilizando o modelo de transformador, representado na fig. 1, que considera a tensão e a corrente de secundário no domínio do tempo, é possível obter os valores das DHT's de tensão e corrente no primário do transformador, conforme tab. 3.

Tabela 3 - Grandezas elétricas relativo a diversas cargas observadas no primário do transformador.

Situação	Grandeza							
	Vs (V)	DHT _{Vs} (%)	Is (A)	DHT _{Is} (%)	Vp (V)	DHT _{Vp} (%)	Ip (A)	DHT _{Ip} (%)
C1	231,0604	2,9044	3,3825	2,8661	8373,903	2,9028	0,1353	2,3859
C2	231,4750	2,9305	0,4456	161,0357	8385,477	2,9280	0,0814	13,3462
C3	231,7328	2,9886	0,7195	138,5950	8394,793	2,9592	0,0811	19,7509
C4	231,6009	2,9066	0,7312	12,1576	8391,049	2,9102	0,0969	3,4100
C5	231,3566	2,8779	1,3155	16,3361	8382,698	2,8842	0,0998	6,6522
C6	223,3549	2,3912	19,1052	2,6599	8111,533	2,3892	0,5488	2,6290
C7	229,1926	2,5177	15,5240	12,4730	8326,520	2,6105	0,4800	11,2908
C8	226,9703	2,4276	25,5510	11,1091	8263,965	2,5553	0,7629	10,3679
C9	223,9421	2,1297	43,0140	9,5416	8180,1702	2,4068	1,2381	9,3555

Observa-se que os sinais de tensão e corrente no primário apresenta uma atenuação nas amplitudes dos conteúdos harmônicos de ordem superior em relação ao secundário.

4. CONCLUSÃO

A existência de conteúdos harmônicos no secundário e primário do transformador, devido a existência de cargas não lineares são prejudiciais, uma vez que provocam sobre aquecimento do transformador e dos condutores, comprometendo a vida útil dos mesmos.

Nota-se que a distorção harmônica total da tensão para o condutor não-convencional (cordoalha de aço – 3CAZ, # 2,25mm²) não ultrapassou 3%, podendo ser considerado um valor adequado, visto que o ramal possui aproximadamente 2700m de extensão.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]INDUSCON, VII, 2006, Recife. *Qualidade da energia elétrica em instalações de consumidor rural*. Anais do VII INDUSCON, 2006. Pernambuco: Recife, 2006. 8p.
- [2]MORAES, Gentil M. J.. *Diagnóstico harmônico de cargas não lineares alimentadas pelo sistema de distribuição*. 2004. 128 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Elétrica) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2004.
- [3]SANTOS, Euler B.. *Utilização do aço como condutor elétrico: Modelagem matemática para determinação dos parâmetros resistência e indutância*. 1993. 225 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 1993.
- [4]SILVA, Renata K. S.. *Análise da viabilidade do uso do aço como condutor elétrico em redes de distribuição rural*. 2005. 162 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Elétrica) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2005.

FONTE DE FINANCIAMENTO - CAPES