

A Influência do Chaveamento de Cargas Eletrônicas no Fluxo de Reativo de um Barramento de Baixa Tensão

Arnulfo Barroso De Vasconcellos; Fabrício Parra Santilio; Willian Gustavo dos Santos; Gabriela Nunes Lopes; Gabriela Pessoa Campos; Igor Rossini Smercki; Priscila Costa Nascimento.

Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT.
arnulfo@ufmt.br; fabricio.qee@gmail.com; swilliangustavo@gmail.com; ggagabiene@outlook.com; gabriela_pessoacampos@hotmail.com; igorbambu@icloud.com; costapri96@gmail.com.

Teresa Irene Ribeiro De Carvalho Malheiro;
Instituto Federal do Mato Grosso – IFMT.
Malheiro.teresa@gmail.com

Resumo — O enfoque principal deste artigo é analisar como o intervalo de condução de uma carga eletronicamente chaveada, presente em unidades consumidoras, influencia no fluxo de potência reativa em um determinado barramento. Nas medições em laboratório, utilizou-se uma carga eletrônica com duas opções de chaveamento, sendo que, no primeiro caso, inicia-se o processo aplicando tensão na carga, decorrido aproximadamente metade do semiciclo positivo a corrente é interrompida. O mesmo procedimento foi utilizado para o semiciclo negativo. No segundo caso, atrasou-se o início da corrente em torno da metade do semiciclo positivo, assim como para o semiciclo negativo. Observou-se que o fluxo de potência reativa, registrado pelos medidores, no barramento para o primeiro caso apresentou comportamento capacitivo e para o segundo caso, indutivo.

Palavras-chaves — Qualidade de Energia, Fluxo de Potência Reativa, Cargas Chaveadas.

I. INTRODUÇÃO

A crescente evolução da eletrônica proporcionou o aumento do uso de equipamentos eletroeletrônicos, introduzindo no sistema elétrico um grande número de cargas eletrônicas com a finalidade de realizar eficiência elétrica, isto é, substituição de equipamentos convencionais por dispositivos chaveados com a finalidade de reduzir o consumo de energia elétrica, de forma que os estudos a serem realizados em um sistema elétrico não podem mais desconsiderar a influência de tais cargas e as suas consequências. Por exemplo, ao realizar os estudos do fluxo de potência em um sistema, estes sempre levaram ao uso de elementos lineares, banco de capacitores e indutores, para a compensação de reativos e controle do nível de tensão. Entretanto, analisando o comportamento de certas cargas eletrônicas por meio de medidores e analisadores de energia elétrica, observa-se um fluxo de reativo indutivo ou capacitivo que pode se comportar como uma injeção ou absorção de potência reativa no barramento.

Este comportamento da carga eletrônica chaveada apresenta uma característica diferente da teoria convencional em que

o conceito de potência reativa nasceu em conexão direta com os elementos indutivos e capacitivos, inclusive o nome “reativo” está relacionado com o termo “reatância”. Para as cargas da época em que esta teoria foi desenvolvida, a ideia de que potência reativa estava relacionada com a energia armazenada nos elementos reativos era perfeitamente correta [1]. Mas, tomando como exemplo a carga eletrônica não linear apresentada no presente trabalho, constituída de uma chave eletrônica e uma resistência, pode-se obter os dois tipos de fluxos de potência reativa indutiva ou reativa capacitiva, apesar da ausência física de capacitores ou indutores com a finalidade de compensação do sistema.

As compensações de reativos através das cargas eletrônicas presentes no sistema impactariam no desempenho deste e também no faturamento do excedente de energia elétrica reativa, principalmente em sistemas predominantemente indutivos. Como já é de conhecimento, grandes consumidores são penalizados através da tarifação de energia reativa excedente, caso, por exemplo, de indústrias que operam com um significativo número de motores elétricos de indução com fator de potência inferior ao estabelecido por norma. Nesse sentido, o comportamento do fluxo de reativo das cargas eletrônicas pode ajudar ou prejudicar na compensação de reativo.

Desta forma, este artigo tem como objetivo analisar o fluxo de potência reativa de cargas eletrônicas e sua influência no sistema de tarifação e qualidade da energia.

II. CONSIDERAÇÕES REFERENTES À ENERGIA REATIVA EXCEDENTE NO SISTEMA ELÉTRICO

A Resolução Normativa nº 414 [2], de 9 de setembro de 2010, que estabelece as condições gerais de fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada, diz que para os consumidores do grupo A, o fator de potência de referência “fr”, indutivo ou capacitivo, tem como limite mínimo permitido, o valor de 0,92.

“Aos montantes de energia elétrica e demanda de potência reativa que excederem o limite permitido, aplicam-se as cobranças estabelecidas nos arts. 96 e 97, a serem adicionadas ao faturamento regular de unidades consumidoras do grupo A, incluídas aquelas que optarem por faturamento com aplicação da tarifa do grupo B nos termos do art. 100.” (Resolução Normativa nº414, 2010, p. 84)

“Art. 96. - Para unidade consumidora que possua equipamento de medição apropriado, incluída aquela cujo titular tenha celebrado o CUSD, os valores correspondentes à energia elétrica e demanda de potência reativas excedentes são apurados conforme as seguintes equações:” (Resolução Normativa nº414, 2010, p. 84-87).

$$E_{RE} = \sum_{T=1}^n \left[EEAM_T \times \left(\frac{fr}{ft} - 1 \right) \right] \times VR_{ERE} \quad (1)$$

$$D_{RE}(p) = \left[\text{MAX}_{T=1} \left(PAM_T \times \frac{fr}{ft} \right) - PAF(p) \right] \times VR_{DRE} \quad (2)$$

Sendo:

E_{RE} : valor correspondente à energia elétrica reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência “fr”, no período de faturamento, em Reais (R\$);

$EEAM_T$: montante de energia elétrica ativa medida em cada intervalo “T” de 1 (uma) hora, durante o período de faturamento, em Megawatt-hora (MWh);

fr: fator de potência de referência igual a 0,92;

ft: fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo “T” de 1 (uma) hora, durante o período de faturamento;

VR_{ERE} : valor de referência equivalente à tarifa de energia “TE” aplicável ao subgrupo B1, em Reais por megawatt-hora (R\$/MWh);

$D_{RE}(p)$: valor, por posto tarifário “p”, correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência “fr” no período de faturamento, em Reais (R\$);

PAM_T : demanda de potência ativa medida no intervalo de integralização de 1 (uma) hora “T”, durante o período de faturamento, em quilowatt (kW);

$PAF(p)$: demanda de potência ativa faturável, em cada posto tarifário “p” no período de faturamento, em quilowatt (kW);

VR_{DRE} : valor de referência, em Reais por quilowatt (R\$/kW), equivalente às tarifas de demanda de potência - para o posto tarifário fora de ponta - das tarifas de fornecimento aplicáveis aos subgrupos do grupo A para a modalidade tarifária horária azul e das TUSD-Consumidores-Livres, conforme esteja em vigor o Contrato de Fornecimento ou o CUSD, respectivamente;

MAX: função que identifica o valor máximo da equação, dentro dos parênteses correspondentes, em cada posto tarifário “p”;

T: indica intervalo de 1 (uma) hora, no período de faturamento;

p: indica posto tarifário ponta ou fora de ponta para as modalidades tarifárias horárias ou período de faturamento para a modalidade tarifária convencional binômia;

n1: número de intervalos de integralização “T” do período de faturamento para os postos tarifários ponta e fora de ponta;

n2: número de intervalos de integralização “T”, por posto tarifário “p”, no período de faturamento.

Assim sendo, por mais que o valor a ser pago seja referente ao Reativo Excedente, este é proporcional ao montante da energia elétrica ativa medida no intervalo de tempo referente à medição e a relação do fator de potência de referência com o fator de potência da unidade consumidora.

Para a apuração dessas grandezas, há também um período de 6 (seis) horas consecutivas (a critério da distribuidora) entre 23h 30min e 6h e 30min, no qual se considera apenas os fatores de potência “ft” inferiores a 0,92 capacitivo, verificados em cada intervalo de uma hora “T”. Ao período diário complementar, se considera apenas os fatores de potência inferiores a 0,92 indutivo, verificados no mesmo tempo.

Sendo a carga eletrônica não linear, estudada nesse trabalho, de natureza indutiva ou capacitiva, há então uma influência direta na medição dos valores de reativo excedente descrito na resolução normativa, pois esta, em tese, ao absorver ou injetar reativo no barramento, contribuem para a alteração no valor do fator de potência registrado a cada hora. Esta situação levanta novas discussões no meio acadêmico sobre de que maneira e quão relevante será essa influência, em função do considerável acréscimo de cargas eletrônicas nos barramentos residenciais, comerciais e industriais.

III. CONSIDERAÇÕES REFERENTES ÀS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NOS SISTEMAS ELÉTRICOS

Para a rede básica de energia, o Operador Nacional do Sistema (ONS) estabelece, desde 2002, parâmetros de qualidade para a tensão suprida. Mas, do ponto de vista do consumidor, as restrições a serem consideradas são (na maioria) as do sistema de distribuição, as quais ainda estão em discussão.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no documento “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica” [3], propõe valores de referência para a distorção harmônica da tensão no sistema de distribuição, tal como ilustrado na Tabela I.

TABELA I. VALORES DE REFERÊNCIA DE DTT (EM % DA TENSÃO FUNDAMENTAL)

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão [%]
$V_n \leq 1 \text{ Kv}$	10
$1 \text{ kV} \leq V_n \leq 69 \text{ kV}$	8
$69 \text{ kV} \leq V_n \leq 230 \text{ kV}$	5

IV. METODOLOGIA UTILIZADA NA MEDIÇÃO

A carga eletrônica utilizada na experiência laboratorial

apresenta características não lineares, o que resulta em formas de onda de correntes com significativas distorções. Entretanto, para as tensões no barramento de suprimento das cargas, não se observou distorções harmônicas significativas, permanecendo dentro dos limites recomendados pela resolução normativa estabelecida pela ANEEL [4]. Assim, a carga eletrônica não linear, apresentou, segundo medidores de grandezas elétricas e analisadores de energia, um fluxo de potência reativo indutivo ou capacitivo em função do tipo de chaveamento utilizado, ou seja, no sentido da carga para o barramento ou do barramento para a carga.

Os equipamentos empregados para o registro das grandezas elétricas da carga eletrônica chaveada no laboratório correspondem ao analisador de energia MARH-21, fabricante RMS e o Fluke434, ilustrados na Fig. 1, que são medidores registradores digitais de grandezas em tempo real para sistemas elétricos monofásicos, bifásicos e trifásicos em baixa, média e alta tensão. E também foi analisado o comportamento de medidores utilizados pelas distribuidoras de energia elétrica para fins de faturamento, tanto eletrônicos quanto analógicos, conforme figura 2.

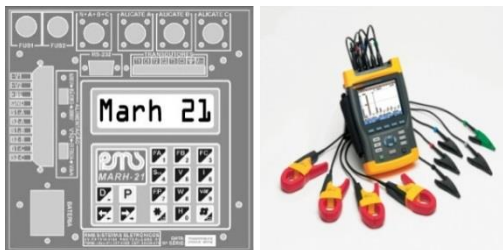


Fig. 1. Analisadores de energia: RMS MARH-21 (à esquerda) e Fluke434 (à direita).



Fig. 2. Medidores utilizados pelas distribuidoras de energia elétrica. Medidor Analógico kVarh (à esquerda). Actaris SL7000 (à direita).

V. MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO

Para este estudo, foi utilizado em laboratório um dispositivo eletrônico chaveando uma resistência nas três fases do sistema, constituindo uma carga não linear ilustrado na Fig. 3. A experiência foi dividida em dois casos. No primeiro, inicia-se o processo aplicando tensão sem qualquer impedimento ao estabelecimento da corrente e decorrido aproximadamente metade do semiciclo positivo, a corrente é bloqueada, ocorrendo o mesmo para o semiciclo negativo. No segundo caso, aplicou-se tensão na carga e atrasou-se o início da corrente em torno da metade do semiciclo positivo da tensão, o mesmo aconteceu para o semiciclo negativo. Posteriormente, foram realizadas medições, por meio de medidores de grandezas elétricas e analisadores de energia, para avaliar o comportamento do fluxo da potência reativa da carga eletrô-

nica não linear no barramento do sistema elétrico.



Fig. 3. Sistema não linear utilizado nas medições em laboratório.

Inicialmente, foram realizadas medições de formas de onda de tensões, correntes, potências ativas e reativas, além do fator de potência nos dois tipos de chaveamento realizados na carga não linear, que tem comportamento semelhante às cargas eletrônicas presentes em Unidades Consumidoras dos grupos A e B.

A. Caso I – Aplicação da tensão na carga sem bloqueio inicial da corrente

As formas de onda da tensão e corrente da fase A no barramento do laboratório, obtidas com o primeiro tipo de chaveamento da carga não linear, estão ilustradas nas Figs. 4 e 5, onde se pode observar que a forma de onda da tensão é praticamente senoidal. As formas de onda de tensão e corrente mostradas na fig.4, foram obtidas com pontos gerados a partir do analisador de energia elétrica RMS MARH-21. Já a fig.5, é uma captura da tela do analisador de energia elétrica FLUKE 434. A corrente ilustrada na Fig. 4, a qual apresenta um valor próximo de zero, a partir de 90° corresponde a corrente de alimentação do circuito de disparo de controle das chaves de potência. A forma de onda da corrente apresentou as harmônicas de corrente de sequências positiva, negativa e zero [5] e [6], como mostra o espectro harmônico da corrente ilustrado na Fig. 6, obtida com o analisador RMS MARCH-21. O comportamento foi similar nas demais fases do sistema.

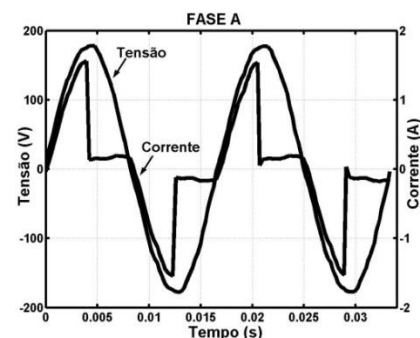


Fig. 4. Formas de ondas da tensão e corrente da carga não linear medida em laboratório com o analisador RMS MARH-21.

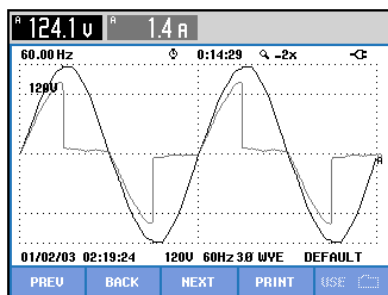


Fig. 5. Formas de ondas da tensão e corrente da carga não linear medida em laboratório com o analisador de energia elétrica FLUKE 434.

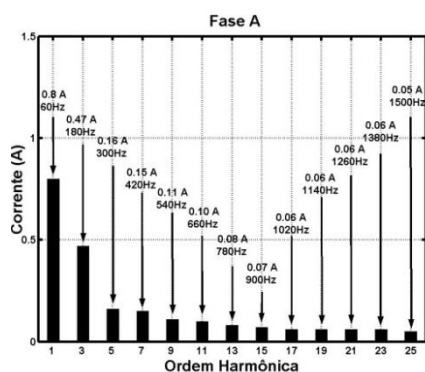


Fig. 6. Espectro harmônico da corrente da carga não linear, na fase A, medida em laboratório.

A Fig. 7 ilustra o diagrama fasorial das tensões e correntes fundamentais que alimentam a carga não linear, obtido por meio do analisador de energia Fluke. Nota-se que as correntes estão adiantadas em relação à tensão, nas três fases do sistema.

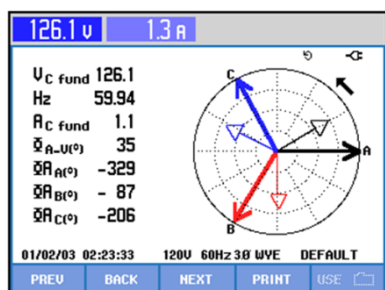


Fig. 7. Diagrama fasorial das tensões e correntes da carga não linear medida em laboratório.

A Fig. 8 mostra que o fluxo das potências ativas e reativas no barramento que alimentam a carga não linear caracteriza uma absorção de 350W de potência ativa e uma injeção de 370VAR de potência reativa capacitiva. A Fig. 8 ilustra também a diferença entre o fator de deslocamento, que representa o cosseno do ângulo da tensão e corrente em 60 Hz (DPF), cujo valor é 0,84, e o fator de potência (PF), que leva em conta todas as frequências presentes na forma de onda da corrente, sendo o mesmo de valor menor e igual a 0,68. A relação entre a potência ativa retirada do barramento e a potência reativa injetada é ilustrada na Fig. 9.

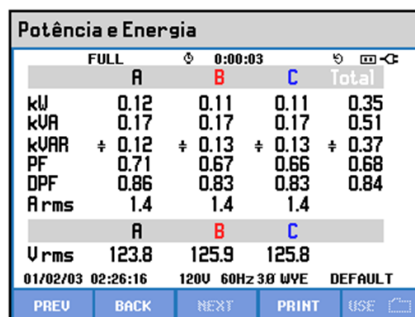


Fig. 8. Tela capturada do analisador de energia elétrica Fluke 434 indicando a característica de potência reativa capacitiva injetada no sistema pela carga não linear, medida em laboratório.

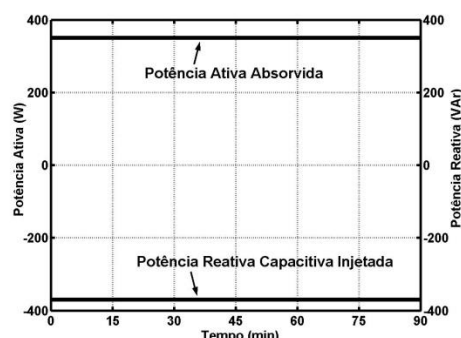


Fig. 9. Potência ativa absorvida e potência reativa capacitiva injetada pela carga não linear, medida em laboratório.

Ao analisar o comportamento do elemento móvel (disco de alumínio) do medidor analógico de kVarh, para este tipo de chaveamento, observou-se que o sentido de giro do disco foi no sentido horário, contrário ao sentido original, de maneira que ficou preso pela catraca, indicando uma característica de reativo capacitivo. Também foi verificado que o medidor eletrônico para fins de faturamento Actaris SL7000, utilizado pelas distribuidoras, indicou uma potência reativa com características capacitivas, conforme ilustrado na Fig.10.



Fig. 10. Medidor para fins de faturamento utilizado pelas distribuidoras Actaris SL7000, indicando potência reativa com características capacitivas, como mostra o vetor apontando para baixo.

B. Caso II – Aplicação da tensão na carga com bloqueio inicial da corrente

Prosseguindo na análise do comportamento da qualidade de energia e do fluxo de reativo das cargas eletrônicas chaveadas conectadas a um barramento, analisou-se o segundo caso, isto é, atrasa-se o início do estabelecimento da corrente em relação à tensão. As Figs. 11 e 12 ilustram as formas de onda da tensão e corrente solicitada pela carga eletrônica não linear, na fase A. As formas de onda de tensão e corrente mostradas

na fig.11, foram obtidas com pontos gerados a partir do analisador de energia elétrica RMS MARH-21. Já a fig.12, é uma captura da tela do analisador de energia elétrica FLUKE 434. A forma de onda da tensão não apresentou distorção harmônica significativa, já a forma da corrente apresentou uma forte presença de harmônicas de seqüências positivas, negativas e zero, ilustradas no espectro harmônico de corrente da Fig. 13, obtida com os dados do analisador de energia elétrica RMS MARH-21.

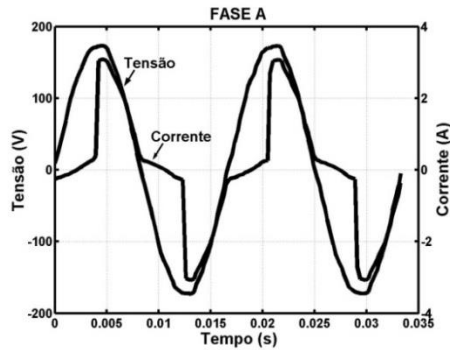


Fig. 11. Formas de ondas da tensão e corrente da carga não linear medida em laboratório com o analisador de energia elétrica RMS MARH-21, na Fase A.

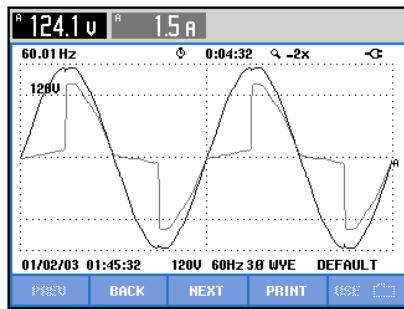


Fig. 12. Formas de ondas da tensão e corrente da carga não linear medida em laboratório com o analisador de energia elétrica FLUKE 434, na Fase A.

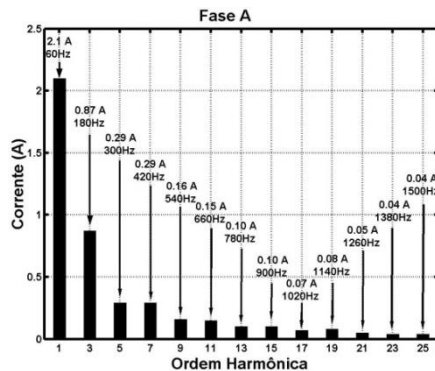


Fig. 13. Espectro harmônico da corrente da carga não linear, na fase A, medida em laboratório.

No diagrama fasorial ilustrado na Fig.14, entre as tensões e correntes fundamentais, observa-se que as correntes estão atrasadas em relação à tensão. Dessa maneira, nota-se a característica indutiva da carga eletrônica não linear, comprovada na Fig.15 pela imagem retirada do analisador de energia FLUKE 434.

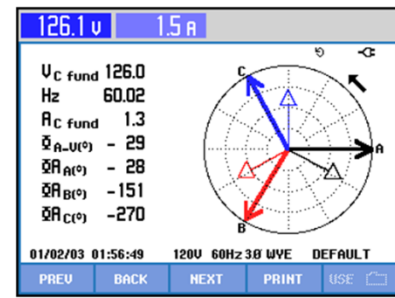


Fig. 14. Tela capturada do analisador de energia elétrica Fluke434 mostrando o diagrama fasorial das tensões e correntes da carga não linear medida em laboratório.

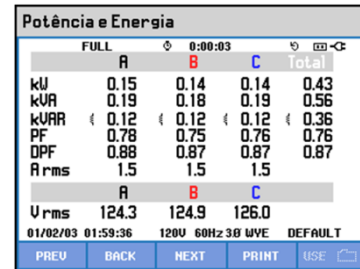


Fig. 15. Tela capturada do analisador de energia elétrica Fluke434 indicando a característica de potência reativa indutiva absorvida do sistema pela carga não linear medida em laboratório.

São ilustradas na Fig.16 as potências, ativa e reativa indutiva, absorvidas no barramento pela carga eletrônica não linear.

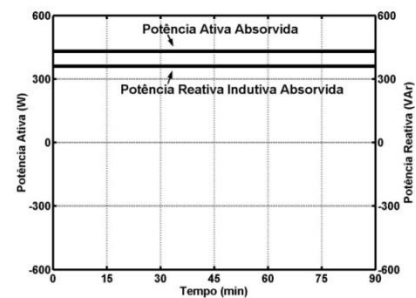


Fig. 16. Potência ativa absorvida e potência reativa indutiva absorvida pela carga não linear medida em laboratório.

Analisando também o comportamento do elemento móvel (disco de alumínio) do medidor analógico de kVARh, para este tipo de chaveamento, observou-se que o sentido de giro do disco foi no sentido anti-horário, indicando uma característica de reativo indutivo. Também foi verificado que o medidor eletrônico para fins de faturamento Actaris SL7000, utilizado pelas distribuidoras, indicou uma potência reativa com características indutivas, conforme ilustrado na Fig.17.



Fig. 17. Medidor para fins de faturamento utilizado pelas distribuidoras Actaris SL7000, indicando potência reativa com características indutivas, como mostra o vetor apontando para cima.

A fig.18 ilustra o comportamento do disco de alumínio do medidor de energia elétrica tipo indução, mostrando disco travado para chaveamento com característica capacitiva e disco em movimento no sentido anti-horário para chaveamento com característica indutiva. Na Fig. 18, as duas fotos foram focalizadas no disco de alumínio. Na imagem à esquerda, pode-se observar que o disco de alumínio do medidor está nítido, demonstrando que o mesmo está travado, já na imagem à direita, observa-se uma pequena ausência de nitidez no disco, o que indica movimento.

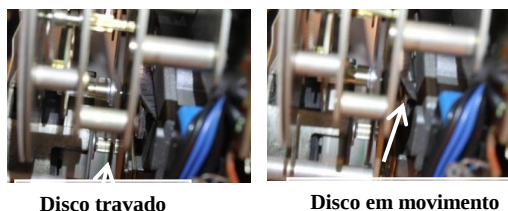


Fig. 18. Medidor Analógico kVArh. À esquerda, disco travado, indicando característica capacitiva. À direita, disco em movimento, mostrando característica indutiva.

C. Análise dos resultados

Analisando os resultados obtidos em relação à qualidade da energia, observou-se que a carga eletrônica não linear nos dois casos apresentou uma distorção harmônica total de corrente em torno de 70%. Isto pode acarretar um aumento significativo no valor eficaz verdadeiro da corrente, devido a forte presença das harmônicas de sequência positiva, negativa e zero gerada pela carga eletrônica não linear. Um aumento também significativo nas harmônicas de sequência zero pode acarretar um acréscimo na corrente do neutro do barramento onde cargas com estas características estão conectadas.

Quanto à injeção de potência reativa capacitiva no barramento, pela carga eletrônica não linear do primeiro caso, estas podem melhorar o fator de potência nas dezoito horas do horário indutivo, onde se exige que o fator de potência fique acima de 0,92 indutivos, proporcionando uma diminuição do excedente de energia reativa cobrado das Unidades Consumidoras do Grupo A neste período. Já a carga eletrônica não linear do segundo caso, pode diminuir o fator de potência no horário indutivo, exigindo a instalação de banco de capacitores no barramento para elevar o fator de potência e diminuir o excedente de energia reativa das Unidades Consumidoras. Entretanto, nas seis horas complementares, onde se exige que o fator de potência fique acima de 0,92 capacitivos, a característica indutiva dessa carga eletrônica não linear absorvendo reativo indutivo no barramento, pode diminuir o excedente de energia reativa faturado das Unidades Consumidoras, também do Grupo A [7].

VI. CONCLUSÃO

No presente artigo foi analisada a influência das cargas

eletrônicas não lineares com dois tipos de chaveamento na qualidade da energia e no sistema de tarifação, quando conectadas nos barramentos das unidades consumidoras dos grupos A e B.

No experimento laboratorial, foi utilizado um dispositivo eletrônico chaveando uma resistência constituindo um conjunto com fortes características não lineares. Através dos dados registrados nos analisadores de energia, foi possível observar um fluxo de reativo capacitivo ou indutivo para o barramento de alimentação dependendo do tipo de chaveamento empregado. A não linearidade da carga eletrônica proporcionou uma elevada distorção de corrente, com a presença significativa das harmônicas de sequências positivas, negativas e zero, que poderão elevar o valor eficaz das correntes nas fases do barramento e no condutor neutro, através da circulação das harmônicas de sequência zero. Portanto, os barramentos dos sistemas elétricos das Unidades Consumidoras dos grupos A e B que apresentam um elevado número de cargas eletrônicas, devem ser constantemente monitorados, para verificar as condições de aquecimento dos condutores das fases e do neutro, devido à presença das correntes de múltiplas frequências injetadas.

A injeção de potência reativa capacitiva e absorção de potência reativa indutiva no barramento pelas cargas eletrônicas, registrada pelos medidores, podem contribuir para a alteração do fator de potência das unidades consumidoras e, consequentemente, influenciar no cálculo do excedente de energia reativa, tanto no horário indutivo, quanto no horário capacitivo. É importante lembrar que a característica da carga eletrônica não linear utilizada no presente estudo, pode ser encontrada em diversas cargas eletrônicas existentes no mercado, recomendadas aos consumidores dos grupos A e B, com o intuito de contribuir para uma maior eficiência elétrica, no que tange o consumo de energia elétrica ativa.

Por fim, verifica-se a necessidade de estudos mais aprofundados sobre o impacto da injeção de reativo pelas cargas eletrônicas em Unidades Consumidoras do grupo A e B e a influência destas no sistema de tarifação de energia. Além disso, os estudos devem contemplar também análises da interferência das múltiplas frequências das correntes injetadas pelas cargas eletrônicas não lineares nas Unidades Consumidoras e nos barramentos da concessionária distribuidora de energia.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] Watanabe, Edson H; Aredes, Mauricio. "Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações -Filtros Ativos e FACTS".
- [2] ANEEL. Resolução Normativa nº414. 9 de setembro de 2010.
- [3] ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (Prodist), módulo 8.
- [4] ANEEL. Resolução Normativa nº641. 01 de janeiro de 2015.
- [5] IEEE Task Force, "The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads", IEEE Trans. Power App. and Systems, vol. 104, no. 9, Set. 1985, pp. 2555-2563.
- [6] Castro, A. G.; Muños, A. M.; Bollen, M.. "Estudo de harmônicos em lâmpadas com uso da norma IEC 61000-3-6". Revista Eletrônica Moderna. Ed. 479. págs. 110 – 117. Fev. 2014.
- [7] IEEE Standard 519-1992, "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", 1992.