

O Faturamento Residencial e a Qualidade da Energia Elétrica

Délvio Franco Bernardes* - Carlos Alberto M. Guimarães - Hector Arango

Escola Federal de Engenharia de Itajubá
Av.BPS, 1303 - CEP 37500-000 - Itajubá/MG - Brasil
telefone: (035) 629 1172 - fax: (035) 629 1187
e-mail: delvio@iee.efei.rmg.br

* Autor para contato

RESUMO

No que diz respeito ao setor elétrico este final de século tem se caracterizado por popularizar o uso da eletrônica de potência inclusive no setor doméstico. Grande parte dos eletrodomésticos hoje fabricados possuem conversores eletrônicos que sempre provocam alguma distorção no sistema de distribuição. Por outro lado, com projetos desenvolvidos já há algumas décadas, quando a possibilidade da ocorrência de sinais fortemente distorcidos era quase nula, é razoável presumir-se que tais medidores não foram concebidos para operar com sinais não senoidais. Preceitua-se portanto a realização de estudos que investiguem, com rigor, o comportamento dos medidores convencionais de energia face a estas novas condições em que o consumo se realiza.

Este artigo apresenta e analisa os resultados de experimentos que buscaram determinar a influência da eletrônica de potência de uso residencial, na exatidão de medidores de watt-hora de indução.

I - INTRODUÇÃO

Muitos trabalhos têm sido realizados buscando estudar sistemas com conteúdos harmônicos e desequilibrados [1-5], enfatizando o desempenho, nestas condições, de medidores de energia e de metodologias de faturamento. Porém, tais estudos apresentam-se quase sempre adstritos aos setores comercial e industrial. A despeito da representatividade do consumo residencial (que no Brasil acerca-se de 50% do total produzido), poucas publicações, tais como [6], têm sido efetuadas. Este fato sugere a escassez de pesquisas e desenvolvimentos que levem em consideração esta fatia de mercado consumidor de energia elétrica.

A olhos vistos, o consumo residencial de energia, através de cargas não lineares, tem alcançado dimensões cada vez mais significativas. Um exemplo cabal é o chuveiro elétrico. Este equipamento que na maioria das residências representa a carga de maior consumo individual, desde o início de seu uso apresentou um comportamento linear, uma vez que o controle da temperatura sempre esteve restrito às posições “Frio”, “Verão” e “Inverno” da chave seletora. No

entanto, tem se tornado corriqueiro o uso do controle do valor eficaz da tensão aplicada ao seu resistor de dissipação, através de conversores CA / CA. Esta prática, embora permita um controle não escalonado da temperatura e, por consequência, um maior conforto ao usuário, implica também em atingir níveis de distorção jamais experimentados dentro de sistemas elétricos residenciais. Por este motivo este estudo tomou como carga não linear um chuveiro, disponível no comércio, munido de controle temperatura através da variação do valor eficaz da tensão pela variação do ângulo de disparo de um TRIAC - “TRI ode AC switch”.

O diagrama básico do circuito utilizado está mostrado na figura 1.

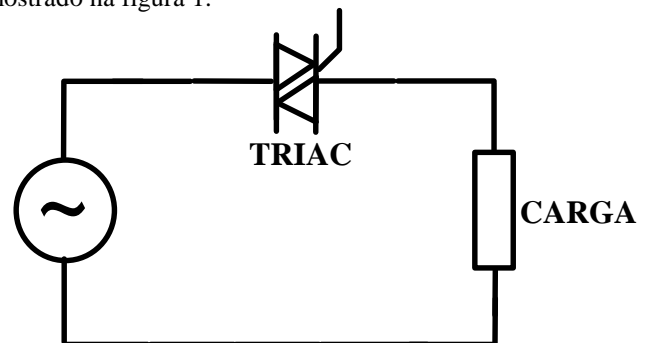


Figura 1 - Circuito básico.

Como o valor ôhmico do elemento resistivo pode ser considerado constante, a potência (P) por ele dissipada é dada por:

$$P = \frac{1}{p \cdot R} \int_a^p (\sqrt{2} \cdot U \cdot \sin q)^2 \cdot dq \quad (1)$$

$$P = \frac{U^2}{p \cdot R} \left[p - a + \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot a) \right] \quad (2)$$

onde:

U → valor eficaz da tensão de alimentação;

α → valor do ângulo de disparo do semicondutor.

Como o chuveiro utilizado possui uma potência máxima de 7500 [W] e uma tensão nominal de 220 [V], obtêm-se para valores de α em radianos e especificamente para o caso em questão:

$$P = 2387 \cdot [p - a + 0,5 \cdot \text{sen}(2 \cdot a)] \quad (3)$$

A figura 2 expressa graficamente esta função, representando a potência dissipada em valores “por unidade” relativos ao valor nominal do equipamento, em função do ângulo de disparo.

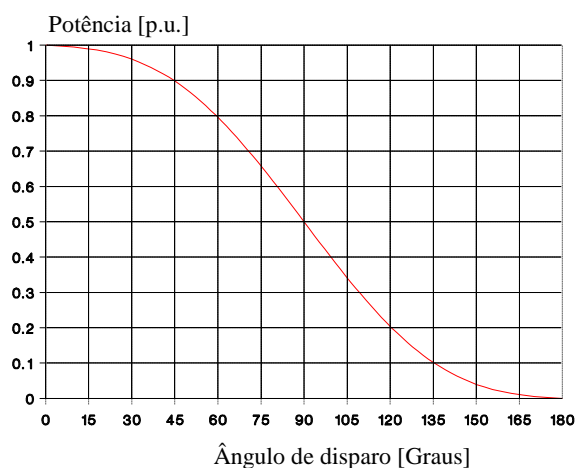


Figura 2 - Potência dissipada em função do ângulo de disparo do TRIAC.

II - CONDIÇÕES DE USO

As regiões Sul e Sudeste do Brasil além de contarem com a maior parcela da população, que por sua vez é a maior consumidora de energia elétrica residencial, também sofrem os maiores gradientes de temperatura ao longo do ano. Por estas razões é nestas regiões que o emprego deste tipo de chuveiros tem alcançado maiores fatias do mercado.

A potência necessária para o aquecimento de uma determinada quantidade de água vertida por um chuveiro, de um gradiente de temperatura (ΔT), pode ser obtida, com uma aproximação razoável, com o uso da seguinte expressão:

$$P = 70 \cdot Q \cdot \Delta T \quad (4)$$

onde:

P → potência necessária [W];

Q → vazão do chuveiro [litros/minuto];

ΔT → gradiente de temperatura da água [$^{\circ}\text{C}$].

Além de variações na temperatura inicial da água, também o gosto pessoal do usuário, determinando uma água mais quente ou mais fria na saída do chuveiro, terão reflexo em maior ou menor grau no valor de ΔT . Também a vazão é bastante variável de acordo com características da instalação hidráulica de onde está sendo instalado o chuveiro, como por

exemplo: diâmetro dos encanamentos, pressão da água no ponto de instalação, etc. Ao considerar-se como aceitáveis, para as regiões geográficas em pauta, os valores extremos exibidos na tabela 1, obtêm-se a ora denominada “Região de Operação” mostrada na figura 3.

Tabela 1 - Limites de Q e ΔT .

	Mínimo	Máximo
Q [l/min]	2	6
ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	0	33

Potência necessária ao aquecimento [pu]

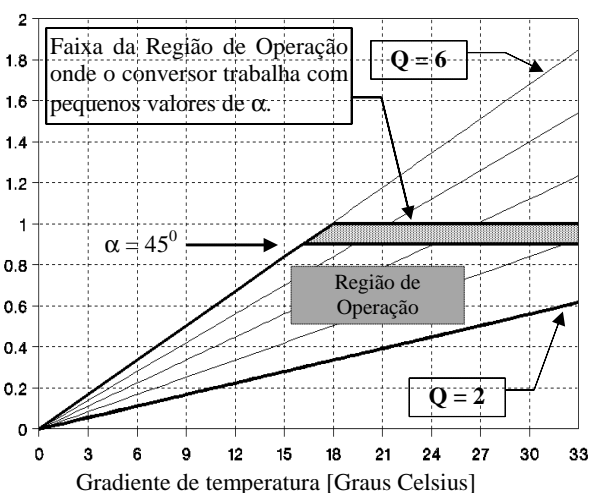


Figura 3 - Região de Operação.

A Região de Operação indicada na figura 3 foi obtida levando-se em conta a equação (4), admitindo-se $Q = 2; 3; 4; 5; \text{ e } 6$ [l/min] e, também, diversos valores de gradiente de temperatura. A observação simultânea das figuras 2 e 3 permite concluir que o ângulo de disparo somente permanecerá em valores próximos de zero grau (por exemplo: $\alpha < 45^{\circ}$), quando as condições de vazão e temperatura inicial da água forem tais que a potência dissipada necessária seja maior que 90 % da nominal. Estas condições, conforme pode ser constatado no gráfico da figura 3, restringem-se a uma pequena parcela da Região de Operação. Por outro lado, como é conhecido, o nível de distorção harmônica total de corrente (ITHD) tende a crescer com o aumento do ângulo de disparo. Conclui-se portanto que realizar-se experiências apenas com baixos índices de ITHD não corresponde às condições operacionais encontradas no dia a dia. Cabe ressaltar que níveis elevados de ITHD, que são inerentes à excursão do disparo por valores mais elevados de ângulo, correspondem ao manuseio de menores parcelas de energia ativa, reduzindo o valor absoluto associado ao erro cometido na medida. Contudo, este tipo de operação sempre conduz a menores valores de fator de potência.

III - EQUIPAMENTOS E LOCAL

Tendo em vista os testes a serem realizados, bem como a disponibilidade existente, optou-se pelas seguintes seleções:

1. Equipamentos de medição

Sistema de aquisição de dados, provido de 6 canais de entrada não multiplexados e com saída compatível com microcomputador tipo PC; b) microcomputador tipo PC 386; c) analisador de espectro harmônico de alta exatidão, com 2 canais de entrada, com indicação de módulos e ângulo de fase de cada componente harmônico analisado; d) osciloscópio de 2 canais; e) padrão rotativo para medição de watt-hora.

Observação: A rigor apenas o sistema de aquisição de dados e o microcomputador já seriam suficientes para realizar os testes. Não obstante os demais equipamentos foram utilizados para reduzir a possibilidade de que equívocos fossem cometidos.

2. Equipamento em teste

Medidor de watt-hora de indução, fabricado no Brasil, largamente utilizado por concessionárias de energia, com as seguintes características básicas:

tensão nominal = 240 [V];
corrente nominal = 15 [A];
corrente máxima = 100 [A].

3. Local de realização dos testes

A subestação que alimenta os Laboratórios Didáticos do Instituto de Engenharia Elétrica da

EFEI possui um ramo isolado do restante das instalações do prédio, permitindo assim que seja manipulado de modo a poder representar satisfatoriamente uma rede de distribuição em baixa tensão. Aliado a isto, a versatilidade alcançada sacramentou esta opção.

IV - MEDIÇÕES

Inicialmente houve preocupação com a exatidão apresentada pelo medidor em condições de sinais puramente senoidais. Desta forma, tal como prescrito pela norma pertinente, o medidor foi calibrado para apresentar erros compatíveis à sua classe. Vale salientar que este procedimento inicial foi realizado com o maior esmero de forma a fazer com que o erro apresentado em relação ao padrão rotativo, fosse praticamente nulo para todas as condições especificadas pela norma brasileira. Os resultados desta calibração estão mostrados na tabela 2. Na figura 4 estão representados os principais elementos que compuseram a bancada montada especialmente para o desenvolvimento do teste.

Tabela 2 - Erros em condições senoidais.

Fator de Potência	0,5	1,0	
Fator de Carga	1,0	0,1	1,0
Erro %	-0,22	-1,10	0,00

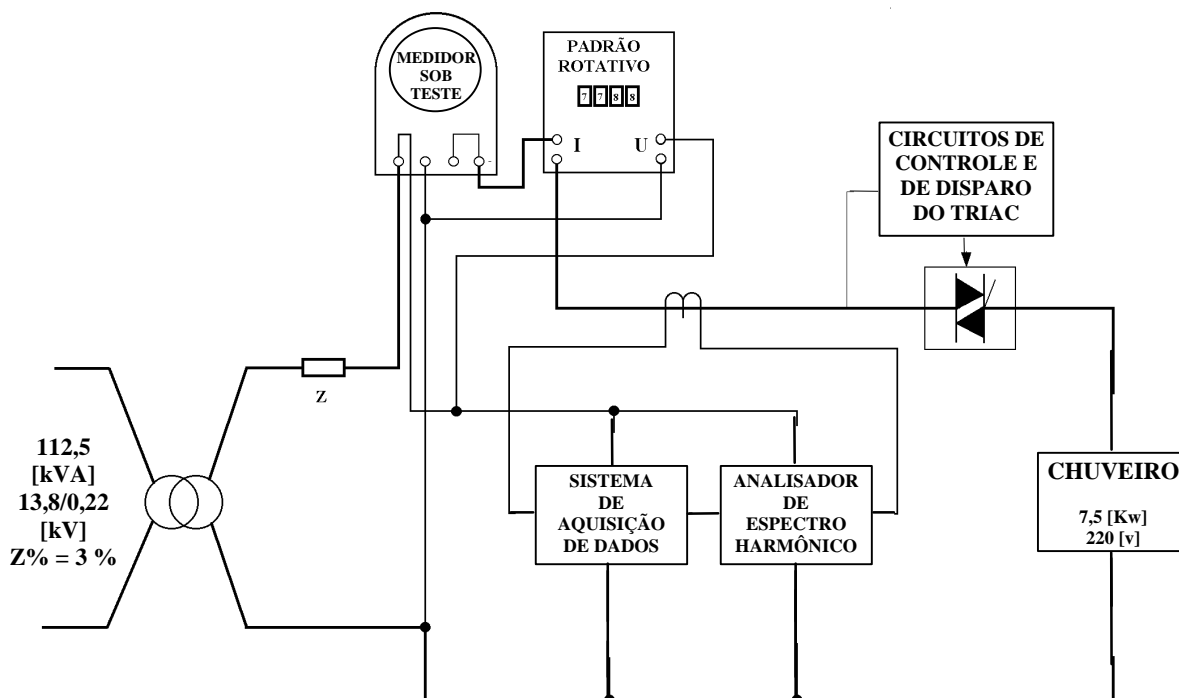


Figura 4 - Diagrama de blocos representando os principais equipamentos utilizados no teste.

Em seguida o medidor em teste foi submetido a diversas condições de carga com um variado conteúdo harmônico. O campo do potenciômetro (que corresponde, aproximadamente, a um arco de

270^o) pelo qual é manualmente feito o ajuste do ângulo de disparo do TRIAC, foi dividido em 5 secções iguais. À cada uma das secções foi associada uma posição. Assim, a posição

correspondente à maior potência, foi denominada de “Posição 1” e assim sucessivamente até a posição agregada à menor potência, chamada por “Posição 5”.

Inicialmente foram realizados testes sem que estivesse sido inserida no ramo a impedância identificada na figura 4 por “Z”. Na figura 5 estão mostradas as formas de onda da tensão e da corrente correspondentes a este caso. Estes gráficos foram obtidos a partir do sistema de aquisição de dados. Neste caso, como pode ser observado na forma de onda de tensão da rede alimentadora, ela é muito pouco distorcida e por esta razão desprovida de altos índices de distorção harmônica, (UTHD < 3,0 %).

Posteriormente os mesmos testes foram efetuados com a impedância inserida no ramo. Na figura 6 estão novamente mostradas as formas de onda da tensão e da corrente. Nota-se na forma de onda de tensão que ela é agora muito mais distorcida e por conseguinte portadora de índices de distorção harmônica, considerados elevados para sinais de tensão (THD < 18,0 %).

Os registros obtidos foram comparados com medições realizadas através dos equipamentos digitais numéricos e a partir daí resultaram os erros mostrados na tabela 3 e 4. Os registros de energia foram obtidos em intervalos de 15 minutos.

Tabela 3 - Resultados obtidos com maior potência de curto.

Posição	U_R	U_S	I_C	ITHD	UTHD	S_T	E_M	E_{SAD}	Erro
1	213	207	34,0	1,88	0,63	7242	1845	1821	1,32
2	209	182	32,4	21,5	2,10	6772	1655	1627	1,72
3	211	168	31,1	33,3	2,91	6469	1558	1495	4,21
4	215	154	29,4	35,7	1,88	6321	1497	1447	3,46
5	212	140	27,9	46,3	1,91	5915	1267	1223	3,60

onde:

Grandeza medida	Unidade	Descrição
U_R	[V]	Tensão da rede alimentadora.
U_S	[V]	Tensão na carga
I_C	[A]	Corrente de carga
ITHD	[%]	Índice de distorção harmônica total de corrente
UTHD	[%]	Índice de distorção harmônica total de tensão
S_T	[VA]	Potência aparente total
E_M	[W.h]	Energia medida pelo medidor em teste
E_{SAD}	[W.h]	Energia medida pelo sistema digital (padrão)
Erro	[%]	Erro de E_M em relação a E_{SAD}

Tabela 4 - Resultado de maior erro observado.

Foi obtido estando a alimentação na condição de menor potência de curto.

Posição	U_R	U_S	I_C	ITHD	UTHD	S_T	E_M	E_{SAD}	Erro
5	217	136	27,3	41,5	16,00	5924	1231	1149	7,14

Nota:

O valor da tensão na carga (U_S) foi tomada apenas como uma indicação. Ela foi medida com o uso de um multímetro digital cuja aplicação com precisão garantida, limita-se a medições onde o sinal é puramente senoidal. Em virtude disso, cálculos envolvendo estes valores são de validade duvidosa.

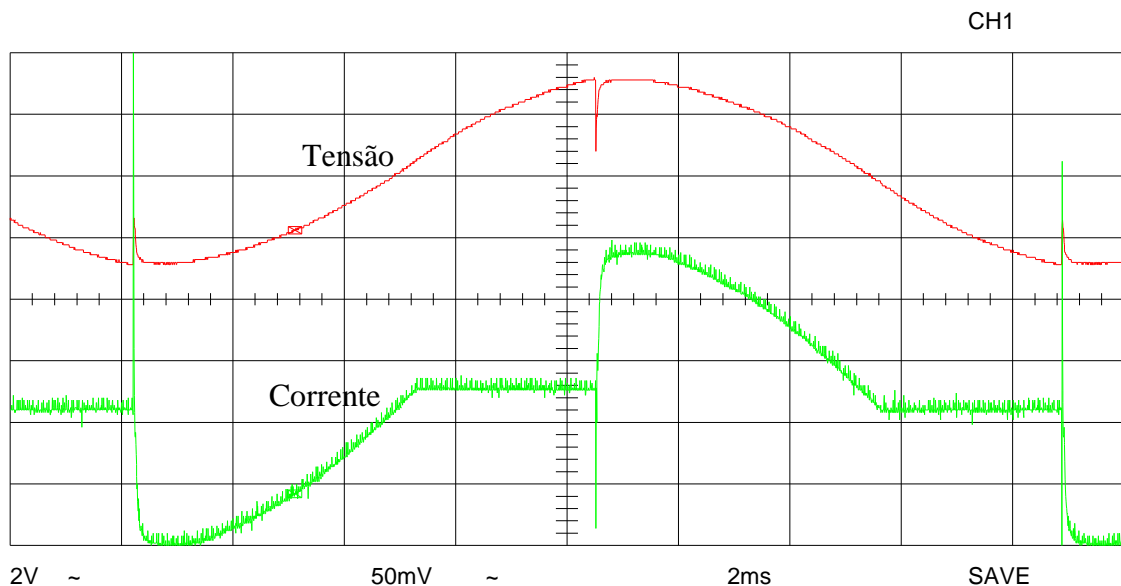


Figura 5 - Formas de onda de tensão e de corrente para o sistema operando com maior potência de curto circuito.

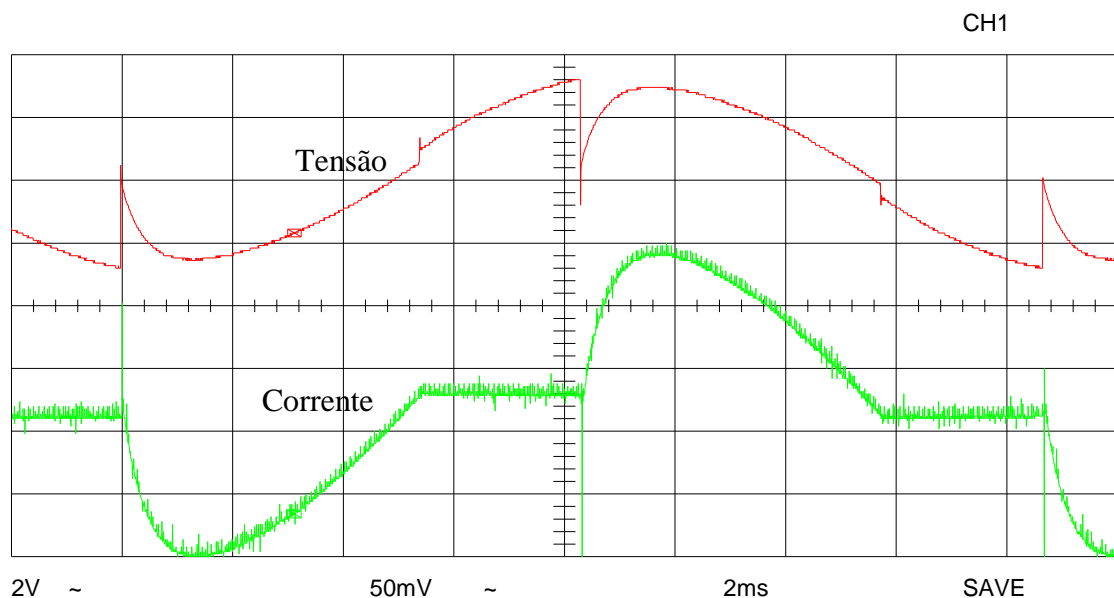


Figura 6 - Formas de onda de tensão e de corrente para o sistema operando com menor potência de curto.

V - CONCLUSÕES

(1) Depara-se, por ora, com uma grande dificuldade em determinar quais os reais causadores dos erros observados. Assim, por exemplo, se o mesmo medidor de energia for submetido a sinais de corrente e/ou de tensão, com níveis de THD idênticos, porém resultantes de formas de onda diversas, podem ser notados erros bastante diferentes. Tanto é assim que em [7] é recomendado que resultados obtidos de experiências realizadas de forma independente, não devem e nem podem ser comparados. (2) Observou-se a presença de erros mais significativos quando a potência de curto circuito da fonte de alimentação foi reduzida através da introdução de

uma impedância neste ramo. Esta observação corrobora com as afirmações colocadas em [3], uma vez que a uma menor capacidade de curto está associada um maior índice de distorção harmônica de tensão. (3) Os erros observados foram sempre positivos, o que, em uma primeira análise aponta o consumidor residencial como prejudicado. É claro que a sobrevivência de uma empresa concessionária de energia elétrica está associada aos rendimentos advindos do faturamento. Ponto chave desta operação comercial é a medição da quantidade transacionada, porém, uma medição que prejudique o consumidor pode conduzir a uma situação litigável, de forma nenhuma desejada pelas partes. (4) Tendo em vista que a acelerada proliferação de

cargas não lineares no âmbito residencial, esteja levando o setor de distribuição de energia em baixa tensão a índices de distorção jamais experimentados, urge que outros trabalhos investiguem com rigor o comportamento de medidores que trabalhem nestas condições operacionais. Por exemplo: certamente a atual frota de carros irá, aos poucos, ser trocada por veículos movidos a energia elétrica e, sem dúvida, brevemente muitos lares terão sistemas de carregamento de baterias automotivas para atender aquelas do(s) carro(s) da família, muito provavelmente durante o período noturno; assim pode-se questionar: como é que os medidores convencionais de Watt-hora irão se comportar nestas condições?

REFERÊNCIAS

[1] - Simmonds, R. - *Electrical Review*, Vol. 227, pp 32-4, *Paying for the Harm in Harmonics*, July 1994.

[2] - L.S. Czarnecki - *Comments on Active Power Flow and Energy Accounts in Electrical Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Asymmetry* - *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 3, July 1996.

[3] - M. M. Saied - *On The Accuracy of Watt-Hour Meters in Nonsinusoidal Environment* - *Proceedings of the IEEE Industry Applications Annual Meeting*, October 1995.

[4] - M. McEachern, W. M. Grady, W. A. Moncrief, G. T. Heydt, M. McGranaghan, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 1,

Revenue and Harmonics: An Evaluation of Some Proposed Rate Structures, January 1995.

[5] - R. Arseneau, G. T. Heydt, M. J. Kempker - *Application of IEEE Standard 519 - 1992 Harmonic Limits for Revenue Billing Meters* - *IEEE Power Engineering Review*, page 57, January 1997.

[6] - M. McGranaghan - *Harmonics from Residential Customers* - *IEEE 519 Application Panel Session, PES Winter Meeting*, 1994.

[7] - A. Domijan, Jr., E. Embriz-Santander, A. Gilani, G. Lamer, C. Stiles, C. W. Williams, Jr., *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, *Wathour Meter Accuracy Under Controlled Unbalanced Harmonic Voltage and Current Conditions*, January 1996.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

[8] - IEEE, Norma Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", New York, 1993.

[9] - IEC 1000