

# Performance Analysis of Active Energy Meters Under Non-Sinusoidal Conditions

G. Xavier, J. Macedo Jr, *Member, IEEE*, R. de Oliveira, L. Oliveira, and I. Gondim

**Abstract**—The performance of electrical energy meters in non-sinusoidal conditions has been discussed since the early 20th Century and as of yet has not reached a fully comprehensive standardization. Within this context, this paper aims to update the present understanding on the subject through a closer look at the power definitions established by the IEEE Std. 1459-2010. The paper concentrates its goals across two different approaches. The first deals with the analytical development in the time domain, aiming at the decomposition of the instantaneous power in its different elementary components. The second, in turn, deals with the development of several calibration tests in different active electrical energy meters considering different voltage and current waveforms. The results show that the measurement deviations in non-sinusoidal conditions may be greater than 30% in some practical cases, which reinforces the need for more specific standards concerning the subject.

**Index Terms**—Harmonics, Measurement errors, Power meters.

## I. INTRODUÇÃO

PROVAVELMENTE, uma das primeiras publicações a abordar o desempenho de medidores de energia elétrica ativa na presença de componentes harmônicas de tensão e de corrente tenha sido [1]. De forma notável, ainda que indiretamente, a abordagem analítica apresentada traduz a essência do significado físico da potência ativa em condições não senoidais, tal como proposto atualmente pela IEEE Std. 1459-2010 [2]. Contudo, apesar dos desenvolvimentos analíticos indicarem o contrário, ressaltou-se que o impacto da presença de componentes harmônicas é praticamente imperceptível em sistemas reais. Muito provavelmente, essa afirmação estava associada ao fato de que as amplitudes das distorções harmônicas eram praticamente inexpressivas na época, comparativamente ao que pode ser observado nos dias atuais.

Outros trabalhos pioneiros desenvolvidos na primeira metade do século 20 contribuíram significativamente para a análise da medição da energia elétrica ativa em condições não senoidais.

Este trabalho teve apoio financeiro do Grupo Energisa e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001.

G. L. Xavier, Universidade Federal de Viçosa, *campus* Rio Paranaíba, Rio Paranaíba, Minas Gerais, Brasil, guilhermexavier@ufv.br.

J. R. Macedo Jr, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, jrubens@ufu.br.

R. F. B. de Oliveira, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, raphaelbarata@gmail.com.

L. T. S. Oliveira, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, lincolntsoliveira@gmail.com.

I. N. Gondim, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, gondim.isaque@gmail.com.

As análises apresentadas em [3] e [4] foram desenvolvidas considerando-se o desempenho de medidores quando da medição de cargas individuais representadas por retificadores de potência. Os resultados mostrados nesses trabalhos demonstraram desvios de medição inferiores a 1% nos valores de energia ativa medidos, comparativamente aos resultados obtidos considerando-se apenas tensões e correntes na frequência fundamental.

No início dos anos 40, [5] abordou a preocupação crescente sobre o assunto e ressaltou o fato de que os medidores de energia elétrica, existentes na época, foram desenvolvidos de forma que a plenitude de seus desempenhos fosse obtida considerando-se apenas as tensões e as correntes na frequência fundamental. Ao mesmo tempo, o trabalho mostrou que os desvios de medição em condições não senoidais, para níveis usuais de distorção da tensão, permaneciam seguramente dentro dos limites aceitáveis para amplitudes de distorção de corrente inferiores a 30%. Desde então, todos os trabalhos publicados sobre o tema consideravam apenas os medidores do tipo eletromecânicos do tipo Watt-hora indutivo, pois era a única tecnologia de medição disponível na época. No entanto, os medidores eletrônicos ganharam espaço a partir do final do século 20 e, atualmente, representam mais da metade dos medidores de energia elétrica em operação em todo o mundo. Esta tecnologia inclui novas variáveis nos estudos de desempenho dos medidores de energia elétrica em condições não senoidais.

Vários artigos publicados nos anos 90 [6]-[8] deram continuidade aos estudos relacionados ao desempenho de medidores de energia ativa em condições não senoidais, sendo que alguns deles passaram a incluir testes em medidores eletrônicos. De acordo com [8], não existe uma forma de onda adequada para a calibração de medidores eletrônicos que utilizam processador digital de sinal (DSP). Entretanto, concluiu-se sobre a necessidade de considerar sinais distorcidos nos processos de calibração de ambas as tecnologias de medidores. Nos anos seguintes, o que se verificou em relação aos trabalhos sobre o mesmo tema pode ser resumido, basicamente, em um pouco mais do mesmo [9]-[15]. Apenas em 2016, após os resultados apresentados em [16], é que o assunto voltou a mobilizar a comunidade científica internacional. De acordo com [16], em determinados casos, a exemplo de instalações elétricas contendo uma combinação de tecnologias de iluminação, os desvios de medição entre diferentes medidores de energia ativa, monitorando um mesmo sinal de tensão e de corrente, poderiam ser superiores a 500%.

A análise do desempenho dos medidores de energia elétrica em condições distorcidas é uma preocupação recorrente tanto

para medição de energia ativa quanto para a energia reativa. Em [17] é apresentado um estudo mais recente a respeito do desempenho dos medidores de energia elétrica reativa sob condições distorcidas.

Com base nessas informações históricas, com o objetivo de promover a atualização de um assunto que há mais de 100 anos continua sem normatização específica, este trabalho propõe, dentre outras coisas, uma revisão analítica do problema à luz da IEEE Std. 1459-2010 [2], assim como a verificação prática dos desvios de medição de energia ativa em condições não senoidais, considerando-se diferentes medidores eletromecânicos e eletrônicos. Adicionalmente, será apresentada uma análise crítica dos resultados indicados em [16].

## II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Em [18] são apresentadas as bases físico-matemáticas para a interpretação do conceito físico-elétrico associado com a potência elétrica em condições distorcidas. Este trabalho serviu de base para elaboração da IEEE Std. 1459-2010, a qual permite o desenvolvimento de estudos analíticos no domínio do tempo visando uma melhor compreensão dos efeitos das distorções harmônicas de tensão e de corrente na medição da energia elétrica ativa. Nesse sentido, considerando-se as tensões e correntes instantâneas indicadas em (1) e (2), a potência total instantânea em um determinado circuito elétrico pode ser obtida conforme (3).

$$v(t) = V_1 \text{sen}(\omega_1 t + \phi_{v1}) + \sum_{h=2}^{\infty} V_h \text{sen}(h\omega_1 t + \phi_{vh}) \quad (1)$$

$$i(t) = I_1 \text{sen}(\omega_1 t + \phi_{i1}) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h \text{sen}(h\omega_1 t + \phi_{ih}) \quad (2)$$

$$p(t) = v(t) \times i(t) \quad (3)$$

sendo:  $V_1$  e  $I_1$  as magnitudes da tensão e da corrente na frequência fundamental, respectivamente,  $\phi_{v1}$  e  $\phi_{i1}$  são os ângulos de fase da tensão e da corrente na frequência fundamental, respectivamente,  $V_h$  e  $I_h$  são as magnitudes da tensão e da corrente na frequência harmônica de ordem  $h$ , respectivamente,  $\phi_{vh}$  e  $\phi_{ih}$  são os ângulos de fase da tensão e da corrente na frequência harmônica de ordem  $h$ , respectivamente.  $\omega_1$  é a frequência fundamental do sistema.

Substituindo-se (1) e (2) em (3), tem-se:

$$\begin{aligned} p(t) = & V_1 \text{sen}(\omega_1 t + \phi_{v1}) \times I_1 \text{sen}(\omega_1 t + \phi_{i1}) + \\ & + V_1 \text{sen}(\omega_1 t + \phi_{v1}) \times \sum_{h=2}^{\infty} I_h \text{sen}(h\omega_1 t + \phi_{ih}) + \\ & + \sum_{h=2}^{\infty} V_h \text{sen}(h\omega_1 t + \phi_{vh}) \times I_1 \text{sen}(\omega_1 t + \phi_{i1}) + \\ & + \sum_{h=2}^{\infty} V_h \text{sen}(h\omega_1 t + \phi_{vh}) \times \sum_{h=2}^{\infty} I_h \text{sen}(h\omega_1 t + \phi_{ih}) \end{aligned} \quad (4)$$

De acordo com (4), a potência total instantânea pode ser estratificada em quatro componentes elementares, definidas conforme a seguir:

$$p_1(t) = V_1 \text{sen}(\omega_1 t + \phi_{v1}) \times I_1 \text{sen}(\omega_1 t + \phi_{i1}) \quad (5)$$

$$p_{v1ih}(t) = V_1 \text{sen}(\omega_1 t + \phi_{v1}) \times \sum_{h=2}^{\infty} I_h \text{sen}(h\omega_1 t + \phi_{ih}) \quad (6)$$

$$p_{vhi1}(t) = \sum_{h=2}^{\infty} V_h \text{sen}(h\omega_1 t + \phi_{vh}) \times I_1 \text{sen}(\omega_1 t + \phi_{i1}) \quad (7)$$

$$p_{vhih}(t) = \sum_{h=2}^{\infty} V_h \text{sen}(h\omega_1 t + \phi_{vh}) \times \sum_{h=2}^{\infty} I_h \text{sen}(h\omega_1 t + \phi_{ih}) \quad (8)$$

Assim, resultando em,

$$p(t) = p_1(t) + p_{v1ih}(t) + p_{vhi1}(t) + p_{vhih}(t) \quad (9)$$

sendo:  $p_1(t)$  é a componente relacionada com a frequência fundamental, ou seja, é a potência instantânea resultante da multiplicação da tensão instantânea fundamental pela corrente instantânea também na frequência fundamental.  $p_{v1ih}(t)$  é a componente resultante da multiplicação da tensão instantânea fundamental pela corrente harmônica instantânea de ordem  $h$ .  $p_{vhi1}(t)$  é a componente resultante da multiplicação da tensão harmônica instantânea de ordem  $h$  pela corrente instantânea fundamental.  $p_{vhih}(t)$  é a componente relacionada com as frequências harmônicas, ou seja, resultante da multiplicação da tensão harmônica instantânea pela corrente harmônica instantânea, ambas de mesma ordem  $h$ .

Com o propósito de facilitar a compreensão das quatro componentes que constituem a potência total instantânea, é apresentado na Fig. 1 um exemplo numérico, considerando:

$$V_1 = 120\text{V}, \phi_{v1} = 0^\circ, V_3 = 12\text{V}, \phi_{v3} = 10^\circ, V_5 = 24\text{V}, \phi_{v5} = 45^\circ$$

$$I_1 = 10\text{A}, \phi_{i1} = -32^\circ, I_3 = 1\text{A}, \phi_{i3} = 145^\circ, I_5 = 2\text{A}, \phi_{i5} = 170^\circ$$

Sendo que as amplitudes das tensões e correntes se encontram indicadas em termos de seus valores eficazes.

Na Fig. 1 é exibido uma representação gráfica de (9) no domínio do tempo. Da mesma forma, a representação gráfica das componentes constituintes da potência harmônica instantânea é apresentada na Fig. 2.

De forma similar, considerando-se o mesmo exemplo numérico, é possível ainda segregar as componentes de potência instantânea  $p_{v1ih}(t)$  e  $p_{vhi1}(t)$  conforme mostrado na Fig. 3 e na Fig. 4, respectivamente.

Análiticamente, a potência ativa associada com o conjunto das componentes das potências instantâneas, conforme indicado em (9), pode ser obtida por (10).

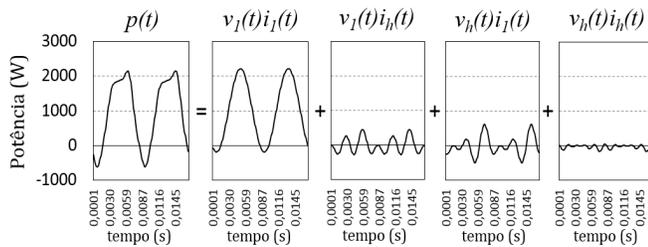


Fig. 1. Representação no domínio do tempo da potência total instantânea e de suas quatro componentes elementares.

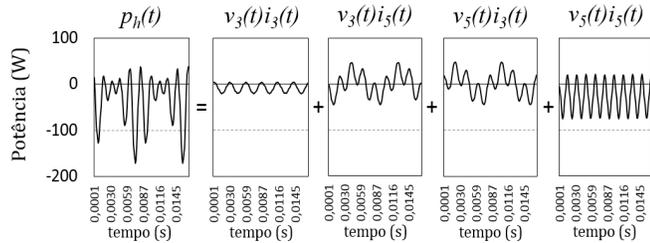


Fig. 2. Representação das componentes de potência harmônica instantânea no domínio do tempo.

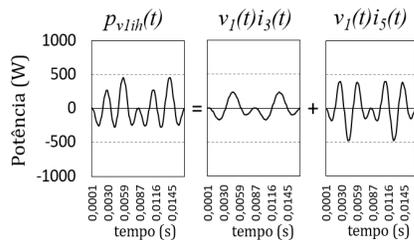


Fig. 3. Representação gráfica da componente de potência instantânea  $p_{v1ih}(t)$  no domínio do tempo.

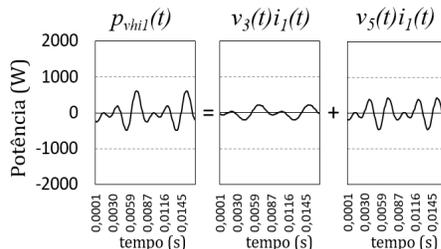


Fig. 4. Representação gráfica da componente de potência instantânea  $p_{vhi1}(t)$  no domínio do tempo.

$$P = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{T} \int_0^T v_m(t) i_n(t) dt \quad (10)$$

Analisando-se (10), é importante observar que a multiplicação cruzada entre tensões e correntes com ordens harmônicas distintas resulta em (11).

$$\frac{1}{T} \int_0^T v_m(t) i_n(t) dt \begin{cases} = 0 & \text{para } m \neq n \\ \neq 0 & \text{para } m = n \end{cases} \quad (11)$$

A demonstração analítica de (11) está relacionada ao fato de que o valor da integral do produto de duas funções senoidais, de frequências harmônicas distintas, é sempre igual a zero para um período completo da frequência fundamental. Assim, (10)

pode ser reescrita resultando em (12).

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} \frac{1}{T} \int_0^T v_h(t) i_h(t) dt \quad (12)$$

De acordo com (11), é possível observar na Fig. 1 que as componentes  $p(t)$  e  $p_1(t)$  possuem um valor médio maior que zero. O mesmo pode ser observado na Fig. 2, quando se considera a componente de potência instantânea  $p_h(t)$ . Entretanto, neste caso, fundamentalmente por causa das componentes  $v_3(t)i_3(t)$  e  $v_5(t)i_5(t)$ , a componente  $p_h(t)$  apresenta um valor médio negativo, indicando que o fluxo de potência associado as componentes harmônicas está no sentido da carga para a fonte, ou seja, em direção oposta ao fluxo relacionado a  $p(t)$  e  $p_1(t)$ . Isso se deve ao fato de que o exemplo numérico apresentado representa uma carga não linear, de tal forma que parte da potência total entregue à carga é devolvida ao sistema na forma de potência harmônica.

Finalmente, como uma consequência direta de (11) e (12), o valor médio de  $p_1(t)$  representa a magnitude da potência ativa fundamental ( $P_1$ ), expressa em watts (W). Os valores médios de  $p_{v1ih}(t)$  e  $p_{vhi1}(t)$  são ambos iguais a zero e o valor médio de  $p_h(t)$  representa a potência ativa harmônica ( $P_h$ ), também expressa em watts. Na Tabela I, são apresentados os resultados teóricos obtidos para o exemplo numérico apresentado.

TABELA I  
RESULTADOS TEÓRICOS OBTIDOS PARA O EXEMPLO NUMÉRICO

Componente da potência instantânea	Valor médio
$v_1(t) \times i_1(t)$	1.017,66 W
$v_1(t) \times i_3(t)$	0,0
$v_1(t) \times i_5(t)$	0,0
$v_3(t) \times i_1(t)$	0,0
$v_3(t) \times i_3(t)$	-8,49 W
$v_3(t) \times i_5(t)$	0,0
$v_5(t) \times i_1(t)$	0,0
$v_5(t) \times i_3(t)$	0,0
$v_5(t) \times i_5(t)$	-27,53 W
$P = \sum_{m=1}^5 \sum_{n=1}^5 \frac{1}{T} \int_0^T v_m(t) i_n(t) dt$	981,64 W

Os resultados teóricos, apresentados na Tabela I, foram comparados aos resultados obtidos em testes laboratoriais, onde os mesmos sinais de tensão e de corrente do exemplo numérico foram considerados. Assim, estes sinais foram gerados através de uma fonte de potência programável modelo CMC 256 Plus, fabricada pela Omicron Electronics Corp. e medidos por um wattímetro de precisão modelo IT9121, fabricado pela ITECH Electronic Corp. Ambos os equipamentos utilizados, fonte programável e wattímetro de precisão, foram previamente calibrados e certificados por um laboratório credenciado.

Na Fig. 5 é apresentado o arranjo laboratorial utilizado para realizar os testes, cujo o propósito é a validação dos resultados teóricos obtidos para o exemplo numérico considerado.

Na Tabela II são apresentados os resultados obtidos, onde se pode comparar os valores teóricos e os valores medidos.

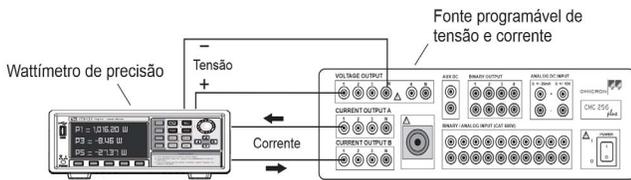


Fig. 5. Estrutura laboratorial para validação dos resultados teóricos.

TABELA II  
RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES LABORATORIAIS

Componente da potência ativa	Valor teórico	Leitura do wattímetro	Desvio verificado
$P_1$	1.017,66 W	1.016,20 W	- 0,143 %
$P_3$	-8,49 W	-8,46 W	- 0,353 %
$P_5$	-27,53 W	-27,37 W	- 0,581 %
<b><math>P</math></b>	<b>981,64 W</b>	<b>980,77 W</b>	<b>- 0,089 %</b>

Os resultados apresentados na Tabela II mostram que, considerando-se os registros obtidos pelo wattímetro de precisão, quando da medição da potência ativa de diferentes frequências harmônicas, a comparação entre os valores teóricos e as leituras do wattímetro apresentam baixos desvios em termos percentuais. Estes resultados validam a abordagem analítica apresentada nesta seção.

No entanto, a medição de energia ativa, para fins de faturamento, é realizada, em todo o mundo, utilizando-se dispositivos de medição com uma topologia relativamente simples, sendo que não se conhece como cada um desses medidores trata, intrinsecamente, as parcelas de potência com frequências múltiplas da frequência fundamental. É comum que os laboratórios tradicionais de calibração de medidores não considerem as distorções harmônicas nos procedimentos de calibração, para certificação dos medidores. Assim sendo, a próxima seção mostra alguns resultados de testes laboratoriais, considerando diferentes sinais de tensão e de corrente aplicados a nove diferentes medidores de energia elétrica monofásicos.

### III. TESTES LABORATORIAIS

A fim de preservar a identidade dos fabricantes, os medidores considerados nos testes laboratoriais foram representados por letras e números. Assim, as letras representam o fabricante, enquanto que os números indicam o modelo do medidor. Dos nove modelos de medidores, os dois primeiros, A.1 e A.2, são do tipo eletromecânicos e os demais, A.3, B.1, B.2, B.3, C.1, D.1 e E.1, são eletrônicos.

O arranjo laboratorial utilizado para realizar os testes de calibração dos medidores, sob condições distorcidas, está apresentado na Fig. 6. Todos os equipamentos utilizados nos testes laboratoriais foram previamente calibrados e certificados por um laboratório de acreditação e certificação. A faixa de precisão do conjunto completo é de  $\pm 0,25\%$  na geração e medição de potência ativa.

O arranjo laboratorial apresentado na Fig. 6 consiste em uma fonte programável (tensão e corrente), modelo CMC 256 Plus fabricada pela Omicron Electronics Corp, um leitor de pulsos e mancha de disco, fabricado pela Nansen S.A., e um conversor de pulsos. Este leitor de pulsos e mancha de disco possui um sensor óptico que é capaz de detectar a passagem da mancha no

disco rotativo de medidores do tipo eletromecânico ou captar os pulsos luminosos emitidos pelos LEDs presentes nos medidores eletrônicos. O conversor de pulsos foi desenvolvido especificamente para realizar o processamento dos sinais emitidos pelo leitor de pulsos e mancha de disco, permitindo assim, a visualização da potência ativa registrada pelo medidor em teste.

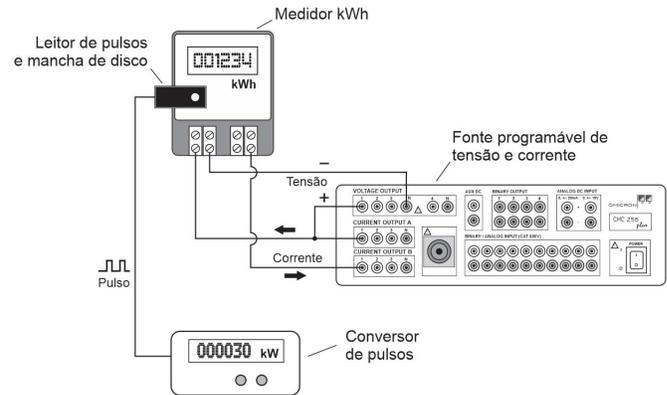


Fig. 6. Estrutura laboratorial utilizada para realização dos testes de calibração nos medidores.

O desvio de medição ( $\xi$ ) verificado em cada teste foi calculado de acordo com (13), considerando duas referências distintas ( $P_{ref}$ ): a potência ativa fundamental ( $P_1$ ) e a potência ativa total ( $P$ ), calculada de acordo com (10) em termos de valores eficazes.

$$\xi = \left( \frac{P_{med} - P_{ref}}{P_{ref}} \right) \times 100 \quad (13)$$

Sendo,  $P_{med}$  a potência ativa medida e  $P_{ref}$  a potência ativa de referência.

O primeiro teste considera somente tensões e correntes puramente senoidais com fator de potência unitário. Os resultados obtidos neste teste são mostrados na Fig. 7.

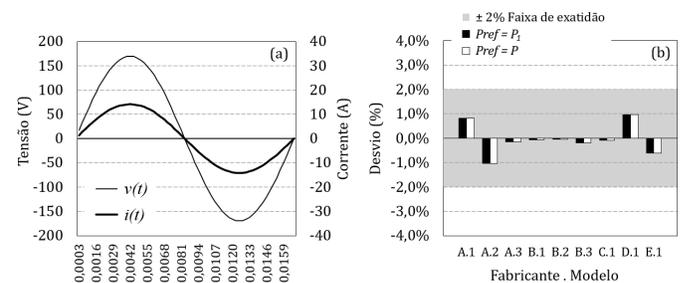


Fig. 7. Teste 1 – Tensões e correntes puramente senoidais e fator de potência unitário. (a) formas de onda da tensão e da corrente, (b) desvios verificados.

Como pode ser visto na Fig. 7, considerando apenas a tensão e a corrente na frequência fundamental, todos os medidores testados apresentaram desvios dentro de suas faixas de exatidão ( $\pm 2\%$ ). Os dados associados as formas de onda de todos os testes aqui realizados estão presentes no Apêndice A. Já os resultados numéricos para os desvios de medição verificados

em todos os testes realizados estão na Apêndice B.

Com o intuito de verificar a conformidade de (11) com os resultados práticos verificados nos testes de calibração, os próximos três testes consideram tensões e correntes distorcidas com diferentes ordens harmônicas, mantendo as mesmas magnitudes para a tensão e a corrente na frequência fundamental. O teste indicado na Fig. 8(a) considera uma tensão distorcida, com 10% de quinta ordem harmônica e uma corrente puramente senoidal.

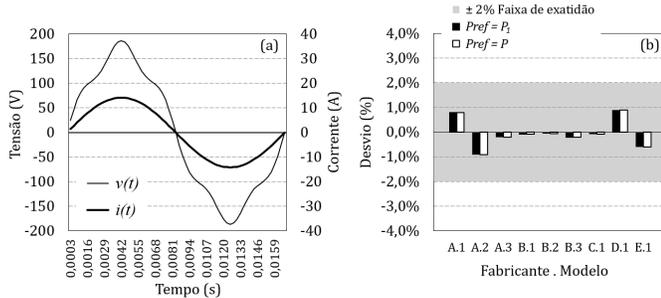


Fig. 8. Teste 2 – Tensão distorcida e corrente senoidal com fator de potência unitário. (a) formas de onda da tensão e da corrente, (b) desvios verificados.

Da mesma forma, o teste apresentado na Fig. 9 considera uma tensão senoidal e uma corrente distorcida com 50% de quinta ordem harmônica. Já o teste apresentado na Fig. 10, considera a tensão e a corrente distorcidas, porém, com ordens harmônicas distintas.

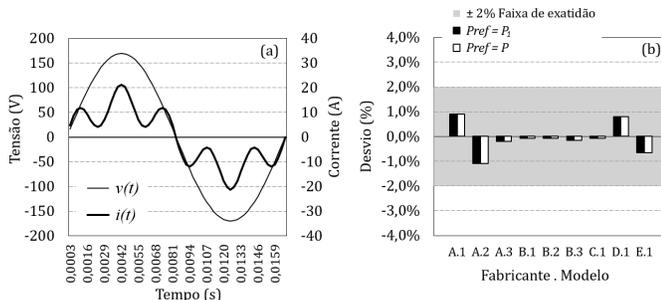


Fig. 9. Teste 3 – Tensão senoidal e corrente distorcida com fator de potência unitário. (a) formas de onda da tensão e da corrente, (b) desvios verificados.

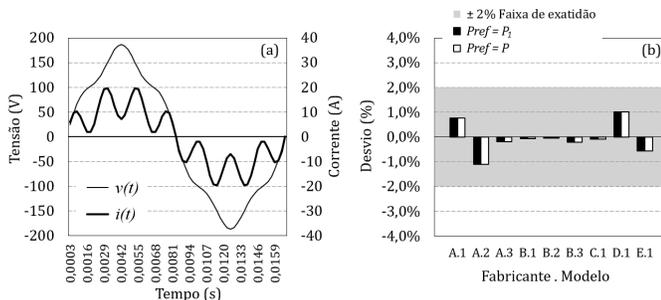


Fig. 10. Teste 4 – Tensão e corrente distorcidas com diferentes ordens harmônicas e fator de potência unitário. (a) formas de onda da tensão e da corrente, (b) desvios verificados.

Conforme observado nas Figs. 8(b), 9(b) e 10(b), os resultados obtidos são semelhantes (ambos dentro da faixa de exatidão dos medidores) àqueles resultados apresentados na Fig. 7(b). Isso indica que os medidores seguem, de fato, a formulação analítica apresentada no tópico anterior, incluindo

o significado físico e matemático de (11), a partir do qual a multiplicação cruzada de tensões e correntes com diferentes ordens harmônicas não resulta no aumento (ou diminuição) da potência ativa resultante.

Os próximos testes foram realizados com o objetivo de verificar a influência do sentido do fluxo de potência harmônica na medição da potência ativa. Nesses casos, tanto a tensão quanto a corrente possuem harmônicos de mesma ordem. Assim, o Teste 5 apresentado na Fig. 11, considera as formas de onda de tensão e de corrente com amplitudes de 10% e 50% de quinta ordem harmônica (com base na frequência fundamental), respectivamente, e a potência harmônica fluindo no sentido da fonte para a carga.

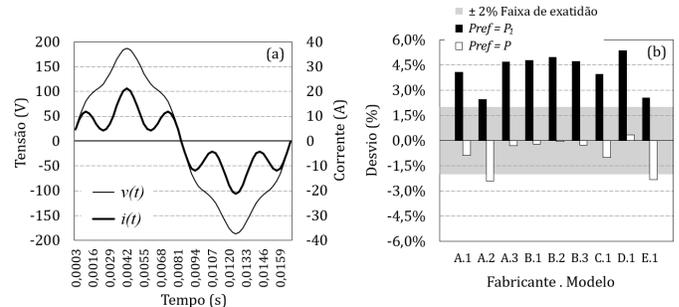


Fig. 11. Teste 5 – Tensão e corrente distorcidas com as mesmas ordens harmônicas (5ª), fator de potência unitário e com o fluxo de potência harmônica ativa no sentido da fonte para a carga. (a) formas de onda da tensão e da corrente, (b) desvios verificados.

Os resultados indicados na Fig. 11(b) mostram que todos os medidores testados registraram potências superiores a potência ativa fundamental ( $P_1$ ), conforme proposto pela IEEE Std. 1459 [2]. Além disso, mesmo considerando a potência ativa teórica (incluindo as componentes harmônicas) como referência, dois medidores (A.2 e E.1) apresentaram desvios superiores aos seus limites de exatidão. Esse fato sugere que esses medidores não foram desenvolvidos para medir a potência ativa sob condições de tensão e corrente distorcidas, com o mesmo nível de exatidão apresentado para frequência fundamental.

Na Fig. 12 são apresentados os resultados obtidos considerando as mesmas distorções harmônicas, tanto de tensão quanto de corrente, do teste anterior (em termos de amplitude), mas desta vez com a potência harmônica fluindo no sentido da carga para a fonte, devido ao atraso de  $180^\circ$  aplicado no fasor da corrente de 5ª ordem harmônica.

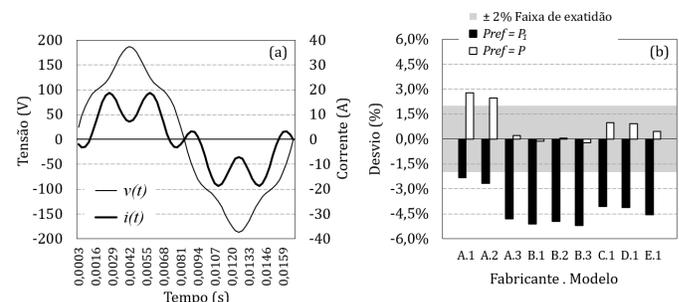


Fig. 12. Teste 6 – Tensão e corrente distorcidas com as mesmas ordens harmônicas (5ª), fator de potência unitário e com o fluxo de potência harmônica ativa no sentido da carga para a fonte. (a) formas de onda da tensão e da corrente, (b) desvios verificados.

Da mesma forma como visto na Fig. 11(b), os resultados indicados na Fig. 12(b) mostram, mais uma vez, que todos os medidores testados apresentaram desvios de medição que violaram sua faixa de exatidão, quando considerado como referência a potência ativa fundamental ( $P_I$ ). Considerando agora a potência ativa teórica ( $P$ ) como referência, dois medidores (A.1 e A.2) apresentaram desvios superiores à sua faixa de exatidão.

Os próximos dois testes (Figs. 13 e 14) são semelhantes àqueles das Figs. 11 e 12, respectivamente, em que apenas as frequências harmônicas de tensão e de corrente foram alteradas, da quinta para a sétima ordem harmônica.

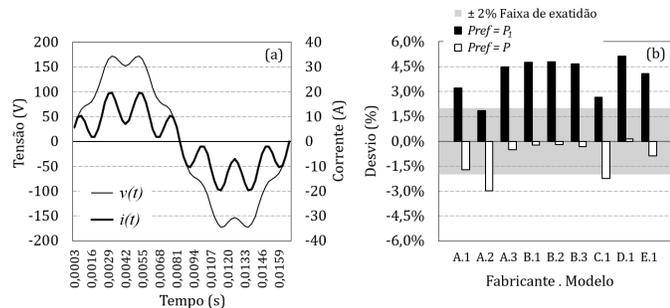


Fig. 13. Teste 7 – Tensão e corrente distorcidas com as mesmas ordens harmônicas (7ª), fator de potência unitário e com o fluxo de potência harmônica ativa no sentido da fonte para a carga. (a) formas de onda da tensão e da corrente, (b) desvios verificados.

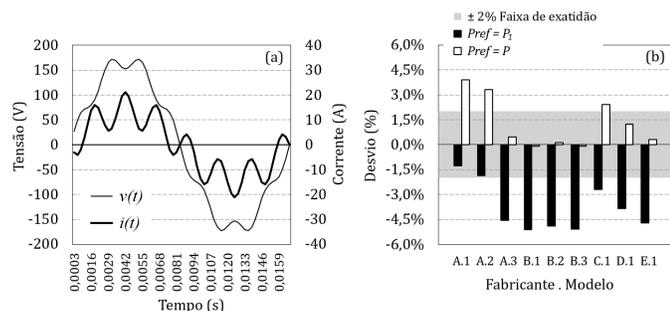


Fig. 14. Teste 8 – Tensão e corrente distorcidas com as mesmas ordens harmônicas (7ª), fator de potência unitário e com o fluxo de potência harmônica ativa no sentido da carga para a fonte. (a) formas de onda da tensão e da corrente, (b) desvios verificados.

Considerando a potência ativa teórica ( $P$ ) como referência, e a presença de frequências harmônicas nas formas de onda de tensão e de corrente, o medidor A.2 violou os limiares de exatidão em todos os testes realizados até o momento. Ao mesmo tempo, em quatro (A.1, A.2, C.1 e E.1) dos nove medidores testados (44,4%), o desvio de medição apresentou-se fora da faixa de exatidão em pelo menos um dos testes realizados. No caso em particular do Teste 8, apresentado na Fig. 14, três medidores violaram a faixa de exatidão quando se considera a potência ativa teórica ( $P$ ) como referência.

O Teste 9, apresentado na Fig. 15, considera a presença de duas frequências harmônicas diferentes (3ª e 5ª) nos sinais de tensão e de corrente e fator de potência na frequência fundamental igual a 0,85 atrasado. Em ambas as frequências, a potência harmônica está fluindo no sentido da carga para a fonte. Como visto na Fig. 15(b), considerando a referência

como sendo a potência ativa teórica ( $P$ ), todos os medidores analisados apresentaram desvios dentro da faixa de exatidão para o Teste 9.

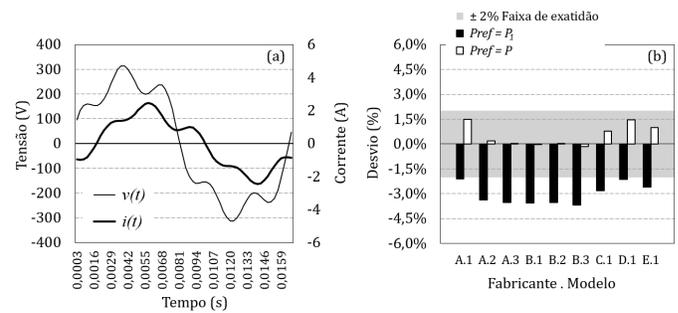


Fig. 15. Teste 9 – Tensão e corrente distorcidas com 3ª e 5ª ordens harmônicas, fator de potência fundamental igual a 0,85 atrasado e com o fluxo de potência harmônica ativa no sentido da carga para a fonte. (a) formas de onda da tensão e da corrente, (b) desvios verificados.

Finalmente, o Teste 10, apresentado na Fig. 16, reproduz um dos testes realizados em [16], nos quais desvios superiores a 500% foram encontrados para os medidores de energia elétrica ativa disponibilizados comercialmente. Esta situação em específico, ocorreu considerando as formas de onda de tensão e de corrente apresentadas na Fig. 16(a). Neste teste, a forma de onda da tensão é composta pelas distorções harmônicas características de sistemas de distribuição em baixa tensão. Já a forma de onda da corrente é o resultado da operação simultânea de diferentes tecnologias de lâmpadas, incluindo lâmpadas LEDs, lâmpadas fluorescentes compactas e lâmpadas incandescentes com *dimmer*.

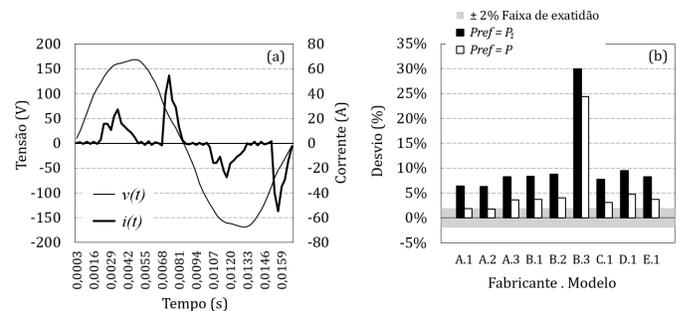


Fig. 16. Teste 10 – Tensão com conteúdo harmônico característico de sistemas de distribuição em baixa tensão e corrente resultante do funcionamento simultânea de diferentes tecnologias de lâmpadas. (a) formas de onda da tensão e da corrente, (b) desvios verificados.

Embora os resultados apresentados na Fig. 16(b) estejam longe dos resultados apresentados em [16], neste teste todos os medidores (com apenas duas exceções) apresentaram desvios de medição superiores a faixa de exatidão. No pior dos casos, verificado para o medidor B.3, foi constatado um desvio de quase 25% quando se considera a potência ativa teórica ( $P$ ) como referência. Vale salientar que os testes apresentados em [16], foram realizados sem nenhum rigor metrológico, pois, utilizaram-se lâmpadas e a própria tensão da rede da distribuidora local, conduzindo a resultados imprecisos. Já os testes aqui apresentados, foram realizados com todo o rigor metrológico necessário, incluindo a utilização de fonte programável de tensão e de corrente devidamente calibrada.

Os resultados apresentados sugerem que cada fabricante implementa seus protocolos de medição de diferentes maneiras, uma vez que não existe um protocolo padronizado para a medição de energia elétrica ativa em condições não senoidais. Os desvios de medição apurados entre os diversos medidores analisados, quando submetidos aos mesmos sinais de tensão e de corrente distorcidos, evidenciam a total falta de isonomia verificada atualmente nos processos de medição e faturamento de energia elétrica ativa em todo o mundo.

#### IV. CONCLUSÕES

Mais de um século após a publicação dos primeiros estudos sobre o assunto, a falta de isonomia na medição de energia elétrica ativa em condições distorcidas permanece até o presente momento sem uma padronização específica. Os resultados dos testes realizados neste trabalho mostraram que os medidores, de diferentes fabricantes e modelos, apresentaram resultados distintos (e fora da faixa de exatidão) quando submetidos a um mesmo sinal de tensão e corrente em condições não senoidais. Assim, a faixa de exatidão indicada pelos fabricantes não pode ser levada em consideração quando esses medidores operam sob condições distorcidas de tensão e corrente, como as verificadas no mundo real.

Em um teste específico, no qual considerou-se a tensão com as distorções harmônicas típicas de sistemas de distribuição em baixa tensão e a forma de onda da corrente resultante da operação simultânea de diferentes tecnologias de lâmpadas, verificou-se desvios de medição de aproximadamente 25%.

Outro importante aspecto apresentado neste artigo foi a aderência do significado físico da potência ativa proposto pela IEEE Std. 1459, em condições não senoidais, com os resultados qualitativos apresentados por diferentes medidores de energia ativa.

Por fim, os autores esperam que a revisão apresentada neste artigo, sobre o desempenho de medidores de energia ativa sob condições não senoidais, encoraje mais estudos e contribua para o desenvolvimento de novos padrões de medição de energia elétrica ativa para fins de faturamento.

#### REFERÊNCIAS

- [1] V. L. Hollister, "The induction watt-hour meter", *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 34, nº 6, pp. 1217-1235, Junho 1915.
- [2] IEEE Standard Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions, IEEE Std. 1459-2010, 2010.
- [3] C. Dannatt, "The metering of mercury-arc rectifier supplies and outputs", *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 81, nº 488, pp. 256-267, Agosto 1937.
- [4] C. T. Weller, H. E. Treckell, F. O. Stebbins, "Watt-hour meter performance with power rectifiers", *IEEE Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 59, nº 8, pp. 449-457, Agosto 1940.
- [5] C. A. Keener, M. A. Faucett, M. S. Helm, "Magnetic fields in Watt-hour meters' effects of wave form on the registration of single-phase Watt-Hour Meters", *IEEE Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 60, nº 5, pp. 202-205, Maio 1941.
- [6] A. A. Girgs, T. L. Baldwin, E. B. Makram, H. S. Fortson, "Testing the performance of three-phase induction Watthour meters in the presence of harmonic distortion", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 26, nº 4, pp. 689-695, Julho/Agosto 1990.

- [7] M. M. Saied, "On the accuracy of Watt-hour meters in nonsinusoidal Environment", in *IEEE Industry Applications Conference*, vol. 3, pp. 2219-2225, Outubro 1995.
- [8] A. Ferrero, C. Muscas, "On the Selection of the "Best" Test Waveform for Calibrating Electrical Instruments Under Nonsinusoidal Conditions", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 49, nº 2, pp. 382-387, Abril 2000.
- [9] A. Dán, D. Raisz, "What do and what should digital revenue meters measure on distorted networks?", in *11th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Lake Placid, USA, pp. 283-288, Setembro 2004.
- [10] D. Georgakopoulos, P. S. Wright, "Calibration of energy and power meters under non-sinusoidal conditions", *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 153, nº 6, pp 241-247, Novembro 2006.
- [11] R. Cáceres, R. Correa, P. Ferreyra, E. Cordero, "Study of active electric energy meters behavior of induction and electronic types", in *IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition*, Caracas, Venezuela, pp. 1-6, August 2006.
- [12] D. Georgakopoulos, P. S. Wright, "Exercising the dynamic range of active power meters under nonsinusoidal conditions", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, nº 2, pp. 369-372, Março 2007.
- [13] M. D. Kusljevic, J. J. Tomic, D. P. Marcetic, "Active power measurement algorithm for power system signals under non-sinusoidal conditions and wide-range frequency deviations", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 3, nº 1, pp. 57-65, Janeiro 2009.
- [14] J. Novotny, J. Drapela, D. Topolaneck, "Frequency response of revenue meters in measured active energy", in *17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Belo Horizonte, Brasil, pp. 524-529, Dezembro 2016.
- [15] W. A. Souza, F. P. Marafão, E. V. Liberado, I. S. Diniz, P. J. A. Serni, "Power Quality, Smart Meters and Additional Information from Different Power Terms", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, nº 1, pp. 158-165, Janeiro 2015.
- [16] F. Leferink, C. Keyer, A. Melentjev, "Static energy meter errors caused by conducted electromagnetic interference", *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 5, nº 4, pp. 49-55, 2016.
- [17] G. Miyasaka, E. T. Silvério, G. L. Xavier, H. R. J. da Silva, L. L. Braz, R. F. B. Oliveira, R. N. C. Lima, J. R. Macedo Jr, "Analysis of Reactive Energy Measurement Methods Under Non-Sinusoidal Conditions", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, nº 10, pp. 2521-2529, Outubro 2018.
- [18] A. E. Emanuel, *Power definitions and the physical mechanism of power flow*, IEEE Press, John Wiley & Sons, 1ª edição, 2010.



**Guilherme Leal Xavier**, nascido em 20 de agosto de 1983, em Serra do Salitre - MG, é engenheiro eletricitista (2007) e mestre (2012) pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e professor assistente na Universidade Federal de Viçosa (UFV), *campus* Rio Paranaíba. Atualmente, cursa doutorado na UFU e atua como pesquisador no Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADEE). Tem como áreas de interesse: protocolos de

medição dos parâmetros da QEE, medição de energia elétrica e fluxo harmônico.



**José Rubens Macedo Junior**, possui graduação em engenharia elétrica pela UFU (1997), mestrado pela mesma instituição (2002) e doutorado pela Universidade Federal do Espírito Santo (2009). Pós-doutorado no *Worcester Polytechnic Institute*, Massachusetts, EUA (2015). É *Senior Member* do IEEE desde 2007. Áreas de interesse: definição de potência elétrica, medição de energia elétrica e Qualidade da energia elétrica. Atualmente é professor na UFU e pesquisador no LADEE.



**Raphael Ferreira Barata de Oliveira**, nascido em 16/05/1991 em Uberaba, é engenheiro eletricitista (2014) pela Universidade do Alabama em Huntsville. Atualmente aluno da UFU para validação de diploma obtido no exterior. Atua como pesquisador no LADEE. Áreas de interesse: qualidade da energia elétrica e acionamentos elétricos.



**Lincoln Tárσιο Silva Oliveira**, nascido em 7 de agosto de 1997 em Gurinhatã - MG, é aluno de graduação em engenharia elétrica na Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é aluno de iniciação científica no Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADEE). Tem atuado preferencialmente nos seguintes temas: medição de energia elétrica, análise harmônica.



**Isaque Nogueira Gondim**, nascido em Araporã - MG, Brasil, graduou-se (2017) e obteve o título de Doutor (2012) em Engenharia. Fez pós-doutorado em 2013 na Engenharia Biomédica na UFU. Atualmente trabalha como professor adjunto e pesquisador no LADEE. Tem atuado preferencialmente nos seguintes temas: qualidade da energia elétrica, ressarcimento de danos e modelagem computacional de dispositivos e sistemas elétricos.

APÊNDICE A - DADOS ASSOCIADOS AOS TESTES REALIZADOS

Teste	Ordem Harmônica	Tensão eficaz (V)	Ângulo (graus)	Corrente eficaz (A)	Ângulo (graus)
1	1	120,0	0,0	10,0	0,0
2	1	120,0	0,0	10,0	0,0
	5	12,0	0,0	-	-
3	1	120,0	0,0	10,0	0,0
	5	-	-	5,0	0,0
4	1	120,0	0,0	10,0	0,0
	5	12,0	0,0	-	-
	7	-	-	5,0	0,0
5	1	120,0	0,0	10,0	0,0
	5	12,0	0,0	5,0	0,0
6	1	120,0	0,0	10,0	0,0
	5	12,0	0,0	5,0	180,0
7	1	120,0	0,0	10,0	0,0
	7	12,0	0,0	5,0	0,0
8	1	120,0	0,0	10,0	0,0
	7	12,0	0,0	5,0	180,0
9	1	120,0	0,0	10,0	-32,0
	3	12,0	10,0	1,0	145,0
	5	24,0	45,0	2,0	170,0
10	1	120,0	0,0	10,0	329,4
	3	1,380	166,8	8,416	292,8
	5	4,656	217,8	6,995	29,4
	7	0,780	272,3	5,313	36,5
	9	0,648	235,5	3,694	92,0
	11	0,804	50,0	2,618	141,1
	13	0,573	66,8	2,566	199,1
	15	0,030	325,8	0,792	310,7
	17	0,134	217,1	2,587	315,8
	19	0,076	189,9	1,031	63,9
	21	0,031	11,8	2,249	71,6
	23	0,028	241,3	0,726	147,9
	25	0,045	178,1	1,468	185,2
	27	0,003	180,3	0,864	260,6

APÊNDICE B - RESULTADOS NUMÉRICOS DOS TESTES REALIZADOS

Teste	Medidor	Referência		P Med. (W)	Desvio (%)	
		P1 (W)	P (W)		Pref = P1	Pref = P
1	A.1	1200,0	1200,0	1209,89	0,82%	0,82%
	A.2	1200,0	1200,0	1187,71	-1,02%	-1,02%
	A.3	1200,0	1200,0	1198,15	-0,15%	-0,15%
	B.1	1200,0	1200,0	1199,16	-0,07%	-0,07%
	B.2	1200,0	1200,0	1199,38	-0,05%	-0,05%
	B.3	1200,0	1200,0	1197,67	-0,19%	-0,19%
	C.1	1200,0	1200,0	1199,07	-0,08%	-0,08%
	D.1	1200,0	1200,0	1211,58	0,96%	0,96%
	E.1	1200,0	1200,0	1192,62	-0,62%	-0,62%
2	A.1	1200,0	1200,0	1190,40	0,80%	0,80%
	A.2	1200,0	1200,0	1210,82	-0,90%	-0,90%
	A.3	1200,0	1200,0	1202,40	-0,20%	-0,20%
	B.1	1200,0	1200,0	1201,08	-0,09%	-0,09%
	B.2	1200,0	1200,0	1200,62	-0,05%	-0,05%
	B.3	1200,0	1200,0	1202,52	-0,21%	-0,21%
	C.1	1200,0	1200,0	1200,93	-0,08%	-0,08%
	D.1	1200,0	1200,0	1189,32	0,89%	0,89%
	E.1	1200,0	1200,0	1207,08	-0,59%	-0,59%
3	A.1	1200,0	1200,0	1189,08	0,91%	0,91%
	A.2	1200,0	1200,0	1213,20	-1,10%	-1,10%
	A.3	1200,0	1200,0	1202,40	-0,20%	-0,20%
	B.1	1200,0	1200,0	1200,84	-0,07%	-0,07%
	B.2	1200,0	1200,0	1200,84	-0,07%	-0,07%
	B.3	1200,0	1200,0	1201,92	-0,16%	-0,16%
	C.1	1200,0	1200,0	1200,93	-0,08%	-0,08%
	D.1	1200,0	1200,0	1190,40	0,80%	0,80%
	E.1	1200,0	1200,0	1207,80	-0,65%	-0,65%
4	A.1	1200,0	1200,0	1190,76	0,77%	0,77%
	A.2	1200,0	1200,0	1213,20	-1,10%	-1,10%
	A.3	1200,0	1200,0	1202,40	-0,20%	-0,20%
	B.1	1200,0	1200,0	1200,84	-0,07%	-0,07%
	B.2	1200,0	1200,0	1200,60	-0,05%	-0,05%
	B.3	1200,0	1200,0	1202,64	-0,22%	-0,22%
	C.1	1200,0	1200,0	1200,93	-0,08%	-0,08%
	D.1	1200,0	1200,0	1187,88	1,01%	1,01%
	E.1	1200,0	1200,0	1206,84	-0,57%	-0,57%
5	A.1	1200,0	1260,0	1249,02	4,09%	-0,87%
	A.2	1200,0	1260,0	1229,47	2,46%	-2,42%
	A.3	1200,0	1260,0	1256,36	4,70%	-0,29%
	B.1	1200,0	1260,0	1257,32	4,78%	-0,21%
	B.2	1200,0	1260,0	1259,48	4,96%	-0,04%
	B.3	1200,0	1260,0	1256,57	4,71%	-0,27%
	C.1	1200,0	1260,0	1247,35	3,95%	-1,00%
	D.1	1200,0	1260,0	1264,34	5,36%	0,34%
	E.1	1200,0	1260,0	1230,64	2,55%	-2,33%
6	A.1	1200,0	1140,0	1171,87	-2,34%	2,80%
	A.2	1200,0	1140,0	1168,07	-2,66%	2,46%
	A.3	1200,0	1140,0	1142,39	-4,80%	0,21%
	B.1	1200,0	1140,0	1138,48	-5,13%	-0,13%
	B.2	1200,0	1140,0	1140,48	-4,96%	0,04%
	B.3	1200,0	1140,0	1137,32	-5,22%	-0,24%
	C.1	1200,0	1140,0	1151,18	-4,07%	0,98%
	D.1	1200,0	1140,0	1150,65	-4,11%	0,93%
	E.1	1200,0	1140,0	1145,25	-4,56%	0,46%
7	A.1	1200,0	1260,0	1238,46	3,21%	-1,71%
	A.2	1200,0	1260,0	1222,26	1,86%	-3,00%
	A.3	1200,0	1260,0	1253,79	4,48%	-0,49%
	B.1	1200,0	1260,0	1256,93	4,74%	-0,24%
	B.2	1200,0	1260,0	1257,64	4,80%	-0,19%
	B.3	1200,0	1260,0	1256,08	4,67%	-0,31%
	C.1	1200,0	1260,0	1231,68	2,64%	-2,25%
	D.1	1200,0	1260,0	1261,63	5,14%	0,13%
	E.1	1200,0	1260,0	1248,96	4,08%	-0,88%
8	A.1	1200,0	1140,0	1184,55	-1,29%	3,91%
	A.2	1200,0	1140,0	1177,63	-1,86%	3,30%
	A.3	1200,0	1140,0	1145,23	-4,56%	0,46%
	B.1	1200,0	1140,0	1138,72	-5,11%	-0,11%
	B.2	1200,0	1140,0	1141,41	-4,88%	0,12%
	B.3	1200,0	1140,0	1138,94	-5,09%	-0,09%
	C.1	1200,0	1140,0	1167,48	-2,71%	2,41%
	D.1	1200,0	1140,0	1153,93	-3,84%	1,22%
	E.1	1200,0	1140,0	1143,54	-4,71%	0,31%
9	A.1	1017,7	981,6	996,23	-2,11%	1,49%
	A.2	1017,7	981,6	983,46	-3,36%	0,19%
	A.3	1017,7	981,6	981,77	-3,53%	0,01%
	B.1	1017,7	981,6	981,49	-3,55%	-0,02%
	B.2	1017,7	981,6	981,71	-3,53%	0,01%
	B.3	1017,7	981,6	980,18	-3,68%	-0,15%
	C.1	1017,7	981,6	989,13	-2,80%	0,76%
	D.1	1017,7	981,6	995,91	-2,14%	1,45%
	E.1	1017,7	981,6	991,25	-2,60%	0,98%
10	A.1	988,9	1033,2	1052,32	6,41%	1,85%
	A.2	988,9	1033,2	1051,58	6,33%	1,78%
	A.3	988,9	1033,2	1070,72	8,27%	3,63%
	B.1	988,9	1033,2	1071,82	8,38%	3,73%
	B.2	988,9	1033,2	1075,40	8,74%	4,08%
	B.3	988,9	1033,2	1285,68	30,01%	24,43%
	C.1	988,9	1033,2	1065,48	7,74%	3,12%
	D.1	988,9	1033,2	1082,78	9,49%	4,80%
	E.1	988,9	1033,2	1071,25	8,32%	3,68%