



## TESTE DE DESEMPENHO DE UM ANALISADOR DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA CLASSE A

G. S. Troncha\*, A. C. Santos, I. N. Santos, C. R. A. Junior

FEELT – Faculdade de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Uberlândia  
NQEE – Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica

**Resumo** – Manter e melhorar os índices da qualidade da energia elétrica nas redes elétricas atuais consiste em uma tarefa complexa e fundamental para refinar seu desempenho. Para tanto, se faz necessária a utilização de ferramentas confiáveis e robustas para mensurar os fenômenos recorrentes nos sistemas elétricos e com isso buscar uma forma de mitigar os problemas. Neste contexto, este artigo técnico objetiva avaliar o analisador de qualidade da energia Fluke 435 série II no que tange à aferição de tensão, corrente e estabelecimento de sincronismo via GPS.

**Palavras-Chave** – Qualidade da energia elétrica, Medição, Sistemas Elétricos, Distorções harmônicas, Desequilíbrios de tensão.

### PERFORMANCE TEST OF ELECTRICAL ENERGY CLASS A QUALITY ANALYZER

**Abstract** - Maintaining and improving electrical power quality indices in today's power grids is a complex and fundamental task to refine its performance. Therefore, it is necessary to use reliable and robust tools to measure the recurring phenomena in the electrical systems and in this way seek a way to mitigate the problems. In this context, this technical article aims to evaluate the Fluke 435 series II power quality analyzer with regards to the calibration of voltage, current and establishment of synchronization via GPS.

**Keywords** – Power quality, Measurement, Electrical Systems, Harmonic Distortions, Voltage imbalances

#### NOMENCLATURA

V1, V2, V3	módulos das tensões.
$\alpha 1, \alpha 2$ e $\alpha 3$	ângulos das tensões ou ângulos das tensões.
Vmed	média aritmética dos módulos das tensões.
$\alpha$ med	média aritmética dos ângulos das tensões.
$\delta V1, \delta V2, \delta V3$	discrepância entre o módulo da tensão.
$\delta \alpha 1, \delta \alpha 2, \delta \alpha 3$	discrepâncias entre o ângulo da tensão.
I1, I2, I3	módulos das correntes.

\*giordannitr.93@gmail.com

### I. INTRODUÇÃO

A intensificação de cargas não lineares no sistema elétrico, sobremaneira, promove a sua modernização e avanços consideráveis quanto ao controle, comunicação, etc. Dentro deste contexto, importante pontuar também, a intensificação de geração por meio de sistemas renováveis, quais sejam, parques eólicos e complexos fotovoltaicos, diversificando a matriz energética e contribuindo para um sistema sustentável. No entanto, em contrapartida, é sabido que tais tecnologias inserem conteúdo harmônico na rede [1], gerando distúrbios na qualidade da energia elétrica do sistema.

Inserido nesse cenário, a demanda por analisadores capazes de mensurar distúrbios de qualidade da energia, de forma confiável e precisa, mostra-se de extrema importância, seja para implementar dispositivos de mitigação harmônica, ou ainda, atuar em cenários de atribuição de responsabilidade sobre distorções harmônicas [2].

Assim, o presente artigo tem por objetivo, avaliar o desempenho do analisador de qualidade *Fluke 435 série II* [3], por meio de quatro ensaios. Os testes foram feitos em diferentes etapas, primeiramente são analisadas medições das grandezas tensão e corrente elétrica com cada medidor operando de maneira individual, em laboratório. Em seguida, investiga-se o desempenho dos instrumentos quando operam em conjunto, com o auxílio de módulos de sincronismo, também em ambiente laboratorial. Por fim, ensaios em campo são conduzidos para finalizar a sequência de testes dos medidores e seus acessórios.

### II. APRESENTAÇÃO DO ANALISADOR DE QUALIDADE DA ENERGIA ENSAIADO

Para composição deste trabalho, foram utilizados três analisadores de qualidade da energia da marca *Fluke*, modelo *435, série II*. Tal modelo de equipamento satisfaz os requisitos de desempenho da norma IEC 61000-4-30 que o permite ser caracterizado como um instrumento classe A.

Dentre algumas peculiaridades do analisador em questão, pode-se citar a captura de dados *PowerWave* (função que possibilita ao usuário capturar sinais de tensão, corrente e frequência simultaneamente, em uma alta velocidade), a verificação da eficiência de conversores, a contabilização de

energia, a quantificação de melhorias diante da instalação de dispositivos de economia de energia, a execução de manutenção preditiva, estudos de carga e análises de longo prazo, além da possibilidade de realizar diagnósticos rápidos no próprio display do equipamento [3].

Os instrumentos permitem obter um completo conjunto de informações correlatas a formas de onda e fasores de tensões e correntes, eventos de VTCD (variações de tensão de curta duração), harmônicos, potência e energia, *flicker*, desequilíbrios, transitórios e *inrush* [1].

### III. ESTRUTURA DE TESTE LABORATORIAL

A estrutura usada para a realização dos testes laboratoriais é constituída por uma fonte de tensão trifásica controlada, da marca *Califórnia Instruments*, modelo CSW5550. Este equipamento é capaz de fornecer uma tensão trifásica controlável, passível de incluir distorções e desequilíbrios na rede. Nos ensaios, optou-se por usar uma tensão trifásica equilibrada de 50 V fase-neutro, com frequência fundamental de 60 Hz, e componentes harmônicas de 2ª, 3ª, 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens, com percentual de 3, 5, 8, 8, 6 e 6, respectivamente, em relação a tensão fundamental.

O sistema implementado consiste em uma fonte alimentando duas cargas, aqui nomeadas como carga 1 e carga 2. A carga 1 é uma resistência trifásica de 6 kW, enquanto a carga 2 é constituída por elementos que procuram representar uma instalação industrial em escala reduzida, seus parâmetros são descritos na Tabela 1.

A Figura 1(a) exhibe a fonte de tensão, os medidores e a carga 1, configuração montada em um laboratório de pesquisa da Universidade Federal de Uberlândia. A Figura 1(b), por sua vez, mostra a carga 2.

Figura 1: (a) Parte da estrutura laboratorial montada (b) Equivalente de uma instalação industrial, em escala reduzida.

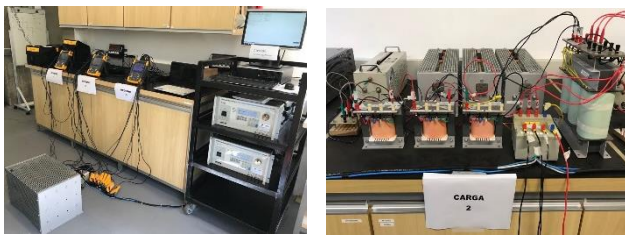


Tabela 1: Parâmetros das cargas 1 e carga 2.

Parâmetro	Resistência 3φ	Indústria 2
$R_{ind}$ (Ω)	0	70
$L_{ind}$ (mH)	0	232
$C_{ind}$ (μF)	0	12
$R_{ret}$ (Ω)	0	260
Potência Ativa (W)	6000	1094,15
Potência Reativa (VAr)	0	369,94
Potência Aparente (VA)	6000	1154,99
Fator de Potência	1	0,95
Potência Transformador(KVA)	---	3

A partir de todo sistema descrito, implementado e parametrizado, realizou-se o estudo de caso descrito a seguir.

## IV. ESTUDOS DE CASOS

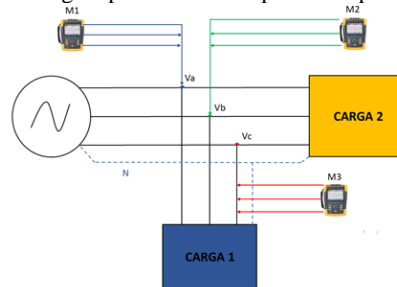
Uma vez apresentada a estrutura completa montada em ambiente laboratorial, na sequência são descritos os testes feitos e discutidos os resultados encontrados, por meio de quatro ensaios realizados.

### A. Ensaios de tensão – Pontas de Prova TLS430

Para análise do comportamento dos equipamentos no que tange à medição da grandeza tensão foi realizado um ensaio conforme mostra o esquema da Figura 2. De acordo com esta figura, as três ponteiros, de cada medidor, foram ligados a um mesmo ponto do circuito elétrico.

Para facilitar as análises subsequentes, cada um dos três medidores recebe uma denominação diferente (M1, M2 e M3).

Figura 2: Montagem para ensaio das pontas de prova de tensão.



Como se observa na figura anterior, as medições de tensão foram feitas no ponto comum de conexão da carga 1 e da carga 2 à fonte de tensão. Para os testes, as três ponteiros de tensão do medidor M1 foram conectadas à fase A, enquanto as três ponteiros de tensão do medidor M2 foram ligadas à fase B e, por fim, as três ponteiros de tensão do medidor M3 foram ligadas à fase C.

Os resultados encontrados após o tratamento dos dados coletados, para tensões de frequência fundamental e harmônicas, são mostrados nas Tabelas 2 a 4, na seção referente a resultados.

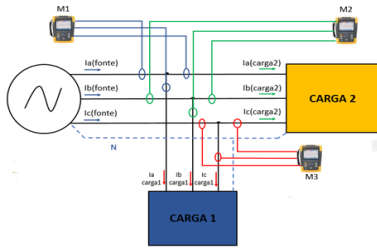
Os valores de discrepâncias de magnitudes de tensão são expostos em volts e em percentuais da tensão média medida. No que se refere aos ângulos, os percentuais de discrepâncias foram tratados na base de 180°, ou seja, o maior erro possível (100% de erro) é aquele em que há uma inversão completa do fasor. Neste aspecto, o maior erro percentual encontrado foi de 1,32%, na 2ª ordem harmônica do medidor M3.

Por fim, pode-se afirmar que estes valores de discrepâncias se encontram dentro de patamares aceitáveis para determinações seguras das grandezas aferidas.

### B. Ensaios de corrente – Pinças Amperimétricas AC/DC i30S

Avançando para a verificação da consistência da medição da grandeza corrente elétrica, a Figura 3 apresenta a estratégia adotada para o ensaio.

Figura 3: Montagem para o ensaio das pinças amperimétricas.



Na figura anterior percebe-se que M1 teve todas as suas pinças amperimétricas conectadas à fase A do arranjo, mas dispostas de maneira a medir correntes em pontos diferentes, assim como M2 foi conectado na fase B e M3 na fase C. Em outras palavras, uma pinça foi conectada ao ramo que liga a fonte ao ponto comum de alimentação das cargas (para medir a corrente total que sai da fonte), uma segunda pinça foi conectada ao ramo que liga o ponto comum à carga 1 (para medir a corrente com sentido entrando na carga 1) e, finalmente, a última pinça foi conectada ao ramo que liga o ponto comum à carga 2 (para medir a corrente com sentido entrando da carga 2).

É evidente, levando em consideração a Lei de *Kirchhoff* das correntes, que ao analisar o ponto comum de alimentação das cargas, a corrente que sai da fonte deve ser igual ao somatório das correntes que fluem para as cargas 1 e 2. Em outras palavras, a diferença entre a corrente que sai da fonte e a soma das correntes que entram nas cargas 1 e 2 deve ser muito próxima de zero. Esta situação é mostrada nas Tabelas 5 a 7, na seção de resultados, onde os valores absolutos de discrepância são dados em Amperes e também em percentual. Nesta última situação, tem-se que o valor percentual é determinado a partir da comparação deste com o valor total de corrente (de mesma ordem harmônica) advinda da fonte de tensão, ou seja, adotou-se a corrente  $I_1$ , em cada ordem harmônica, como sendo  $1pu$ .

Observa-se, em todos os medidores e em praticamente todas as frequências analisadas, resultados absolutos muito próximos de zero. Em termos percentuais, as maiores discrepâncias são encontradas nas correntes harmônicas de ordem 3 (nos três medidores: M1, M2 e M3). Isto é de fácil compreensão, haja vista o fato de que esta corrente (3ª harmônica) foi a que apresentou menores magnitudes nos ensaios realizados, o que é, por sua vez, fundamentado na razão que a 3ª harmônica, ora medida, possui forte característica de ser sequência zero.

Diante desta observação feita, um ensaio adicional foi realizado exclusivamente para avaliação dos harmônicos de 3ª ordem. Os resultados estão apresentados na Tabela 8, na seção de resultados. Neste ensaio adicional foram impostos harmônicos de 3ª ordem em um circuito desequilibrado, garantindo-se, assim, que as correntes desta referida ordem fossem mais significativas, pois não se trata, neste caso, de harmônicos de sequência zero.

Para tal ensaio, os percentuais de harmônicos, bem como o circuito de conexão (parâmetros das cargas) foram mantidos conforme já apresentados na seção 2, a única alteração ocorreu em termos da magnitude da tensão fundamental, a qual foi feita inserindo-se um desequilíbrio de tensão de aproximadamente 8% na fonte controlada do laboratório [4-6]. Portanto, verifica-se, a partir dos resultados obtidos, que os equipamentos de medição, na 3ª ordem harmônica, também se

apresentam adequados, a maior discrepância (2,75%) ocorreu justamente onde houve a menor magnitude de corrente de 3ª ordem medida. Mais uma vez, verifica-se que os equipamentos se apresentam bem coerentes neste quesito de avaliação.

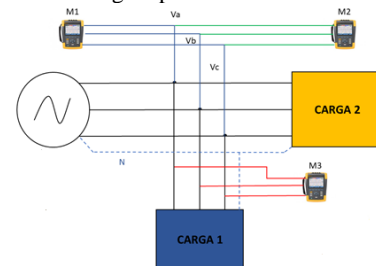
### C. Avaliação do Sistema de Sincronismo – GPS430

Uma vez confirmada a coerência dos equipamentos adquiridos no processo de medição de tensões e correntes de forma individual, esta seção se preocupa em avaliar o desempenho destes equipamentos operando de forma simultânea.

O módulo de sincronização GPS 430-II garante que o tempo de incerteza do analisador de qualidade da energia *Fluke 430 II* não exceda  $\pm 20ms$  para sinais de 50/60 Hz de acordo com a IEC 61000-4-30.

Para fins dos testes previstos neste artigo técnico, a avaliação do sincronismo consistiu simplesmente em ligar os medidores aos respectivos módulos de sincronismo e conectá-los ao mesmo sistema elétrico usado nos itens anteriores, porém agora seguindo o padrão de ligação mostrado na Figura 4 [2].

Figura 4: Montagem para os testes de sincronismo.



Como se nota na figura anterior, M1, M2 e M3 tiveram cada uma de suas ponteiros de tensão conectadas em uma das fases do ponto comum de alimentação das cargas. Desta maneira, na fase A do circuito existem três ponteiros, uma de cada medidor. O mesmo acontece para as fases B e C. As Tabelas 9 a 11, na seção de resultados, resumem os dados encontrados neste estudo.

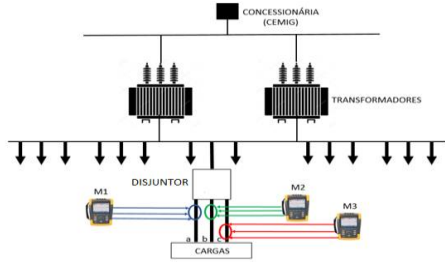
As informações mostradas pelas tabelas revelam grande coerência das medições, sendo que as tensões medidas em uma mesma fase, por medidores diferentes, apresentaram resultados satisfatoriamente próximos.

### D. Ensaios Realizados em Campo – Subestação UFU

Uma vez que os anéis flexíveis de corrente (pinças de corrente I430flex-TF), comumente conhecidos por bobinas de *Rogowski*, não participaram de nenhum ensaio laboratorial devido à baixa potência, utilizou-se uma subestação da UFU, em um sistema com potência consideravelmente maior, para a verificação da funcionalidade deste acessório. O esquema de ligação usado durante os testes é mostrado na Figura 5.

Os três anéis flexíveis de um mesmo medidor foram conectados de maneira a medir correntes no mesmo ponto do sistema elétrico. Assim, de acordo com a figura abaixo, as três pinças de corrente de M1 foram conectadas à fase A, enquanto que M2 foi ligado à fase B e M3 à fase C.

Figura 5: Ligação ensaios em campo em subestação da UFU.



As maiores discrepâncias foram observadas para o medidor M3. Nota-se que 1,67 A (0,91%) foi o distanciamento máximo do módulo da corrente mensurada por uma de suas pinças e o valor médio de suas medições, o que ocorreu na frequência fundamental. Finalmente, o maior ângulo de divergência com relação à média foi de 3,16°, na sétima ordem harmônica, porém nesta ordem a magnitude de corrente se mostrou insignificante o que pode ocasionar compreensíveis discrepâncias na medição.

## V. RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

Nesta seção são apresentados os resultados e algumas implicações obtidas nos estudos de caso e elucidadas nas tabelas que se seguem.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de tensão – Medidor 1 – M1

Medidor M1 - 3 Ponteiras de tensão conectadas à fase A do sistema																			
h	V1 (V)	α1 (graus)	V2 (V)	α2 (graus)	V3 (V)	α3 (graus)	Vmed (V)	αmed (graus)	δV1 (V)	δV2 (V)	δV3 (V)	δα1 (graus)	δα2 (graus)	δα3 (graus)	Maior discrepância da Média				
															V (V)	V (%)	α (graus)	α (%)	Tempo (us)
1	49.900	0,00	49.910	0,00	49.890	0,00	49.900	0,00	0,000	0,010	-0,010	0,00	0,00	0,00	0,010	0,02%	0,00	0,00%	0,00
2	0,998	-9,00	0,998	-11,06	0,998	-9,00	0,998	-9,69	0,000	0,000	0,000	0,69	-1,37	0,69	0,000	0,00%	1,37	0,76%	31,79
3	2,529	-9,04	2,529	-11,06	2,529	-10,96	2,529	-10,35	0,000	0,000	0,000	1,31	-0,71	-0,61	0,000	0,00%	1,31	0,73%	20,27
5	4,010	-16,72	4,010	-16,70	4,010	-16,76	4,010	-16,73	0,000	0,000	0,000	0,01	0,03	-0,03	0,000	0,00%	0,03	0,02%	0,31
7	4,010	-23,98	4,010	-23,92	4,010	-24,04	4,010	-23,98	0,000	0,000	0,000	0,00	0,06	-0,06	0,000	0,00%	0,06	0,03%	0,40
11	3,023	-38,62	3,023	-38,54	3,023	-38,66	3,023	-38,61	0,000	0,000	0,000	-0,01	0,07	-0,05	0,000	0,00%	0,07	0,04%	0,28
13	3,023	-45,80	3,023	-45,72	3,023	-45,84	3,023	-45,79	0,000	0,000	0,000	-0,01	0,07	-0,05	0,000	0,00%	0,07	0,04%	0,24

Tabela 3: Resultados dos ensaios de tensão – Medidor 2 – M2

Medidor M2 - 3 Ponteiras de tensão conectadas à fase B do sistema																			
h	V1 (V)	α1 (graus)	V2 (V)	α2 (graus)	V3 (V)	α3 (graus)	Vmed (V)	αmed (graus)	δV1 (V)	δV2 (V)	δV3 (V)	δα1 (graus)	δα2 (graus)	δα3 (graus)	Maior discrepância da Média				
															V (V)	V (%)	α (graus)	α (%)	Tempo (us)
1	49.900	0,00	49.910	0,00	49.890	0,00	49.900	0,00	0,000	0,010	-0,010	0,00	0,00	0,00	0,010	0,02%	0,00	0,00%	0,00
2	0,998	-9,00	0,998	-11,06	0,998	-9,00	0,998	-9,69	0,000	0,000	0,000	0,69	-1,37	0,69	0,000	0,01%	1,37	0,76%	31,79
3	2,530	-9,04	2,531	-11,06	2,530	-10,96	2,531	-10,35	0,000	0,000	0,000	1,31	-0,71	-0,61	0,000	0,01%	1,31	0,73%	20,27
5	4,013	-16,72	4,014	-16,70	4,013	-16,76	4,013	-16,73	0,000	0,001	0,000	0,01	0,03	-0,03	0,001	0,01%	0,03	0,02%	0,31
7	4,013	-23,98	4,014	-23,92	4,013	-24,04	4,013	-23,98	0,000	0,001	0,000	0,00	0,06	-0,06	0,001	0,01%	0,06	0,03%	0,40
11	3,025	-38,62	3,025	-38,54	3,025	-38,66	3,025	-38,61	0,000	0,000	0,000	-0,01	0,07	-0,05	0,000	0,01%	0,07	0,04%	0,28
13	3,025	-45,80	3,025	-45,72	3,025	-45,84	3,025	-45,79	0,000	0,000	0,000	-0,01	0,07	-0,05	0,000	0,01%	0,07	0,04%	0,24

Tabela 4: Resultados dos ensaios de tensão – Medidor 3 – M3

Medidor M3 - 3 Ponteiras de tensão conectadas à fase C do sistema																			
h	V1 (V)	α1 (graus)	V2 (V)	α2 (graus)	V3 (V)	α3 (graus)	Vmed (V)	αmed (graus)	δV1 (V)	δV2 (V)	δV3 (V)	δα1 (graus)	δα2 (graus)	δα3 (graus)	Maior discrepância da Média				
															V (V)	V (%)	α (graus)	α (%)	Tempo (us)
1	49.900	0,00	49.910	0,00	49.890	0,00	49.900	0,00	0,000	0,010	-0,010	0,00	0,00	0,00	0,010	0,02%	0,00	0,00%	0,00
2	0,988	-5,64	0,988	-9,18	0,988	-5,60	0,988	-6,81	0,000	0,000	0,000	1,17	-2,37	1,21	0,000	0,00%	2,37	1,32%	54,94
3	3,966	-9,20	3,966	-9,18	3,966	-9,18	3,966	-9,19	0,000	0,000	0,000	0,00	0,01	0,01	0,000	0,00%	0,01	0,01%	0,21
5	3,971	-17,02	3,971	-17,02	3,971	-17,00	3,971	-17,01	0,000	0,000	0,000	-0,01	-0,01	0,01	0,000	0,00%	0,01	0,01%	0,12
7	4,011	-24,30	4,011	-24,30	4,011	-24,28	4,011	-24,29	0,000	0,000	0,000	-0,01	-0,01	0,01	0,000	0,00%	0,01	0,01%	0,09
11	2,988	-39,22	2,988	-39,22	2,988	-39,18	2,988	-39,21	0,000	0,000	0,000	-0,01	-0,01	0,03	0,000	0,00%	0,03	0,01%	0,11
13	2,988	-46,32	2,988	-46,30	2,988	-46,26	2,988	-46,29	0,000	0,000	0,000	-0,03	-0,01	0,03	0,000	0,00%	0,03	0,02%	0,12

Tabela 5: Resultados dos ensaios de corrente – Medidor 1 – M1

Medidor M1 - 3 Pinças amperimétricas conectadas à fase A do sistema									
h	Corrente saindo da fonte		Corrente entrando na carga 1		Corrente entrando na carga 2		Î1-Î2-Î3 (Verificação da Lei de Kirchhoff das correntes)		
	I1 (A)	α1 (graus)	I2 (A)	α2 (graus)	I3 (A)	α3 (graus)	Complexo	Módulo	Discrepância <sup>1</sup> (%)
1	7,165	-2,74	5,991	-0,56	1,251	-13,56	-0,0500335496702897+0,00935380599415297i	0,051	0,71%
2	0,467	-2,12	0,355	-6,14	0,117	10,58	-0,00101854696612702-0,000769593134523402i	0,001	0,27%
3	0,014	129,80	0,007	80,58	0,010	158,60	-0,0004760214410719+0,0003690927041466991i	0,001	4,41%
5	0,506	-10,26	0,474	-18,88	0,082	54,10	0,00145952807723398-0,00282533947585931i	0,003	0,63%
7	0,539	-15,68	0,473	-27,06	0,120	37,32	0,00199398638489801-0,0026760437157891i	0,003	0,62%
11	0,455	-25,36	0,356	-43,02	0,160	19,68	0,000555386763708976-0,005623827899814i	0,006	1,24%
13	0,482	-30,50	0,356	-51,12	0,193	12,76	0,00404379624311302-0,00994225315611003i	0,011	2,23%

Tabela 6: Resultados dos ensaios de corrente – Medidor 2 – M2

Medidor M2 - 3 Pinças amperimétricas conectadas à fase B do sistema									
h	Corrente saindo da fonte		Corrente entrando na carga 1		Corrente entrando na carga 2		Î1-Î2-Î3 (Verificação da Lei de Kirchhoff das correntes)		
	I1 (A)	α1 (graus)	I2 (A)	α2 (graus)	I3 (A)	α3 (graus)	Complexo	Módulo	Discrepância <sup>1</sup> (%)
1	7,281	-122,90	6,046	-120,50	1,263	-133,60	-0,0152867438922599+0,0107667313499196i	0,019	0,26%
2	0,135	-243,18	0,120	-247,24	0,018	-216,46	-0,000240610771149202-0,000688301621879009i	0,001	0,54%
3	0,007	-50,76	0,004	-106,12	0,007	-19,36	-0,000534575146615921+0,0006456877943547i	0,001	11,51%
5	0,481	-251,22	0,476	-261,02	0,080	-167,66	-0,00260900368629099+0,00138222331268001i	0,003	0,61%
7	0,539	-137,86	0,495	-148,92	0,113	-75,04	-0,004647938957963+0,00345082627013299i	0,006	1,07%
11	0,457	-266,76	0,351	-288,00	0,177	-222,76	-0,0039196848432305+0,00253387598753602i	0,005	1,02%
13	0,513	-152,86	0,382	-175,10	0,223	-109,62	-0,000708807272462031+0,008435573416127i	0,008	1,65%



Tabela 13: Resultados dos ensaios de campo – Medidor M2

Medidor M2 - 3 Pinças de corrente conectadas à fase B do sistema																			
h	I1 (A)	α1 (graus)	I2 (A)	α2 (graus)	I3 (A)	α3 (graus)	Imed (A)	amed (graus)	δI1 (A)	δI2 (A)	δI3 (A)	δα1 (graus)	δα2 (graus)	δα3 (graus)	Maior discrepância da Média				
															I (A)	V(%)	α (graus)	α (%)	Tempo (us)
1	181.900	113,24	180.500	113,42	183.100	113,00	181.833	113,22	0,067	-1,333	1,267	0,02	0,20	-0,22	1,333	0,73%	0,22	0,12%	10,19
2	2.092	66,28	2,094	65,86	2,106	66,22	2,097	66,12	-0,005	-0,003	0,009	0,16	-0,26	0,10	0,009	0,41%	0,26	0,14%	6,02
3	0,073	171,88	0,073	171,66	0,074	172,28	0,073	171,94	0,000	-0,001	0,001	-0,06	-0,28	0,34	0,001	1,27%	0,34	0,19%	5,25
5	0,002	177,98	0,002	177,90	0,002	178,22	0,002	178,03	0,000	0,000	0,000	-0,05	-0,13	0,19	0,000	1,39%	0,19	0,10%	1,73
7	0,000	230,46	0,000	230,60	0,000	230,50	0,000	230,52	0,000	0,000	0,000	-0,06	0,08	-0,02	0,000	1,63%	0,08	0,04%	0,53
11	0,000	37,10	0,000	36,92	0,000	37,70	0,000	37,24	0,000	0,000	0,000	-0,14	-0,32	0,46	0,000	1,63%	0,46	0,26%	1,94
13	0,000	-7,46	0,000	-7,24	0,000	-7,52	0,000	-7,41	0,000	0,000	0,000	-0,05	0,17	-0,11	0,000	1,63%	0,17	0,09%	0,59

Tabela 14: Resultados dos ensaios de campo – Medidor M3

Medidor M3 - 3 Pinças de corrente conectadas à fase C do sistema																			
h	I1 (A)	α1 (graus)	I2 (A)	α2 (graus)	I3 (A)	α3 (graus)	Imed (A)	amed (graus)	δI1 (A)	δI2 (A)	δI3 (A)	δα1 (graus)	δα2 (graus)	δα3 (graus)	Maior discrepância da Média				
															I (A)	V(%)	α (graus)	α (%)	Tempo (us)
1	184.800	-120,54	181.900	-121,62	182.700	-120,88	183.133	-121,01	1,667	-1,233	-0,433	0,47	-0,61	0,13	1,667	0,91%	0,61	0,34%	28,09
2	2.125	-176,96	2,074	-176,48	2,101	-177,00	2,100	-176,81	0,025	-0,026	0,001	-0,15	0,33	-0,19	0,026	1,25%	0,33	0,19%	7,72
3	0,057	-136,60	0,061	-138,68	0,059	-137,64	0,059	-137,64	-0,002	0,002	0,000	1,04	-1,04	0,00	0,002	3,46%	1,04	0,58%	16,05
5	0,001	36,10	0,002	37,08	0,001	36,46	0,001	36,55	0,000	0,000	0,000	-0,45	0,53	-0,09	0,000	2,93%	0,53	0,30%	4,94
7	0,000	11,06	0,000	5,12	0,000	8,66	0,000	8,28	0,000	0,000	0,000	2,78	-3,16	0,38	0,000	1,77%	3,16	1,76%	20,90
11	0,000	-98,04	0,000	-98,14	0,000	-98,18	0,000	-98,12	0,000	0,000	0,000	0,08	-0,02	-0,06	0,000	1,77%	0,08	0,04%	0,34
13	0,000	-276,02	0,000	-277,52	0,000	-276,64	0,000	-276,73	0,000	0,000	0,000	0,71	-0,79	0,09	0,000	1,21%	0,79	0,44%	2,83

## VI. CONCLUSÃO

Esta seção visa apresentar algumas discussões iniciais acerca dos resultados apresentados nas tabelas expostas na seção anterior. Assim sendo, tem-se que:

No que se refere aos ensaios de aferição de tensão, Tabelas 2 a 4, conclui-se que os medidores se mantiveram coerentes. Dentre os três medidores, M3 apresentou a maior discrepância entre o valor mensurado por uma determinada ponteira e o valor médio das tensões medidas por suas três ponteiras. A discrepância máxima, em termos de módulo da tensão, aconteceu para a frequência fundamental e foi de 0,01 V. Já em termos de ângulo, o distanciamento máximo observado foi de 2,37°, na segunda ordem harmônica, o que corresponde a um tempo de 54,94 μs. É evidente, então, que as divergências encontradas são bastante pequenas e os medidores operam de maneira satisfatória no quesito medição de tensão.

Na avaliação dos alicates de correntes, Tabelas 5 a 7, tem-se que em todas as situações esta equação resultou em um número percentual baixo. Percebe-se, de uma maneira geral, que os maiores erros ocorreram quando as magnitudes de correntes medidas se apresentaram muito pequenos, o que contribui para imprecisões nas medidas elétricas, o que já era esperado. Apesar dos erros constatados, considera-se que as respostas ainda são satisfatórias e confirmam uma boa coerência no processo de mensurar correntes a partir das pinças amperimétricas de M1, M2 e M3.

A tabela de número 8, ilustra os resultados dos medidores no que diz respeito à terceira ordem harmônica em um ambiente desequilibrado. É possível se notar que apesar de o erro ter aumentado, o valor ainda continua irrisório, o que permite confirmar novamente a precisão do equipamento.

Para a avaliação da operação dos equipamentos em conjunto, de forma síncrona, Tabelas 9 a 11, os resultados revelam o sucesso da operação dos medidores simultaneamente. De fato, em termos de módulo da tensão, o maior distanciamento foi observado para a ponteira de prova do medidor M3 conectada à fase A, a qual apresentou 0,032 V (0,80%) de discrepância do módulo da tensão média mensurada nesta fase, para a sétima ordem harmônica. Já em termos de ângulos, nota-se que o máximo distanciamento foi de 0,10° (0,06%) para a ponteira de prova do medidor M1 conectada à fase B, na décima primeira ordem harmônica. Este

ângulo representa, em termos de tempo, 0,42 μs ou, em outras palavras, 0,028% do tempo total de um período de onda com frequência de 660 Hz.

Por fim, os resultados apresentados nas tabelas de 12 a 14, obtidos através de um ensaio em ambiente cuja classe de tensão e corrente é superior, permitiu avaliar as bobinas de Rogowski disponíveis com o medidor. Nota-se que os resultados apresentados evidenciam discrepâncias extremamente pequenas, o que possibilita concluir-se que os anéis flexíveis são absolutamente adequados para tais medições.

De uma forma geral, percebe-se uma boa correlação entre os dados obtidos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao suporte financeiro concedido pelo CNPq, FAPEMIG e Grupo NEOENERGIA.

## REFERÊNCIAS

- [1] R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty, “*Electrical Power Systems Quality*”, McGra-Hill, 2ª Edição, Nova Iorque, 2002.
- [2] J. Arrilaga, N. R. Watson, “*Power system harmonics*”, John Wiley & Sons, 2ª Edição, England, 2004.
- [3] Fluke, “Analisador de Qualidade de Energia Fluke 435 série II”. Disponível em: <<http://www.fluke.com/fluke/brpt/ferramentas-de-qualidade-de-energia/logging-power-meters/fluke-435-series-ii.htm?pid=73939>>. Acesso em: 01 jun. 2018.
- [4] Fluke, “Fluke 434-II/435-II/437-II Analisadores de Qualidade de Potência e Energia Trifásicos – Manual do Usuário”. Disponível em <[http://assets.fluke.com/manuals/F430-II\\_umpor0100.pdf](http://assets.fluke.com/manuals/F430-II_umpor0100.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2018.
- [5] “Descritivo do Produto a Ser Desenvolvido para Aplicação da Metodologia em Instalação em Campo em Baixa Tensão”. Relatório Entrega 5.1 – Projeto de P&D PD-7284-0001/2016.
- [6] “Relatório final do produto a ser desenvolvido para aplicação em instalação em campo em baixa tensão”. Relatório Entregas 5.2 e 5.3– Projeto de P&D PD-7284-0001/2016.