

Cargas Ativas Inteligentes e Potência Não Ativa em Cargas Não Lineares

A. P. Finazzi, Dr.; A. B. Vasconcellos, Dr.; F. P. Santilio, Dr., F. N. Lima, Dr., R. Quadros, M.Sc.
R. P. B. Silva, M.Sc.

Universidade Federal de Mato Grosso, 78060-900, Cuiabá-MT, Brasil

Resumo — O fator de potência, herdado da era de cargas lineares, é atualmente definido pela relação entre a energia realmente consumida e a energia total que trafega no barramento, necessária para suprir tanto a energia consumida como qualquer outro tipo de energia que não seja a consumida. Este artigo propõe uma estratégia de comando de cargas ativas, eletronicamente chaveadas, com o objetivo de melhorar o fator de potência do barramento que alimenta essas e as demais cargas interligadas. Para validar essa estratégia foram realizadas medições em laboratório abrangendo cargas monofásicas, lineares e não lineares em paralelo. Finalmente é apresentada uma análise dos resultados obtidos e uma conclusão final sobre a eficácia do método proposto.

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

I. INTRODUÇÃO

A avaliação das distorções harmônicas por meio de medições é uma tarefa muito importante para a operação dos sistemas elétricos. Pode, inclusive, contribuir para melhorar a precisão do registro da energia consumida, favorecendo o relacionamento entre clientes e concessionária. Ressalta-se que as dificuldades na medição dessas ondas estão relacionadas com o fato de que as cargas geradoras de harmônicos são de natureza dinâmica, que produzem harmônicos com amplitudes variantes no tempo.

A não linearidade dos sinais elétricos já era objeto de estudo de grandes pensadores desde o final da década de 20. Contudo, a partir das últimas três décadas é que novos grupos de pesquisadores têm se preocupado com o assunto devido à difusão em grande escala do novo perfil de cargas e suas consequências adversas. Destacam-se dentre os pesquisadores deste empolgante assunto, Budeanu (1927), Fryze (1932), Czarnecki (1988), Depenbrock (1962/1992), Akagi e Nabae (1983/1993), IEEE 1459 (2000), Tenti e Mattavelli (2004). Uma descrição de cinco dos mais importantes métodos desenvolvidos nesta área de estudo pode ser encontrada na referência [1].

Apesar de amplamente difundido, salienta-se que ainda não há um consenso quando se trata de estabelecer a natureza da potência não ativa, particularmente quanto ao seu significado físico.

Observa-se, então, uma crescente preocupação com relação ao assunto por parte dos mais importantes grupos de trabalho internacionais, haja vista que, recomendações relativas ao consumo de energia elétrica tais como IEEE 519, EN 50160 e IEC 61000 já estabelecem limites para os níveis de distorção harmônica das tensões com os quais os sistemas elétricos podem operar e impõem que novos equipamentos não “contaminem” as redes elétricas com harmônicos de corrente com amplitude superior a determinados valores [2], [3], [4].

No Brasil, os órgãos reguladores do setor de energia elétrica (ANEEL, ONS) e concessionárias vêm tratando esta questão com rigor. A ANEEL, através dos procedimentos de distribuição (PRODIST), publicado em dezembro de 2008, em seu módulo 8 (oito) trata da qualidade de energia no que tange ao serviço e produto em âmbito nacional [5].

Nesse contexto, a crescente demanda de energia elétrica requer a otimização de todo o Sistema de Transporte e Geração. Uma vez instalado o barramento, este possui uma máxima capacidade de circulação de corrente. Considerando que a tensão possui amplitude, fase e frequência fixas, a otimização do fluxo de energia em um barramento se dá quando, para um determinado nível máximo de valor eficaz de corrente, se obtém a maior média do produto dos valores instantâneos da corrente e da tensão, ao longo de um ciclo.

Em uma análise mais detalhada, observando a cada instante o valor da corrente e da tensão no barramento, pode-se determinar um melhor intervalo de condução das cargas ativas, de maneira a dar a sua parcela de contribuição para que a corrente do barramento acompanhe ao máximo, a mesma forma de onda da tensão do barramento, sem comprometimento da sua principal função, iluminação, aquecedor, etc.

Pode-se dizer que as várias cargas ativas serão colaboradoras na Correção de Fator de Potência (CFP) do barramento em que estão interligadas. Para isto, um analisador de fator de potência, ou um detector de passagem por zero da tensão e da corrente, posicionado no barramento, deve enviar para o circuito de comando das cargas colaboradoras de CFP, um sinal indicando as condições de atraso ou adiantamento da corrente em relação a tensão do barramento.

Como proposta de controle de fácil implementação, o comando pode se limitar a disparar sempre de duas maneiras: conduzir em 90° no primeiro e terceiro $\frac{1}{4}$ de ciclo ou no segundo e quarto $\frac{1}{4}$ de ciclo da senoidal da tensão de alimentação. Desta maneira é garantido uma potência constante nas cargas colaboradoras do CFP. Outros tipos de comando

mais complexos podem ser implementados, variando o intervalo de condução, otimizando ainda mais o fator de potência e mantendo sempre a potência individual da carga colaboradora.

Desta forma, este artigo propõe uma estratégia de comando de cargas ativas, eletronicamente chaveadas, com o objetivo de otimizar a circulação de corrente no barramento que alimenta essas e as demais cargas interligadas.

II. CONSIDERAÇÕES REFERENTES À ENERGIA EXCEDENTE NO SISTEMA ELÉTRICO

Atualmente, o fator matemático para calcular relação entre a energia realmente consumida e energia que trafega no barramento, leva em consideração dois valores. Esses valores são transformados em valores de potência, devido a facilidade de se medir potências em vez de energia, já que a razão entre potências é a mesma que entre energias. O numerador, definido usualmente pelo símbolo “P”, e chamado de Potência Ativa, é o valor médio por período “T”, dos produtos instantâneos de tensão “ $v_{(t)}$ ” e corrente “ $i_{(t)}$ ” no barramento, calculado conforme expressão (1).

$$P = \frac{1}{T} \int v_{(t)} \times i_{(t)} dt \quad (1)$$

O denominador, definido usualmente pelo símbolo “S”, e chamado de Potência Aparente, é o produto do valor eficaz da tensão V_{rms} pelo valor eficaz da corrente I_{rms} , calculado conforme (2).

$$S = V_{rms} \times I_{rms} \quad (2)$$

Finalmente, a razão, denominada fator de potência “FP”, é calculada conforme (3).

$$FP = \frac{P}{S} \quad (3)$$

Para a condição específica de cargas lineares, uma coincidência matemática se verifica. O valor da raiz quadrada da diferença entre o quadrado de S e o quadrado de P é numericamente igual à soma algébrica das potências reativas Q, das cargas interligadas ao barramento.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (4)$$

Todavia é preciso sublinhar que essa coincidência matemática não se verifica para cargas não lineares.

Um resistor linear chaveado, compondo uma carga não linear, pode ter um comportamento matemático, segundo (4), que resulte em Q diferente de zero (caso 2 e caso 3 apresentados em IV). Isto não significa que a carga possua, fisicamente, campo magnético ou elétrico.

Para cargas não lineares, qualquer diferença entre a potência aparente e a potência ativa, calculada por álgebra de números complexos (triângulo das potências) ou outro processo qualquer, não deve ser denominada de potência “reativa”. Nessas situações é denominada de potência não ativa (N) [6]

Ressalta-se que, para calcular a razão entre a energia consumida e o esforço de carregamento de corrente no barramento (fator de potência), não há necessidade do cálculo da potência reativa e nem da potência não ativa, ou outra. Apenas é necessário que se calcule a potência ativa e o produto dos valores eficazes de tensão e corrente, conforme expressões (1), (2) e (3).

Ainda não está definido e publicado um método adequado para que, baseado tão somente na leitura das formas de onda de tensão e corrente no barramento, permita calcular a soma algébrica das potências reativas Q, relacionadas com existência de campos magnéticos ou elétricos, das cargas interligadas a um barramento, quando este barramento contenha pelo menos uma carga não linear.

No entanto, a não coincidência, anteriormente mencionada e expressa em (4), não invalida a atual maneira de se dimensionar um fator matemático que reflita a sobrecarga relativa de carregamento (tráfego) de corrente no barramento, como definido em (1), (2) e (3), mesmo para cargas não lineares. Sendo assim, o proposto comando de cargas ativas a serem colaboradoras de CFP de um barramento, melhora os valores de fator de potência aferidos pelos atuais medidores.

Quanto aos efeitos de harmônicos, nos ramais que alimentam as cargas colaboradoras de CFP ou no barramento geral, não são objetos de discussão neste estudo.

Tudo isso é melhor visualizado, observando as formas de onda e os valores medidos em laboratório, que seguem.

III. MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO

Para este estudo, foi utilizado em laboratório um dispositivo eletrônico chaveando uma resistência, constituindo uma carga ativa não linear (Dimmer). A experiência foi dividida em quatro casos:

- *Caso 1 – carga RL linear;*
- *Caso 2 – carga ativa chaveada com condução no primeiro e no terceiro ¼ de ciclo da senoidal de alimentação;*
- *Caso 3 – carga ativa chaveada com condução no segundo e no quarto ¼ de ciclo da senoidal de alimentação;*
- *Caso 4 – carga ativa chaveada com condução no primeiro e no terceiro ¼ de ciclo da senoidal de alimentação, em paralelo com carga RL linear;*
- *Caso 5 – carga ativa chaveada com condução no segundo e no quarto ¼ de ciclo da senoidal de alimentação em paralelo com carga RL linear.*

Como medidores utilizou-se um analisador de energia Fluke 434, um osciloscópio Tektronix MSO 2022B e um amperímetro, utilizado por medida de segurança. Os valores instantâneos de corrente e tensão, amostrados pelo osciloscópio, foram armazenados em “pendriver” para posteriores cálculos de valores eficazes e potência ativa, via integração matemática.

A figura 1 mostra o esquema de ligação geral que, combinando os devidos acionamentos, ou não, dos ramos em paralelos 1 e 2, pode-se obter o esquema de ligação para todos os casos apresentados neste estudo.

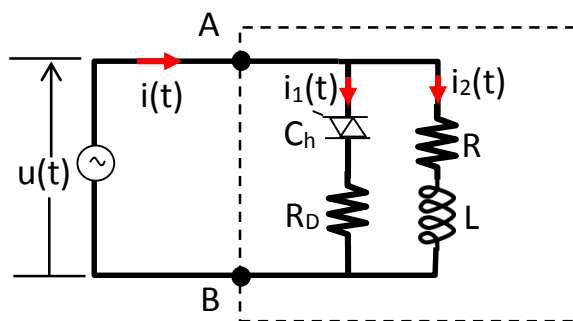


Fig. 1 – Esquema de ligação geral. Dimmer em paralelo com carga RL linear.

A Figura. 2 apresenta uma fotografia da montagem em laboratório.

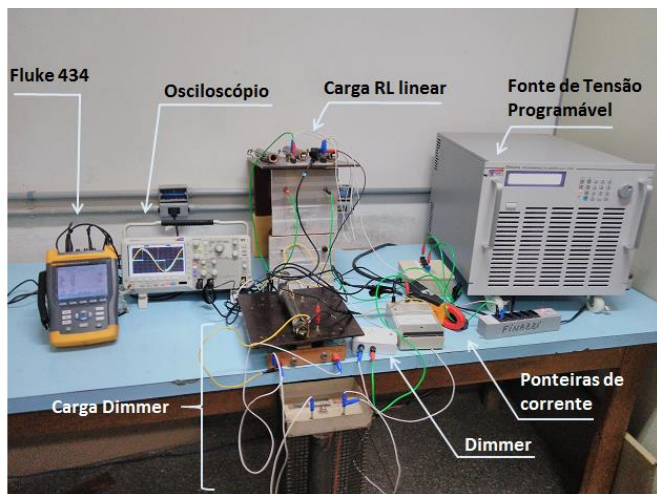


Fig. 2- Montagem em laboratório.

A tensão da Fonte de tensão programável, que alimenta o barramento, é praticamente senoidal, como mostram o espectro de frequência do analisador de energia em Fig. 3.

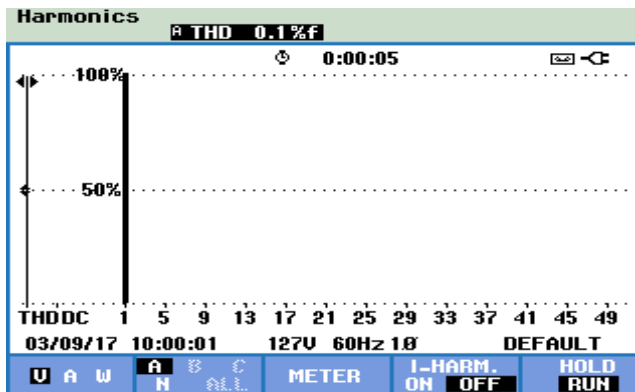


Fig. 3 – Espectro de frequência da tensão de alimentação fornecida pela Fonte de Tensão Programável.

A. Caso 1 – carga RL linear

Nesta experiência, a carga se constitui de uma resistência de aproximadamente 27Ω , em série com uma indutância de aproximadamente 60 mH. A tensão de alimentação é regulada para aproximadamente 127,0 V eficaz.

A Figura 4 apresenta as formas de onda da tensão e da corrente amostradas pelo analisador de energia, para o caso 1.

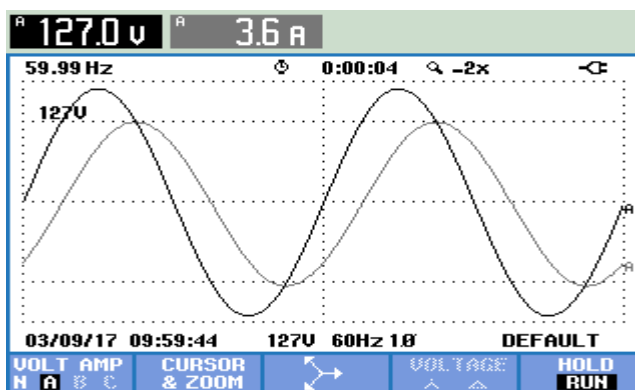


Fig. 4 – Formas de onda de tensão (mais escura) e de corrente para caso 1.

A Figura 5 apresenta os valores lidos pelo analisador de energia, para o caso 1.

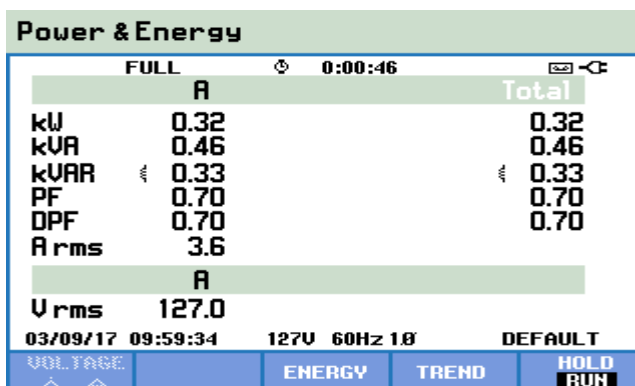


Fig. 5 – Valores lidos para caso 1

A Tabela 1 apresenta os valores lidos pelo analisador de energia Fluke 434 e os valores calculados através dos dados amostrados no osciloscópio Tektronix MSO 2022B, para as medições do caso 1.

TABELA 1. POTÊNCIAS ELÉTRICAS MEDIDAS – CASO 1

	P [kW]	S [kVA]	FP
Lidos	0,32	0,46	0,70
Osciloscópio	0,35	0,46	0,77

Para todos os casos aqui apresentados, os valores esperados da corrente em cada carga podem ser calculados conforme expressões (5) e (6). Os demais valores, conforme expressões (1), (2) e (3).

$$v(t) = V_{max} \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$i(t) = \frac{V_{max}}{Z} \sin(\omega t - \theta_z) \quad (6)$$

B. *Caso 2 – carga ativa chaveada com condução no primeiro e no terceiro ¼ de ciclo da senoidal de alimentação.*

Nesta experiência, a carga se constitui de uma resistência de aproximadamente 30Ω, chaveada, de maneira a conduzir somente durante o primeiro e no terceiro ¼ de ciclo da senoidal de alimentação. A tensão de alimentação foi regulada para aproximadamente 127,0 V eficaz.

A Figura 6 apresenta as formas de onda da tensão e da corrente amostradas pelo analisador de energia para o caso 2.

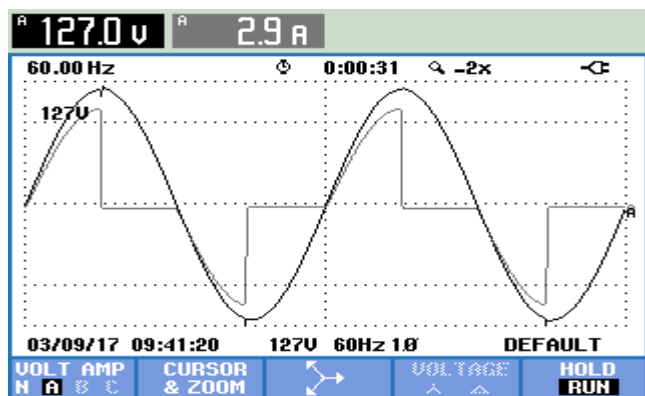


Fig. 6 – Formas de onda Tensão e Corrente para caso 2.

A Figura 7 apresenta os valores lidos pelo analisador de energia para o caso 2.

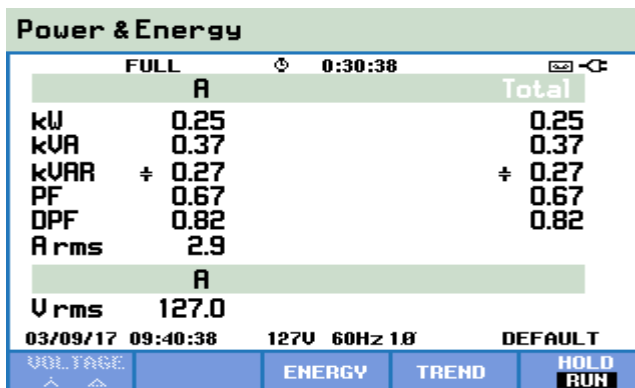


Fig. 7 – Valores lidos para caso 2

A Tabela 2 apresenta os valores lidos pelo analisador de energia Fluke 434 e os valores calculados através dos dados amostrados no osciloscópio Tektronix MSO 2022B, para as medições do caso 2.

TABELA 2. POTÊNCIAS ELÉTRICAS MEDIDAS – CASO 2

	P [kW]	S [kVA]	FP
Fluke	0,25	0,37	0,67
Osciloscópio	0,23	0,37	0,62

C. *Caso 3 – carga ativa chaveada com condução no segundo e no quarto ¼ de ciclo da senoidal de alimentação.*

Nesta experiência, a carga se constitui de uma resistência de aproximadamente 30Ω, chaveada, de maneira a conduzir somente durante o segundo e no quarto ¼ de ciclo da senoidal de alimentação. A tensão de alimentação foi regulada para aproximadamente 127,0 V eficaz.

A Figura 8 apresenta as formas de onda da tensão e da corrente amostradas pelo analisador de energia para o caso 3.

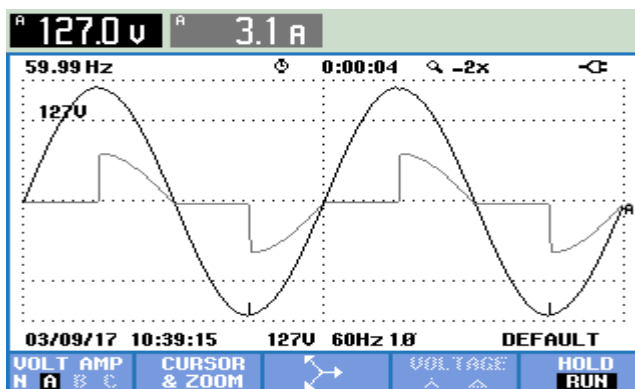


Fig. 8 – Formas de onda Tensão e Corrente para carga caso 3.

A Figura 9 apresenta os valores lidos pelo analisador de energia para o caso 3.

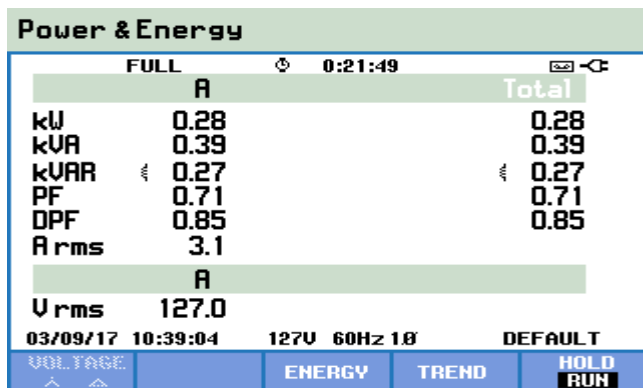


Fig. 9 – Valores lidos para caso 3

A Tabela 3 apresenta os valores lidos pelo analisador de energia Fluke 434 e os valores calculados através dos dados amostrados no osciloscópio Tektronix MSO 2022B, para as medições do caso 3.

TABELA 3. POTÊNCIAS ELÉTRICAS MEDIDAS – CASO 3

	P [kW]	S [kVA]	FP
Fluke	0,28	0,39	0,71
Osciloscópio	0,30	0,40	0,75

D. Caso 4 – carga ativa chaveada com condução no primeiro e no terceiro $\frac{1}{4}$ de ciclo da senoidal de alimentação em paralelo com carga RL linear.

Nesta experiência, a carga se constitui de uma resistência de aproximadamente 30Ω , chaveada, de maneira a conduzir somente durante o primeiro e no terceiro $\frac{1}{4}$ de ciclo da senoidal de alimentação em paralelo com uma carga constituída de uma resistência de aproximadamente 27Ω em série com uma indutância de aproximadamente 60 mH. A tensão de alimentação foi regulada para aproximadamente 127,0 V eficaz.

A Figura 10 apresenta as formas de onda da tensão e da corrente amostradas pelo analisador de energia para o caso 4.

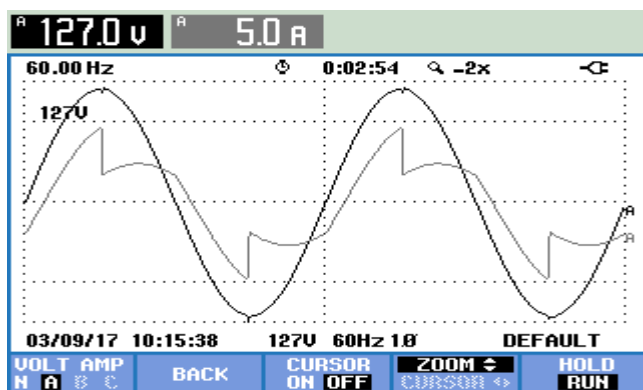


Fig. 10 – Formas de onda Tensão e Corrente para caso 4

A Figura 11 apresenta os valores lidos pelo analisador de energia para o caso 4.

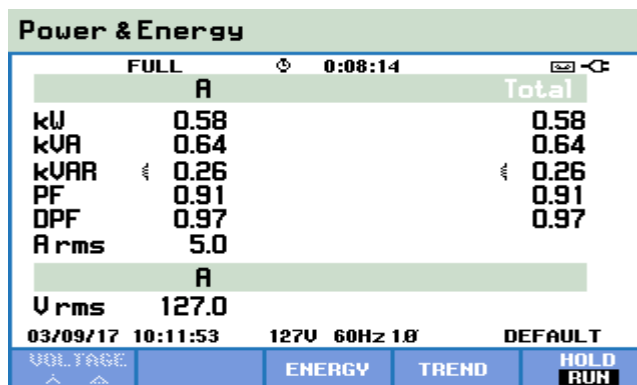


Fig. 11 - Valores lidos para caso 4

A Tabela 4 apresenta os valores lidos pelo analisador de energia Fluke 434 e os valores calculados através dos dados amostrados no osciloscópio Tektronix MSO 2022B, para as medições do caso 4.

TABELA 4. POTÊNCIAS ELÉTRICAS MEDIDAS – CASO 4

	P [kW]	S [kVA]	FP
Fluke	0,58	0,64	0,91
Osciloscópio	0,59	0,64	0,93

E. Caso 5 – carga ativa chaveada com condução no segundo e no quarto $\frac{1}{4}$ de ciclo da senoidal de alimentação em paralelo com carga RL linear.

Nesta experiência, a carga se constitui de uma resistência de aproximadamente 30Ω , chaveada, de maneira a conduzir somente durante o segundo e no quarto $\frac{1}{4}$ de ciclo da senoidal de alimentação em paralelo com uma carga constituída de uma resistência de aproximadamente 27Ω em série com uma indutância de aproximadamente 60 mH. A tensão de alimentação foi regulada para aproximadamente 127,0 V eficaz. A Fig. 12 apresenta as formas de onda da tensão e da corrente amostradas pelo analisador de energia para o caso 5.

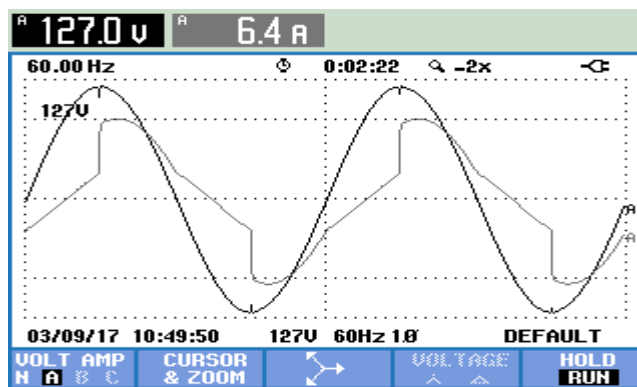


Fig. 12 – Formas de onda Tensão e Corrente para caso 5

A Figura 13 apresenta os valores lidos pelo analisador de energia para o caso 5.

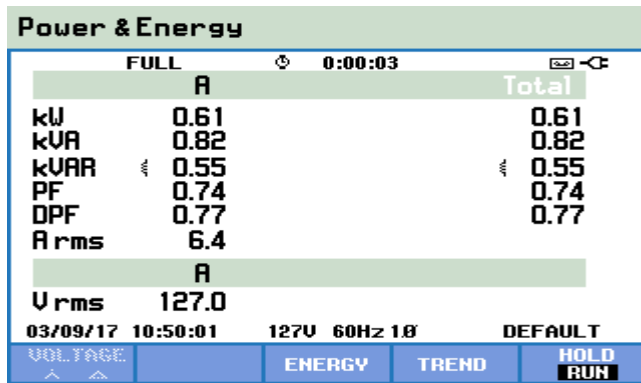


Fig. 13 - Valores lidos para caso 5.

A Tabela 5 apresenta os valores lidos pelo analisador de energia Fluke 434 e os valores calculados através dos dados amostrados no osciloscópio Tektronix MSO 2022B, para as medições do caso 5.

TABELA 5. POTÊNCIAS ELÉTRICAS MEDIDAS – CASO 5

	P [kW]	S [kVA]	FP
Fluke	0,61	0,82	0,74
Osciloscópio	0,66	0,82	0,80

F. Análise de resultados

Comparando o caso 4 ($I_{rms} = 5,0$ A), com o caso 5 ($I_{rms} = 6,4$ A), observa-se que, para consumir praticamente a mesma potência ativa, a potência aparente, ou seja o esforço de carregamento no barramento para o caso 4, é aproximadamente 28% menor que no caso 5, obtendo um fator de potência de 0,91 no caso 4, contra 0,74 no caso 4.

Em termos de valores instantâneos, observa-se nas formas de onda de corrente que, no intervalo de 0° a 90° , a corrente da carga não colaboradora RL linear, é predominantemente negativa, Fig. 4, sendo assim, fazer circular uma corrente positiva neste intervalo otimiza a circulação de corrente no barramento. É exatamente o que ocorre no caso 4, Fig.10. Ainda no caso 4, no intervalo de 180° a 270° , a corrente da carga não colaboradora é predominantemente positiva, Fig. 4, e a corrente na carga colaboradora é negativa, Fig. 10.

IV. CONCLUSÃO

No contexto do atual método utilizado, tanto para cargas lineares como para cargas não lineares, que quantifica a relação entre a energia realmente consumida e a energia total que trafega no barramento, denominada como fator de potência, o presente artigo apresenta e analisa uma proposta de melhor uso de cargas ativas, visando colaborar na correção do fator de potência de um barramento.

As medições em laboratório confirmaram a melhora de performance em relação ao valor final de fator de potência no

barramento se cargas ativas colaboradora forem devidamente comandadas (chaveadas).

Quanto ao cálculo de uma potência associada a manutenção de todos os campos elétricos ou magnéticos, nas possíveis cargas interligadas ao barramento, denominada Potência Reativa e associada ao símbolo “Q”, baseando-se tão somente nos valores instantâneos de tensão e corrente no barramento, ainda não se têm um método de cálculo publicado nos meios científicos, quando se trata de cargas não lineares.

O valor de Q é dispensável para o cálculo do fator de potência, no entanto, para dimensionar os elementos de correção de fator de potência, o que se calcula não é necessariamente a soma algébrica das potências reativas Q relacionadas com existência de campos magnéticos ou elétricos das cargas interligadas, mas sim, um valor matemático que traduza um certo “atraso” ou “adiantamento” da corrente em relação à tensão do barramento.

Este trabalho não entra no mérito deste valor. As cargas inteligentes, aqui propostas, podem não corrigir totalmente, mas colaboram, diminuindo o porte de qualquer outro dispositivo que complemente o sistema, buscando o fator de potência desejado.

I. VI. REFERÊNCIAS

- [1] C. Cepisca, H. Andrei, S. Ganatsios, M. Veyssiere, “Energy measurement techniques for non-sinusoidal situations”, International Conference on Metrology & Measurement Systems, June 27-28, 2002, Politehnica University, Bucharest, Romania, Vol. 44, N°. 2, 2003.
- [2] IEEE Standard 519-1992, “Recommended Practices and Requirements for harmonic Control in Electric Power Systems”, 1992.
- [3] EN 50160, Voltage characteristics of electric supplied by public distribution systems, 1999.
- [4] M. McGranaghan, G. Beaulieu, “Update on IEC 61000-3-6, Harmonic Emission limits for customers connected to MV, HV and EHV”, Transmission and Distribution Conference and Exhibition , 2005/2006, IEEE PES, May 2006, Dallas, TX, 7803-9193-4-/06/\$20.00©2006 IEEE.
- [5] Resolução 345/2008 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).
- [6] IEEE, “Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric power Quantities Under Sinusoidal, No sinusoidal, balanced or Unbalanced Conditions, IEEE Std 1459-2000, March, 2010.