

Comparação de Medidores de Qualidade da Energia Elétrica Quanto à Distorção Harmônica

J. H. D. Souza¹ A.S. Lima¹ C. C. M. M. Carvalho¹ M. E. L. Tostes¹ P. P. C. de Oliveira¹
R. S. Alves¹ C. R. F. Marçal¹ W. S. Tostes¹ J. C. D. Carvalho²

Resumo— *O presente trabalho traz como idéia principal a comparação de instrumentos utilizados em laboratório ou em campo para medir distorções harmônicas na tensão e na corrente. O objetivo é indicar o erro e a incerteza dos instrumentos envolvidos quando comparados entre si e com uma fonte de distúrbios usada como referência, partindo do princípio que uma medida qualquer de uma dada grandeza tem que ser expressa com a declaração do erro e da incerteza associada ao ponto referente à medição.*

Palavras Chaves — **Comparação; Distorção Harmônica Total; Metrologia; Qualidade da Energia Elétrica.**

I. INTRODUÇÃO

Os distúrbios relacionados à má Qualidade da Energia Elétrica (QEE) têm causado grande preocupação em todos os setores que utilizam essa matéria prima em seus processos, pois os mesmos podem causar efeitos indesejáveis ao funcionamento de equipamentos e máquinas utilizados nas indústrias. Na realidade, esses problemas atingem não somente o setor industrial como também o comercial e o residencial.

Esse fato tem impulsionado os pesquisadores a estudar os principais distúrbios de QEE a fim de encontrar medidas que diminuam ou até mesmo eliminem os seus efeitos indesejáveis. Para isso, é necessário o uso de analisadores de QEE, registradores de QEE ou qualquer outro instrumento que seja capaz de medir os parâmetros que caracterizam os distúrbios de QEE. Com as medidas levantadas pode-se fazer um relatório sobre a situação da Qualidade da Energia no local onde se realizou o diagnóstico. O passo seguinte é adotar medidas mitigadoras para contornar o problema. No entanto, surgem incertezas acerca das medidas realizadas, uma vez que as mesmas nem sempre são informadas com a indicação do erro e da incerteza associados.

Não há credibilidade em nenhuma medição cujo erro e incerteza não sejam especificados e por esse motivo muitos diagnósticos elétricos realizados em comércios, residências e

indústrias não possuem nenhuma validade metrológica. A questão da segurança também merece ênfase já que uma instalação aparentemente livre de distúrbios elétricos pode vir a ser seriamente comprometida pela ação dos mesmos, podendo ocorrer danos às máquinas e dispositivos ligados à rede elétrica, bem como à própria rede elétrica e até mesmo à vida dos operadores.

Para que uma medida seja confiável, é necessário realizá-la em um instrumento previamente calibrado por um padrão de referência devidamente rastreado. No caso da QEE, raramente essa condição é satisfeita visto que são poucos os laboratórios de calibração no mundo que fazem a calibração de distúrbios na energia elétrica. Neste trabalho será realizada uma comparação entre três instrumentos de diferentes origens e uma fonte de distúrbios elétricos a fim de verificar a disparidade nos resultados de erro e de incerteza associados a cada instrumento quanto à distorção harmônica na tensão e na corrente.

II. DISTRORÇÃO HARMÔNICA NA TENSÃO E NA CORRENTE

A distorção harmônica na forma de onda da tensão e da corrente é caracterizada por ser um distúrbio em regime permanente, sendo normalmente associada com a crescente quantidade de acionamentos estáticos, fontes chaveadas e outros dispositivos eletrônicos nas plantas industriais. Tais perturbações podem normalmente ser eliminadas com a aplicação de filtros de linha (supressores de transitórios).

O modelo matemático mais utilizado para descrever os componentes harmônicos é a Transformada de Fourier, cuja definição é dada por (1), em que cada sinal senoidal que compõe a somatória traz a característica de uma componente harmônica do sinal real [1].

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \text{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right) \quad (1)$$

Os harmônicos podem causar sobretensões devido a ressonância, interferências, aumento da corrente de neutro, erro em medidores residenciais, aumento das perdas em condutores, redução da vida útil em lâmpadas incandescentes e sobredimensionamento de transformadores.

Dessa forma, as medidas feitas para diagnosticar a presença de harmônicos não podem fugir dos padrões metrológicos.

Este trabalho é resultado de um projeto de P&D do Ciclo 2003/2004 da Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. - ELETRONORTE

¹ UFPA/ NESC/ LABQUALI (Laboratório de Qualidade e Eficiência Energética-CT-DEEC) Av. Augusto Corrêa, 1 - Guamá CEP: 66075-110 Belém-PA-Brasil (e-mail: tostes@ufpa.br)

² ELETRONORTE/ LACEN/ CAEL (Laboratório de Calibração de Grandezas Elétricas) Av. Tancredo Neves, s/n. - Terra Firme CEP: 66077-530 Belém-PA-Brasil (e-mail: jclaudio@eln.gov.br)

III. EXPRESSÃO DA INCERTEZA EM UMA MEDIÇÃO

Conforme anteriormente mencionado, para que uma medição tenha sentido completo é necessário que sejam expressos o erro e a incerteza relativos ao ponto de medição. O erro fica bem determinado como mostrado em (2), em que μ é a média aritmética das N medições feitas (3), sendo esse o parâmetro mais aceito para representar um conjunto de medidas.

$$e = \text{Valor medido} - \mu \quad (2)$$

$$\mu = \frac{\sum \text{Valor medido}}{N} \quad (3)$$

Já a incerteza final é o resultado da composição de diversas expressões, as quais caracterizam cada possível fonte de incerteza. As fontes de incerteza são divididas em duas classes: Avaliação Tipo A e Avaliação Tipo B.

A. Avaliação da Incerteza Tipo A [2]

A Avaliação Tipo A é atribuída à incerteza extraída de um conjunto de medidas, recebendo uma distribuição de probabilidade do tipo Normal. A expressão que melhor caracteriza a incerteza Tipo A é conhecida como desvio padrão experimental da média (4).

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) = \sqrt{\frac{s^2(q)}{N}} \quad (4)$$

Em que $s^2(q)$ é a variância relacionada ao conjunto de medições (5), o termo q_j representa a medida j e \bar{q} é a média dos N valores coletados.

$$s^2(q) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (5)$$

B. Avaliação da Incerteza Tipo B [2]

A classificação Tipo B para a incerteza abrange todo tipo de incerteza que não provém de uma série de observações.

Avaliação do Tipo A da incerteza padrão não é necessariamente mais confiável do que as avaliações do Tipo B, pois em muitas situações práticas de medições, onde o número de observações é limitado, os componentes obtidos por avaliação do Tipo B podem ser mais bem conhecidos do que os componentes obtidos de avaliações do Tipo A.

A incerteza Tipo B é devida basicamente aos seguintes aspectos:

- Dados de medições passadas;
- Experiência ou conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos relevantes;
- Especificações do fabricante;

- Dados provenientes de calibração e de outros certificados;
- Incertezas atribuídas a dados de referência provenientes de manuais ou publicações;

A incerteza Tipo B é uma forma de resgatar as medições e calibrações passadas, assim como as características provenientes do manual do instrumento, do certificado de calibração e de qualquer outro relatório que tenha cunho quantitativo.

C. Incerteza Padrão Combinada [3]

A incerteza padrão combinada é um parâmetro que resulta da combinação de todas as componentes de incerteza. Trata-se, então, de um número representativo que traz a característica de cada componente de incerteza seja ela do Tipo A ou do Tipo B.

A incerteza padronizada combinada (u_c) é a raiz quadrada positiva da variância combinada (u_j), calculada por (6):

$$u_c(y) = \sqrt{\sum u_j^2(y)} \quad (6)$$

D. Incerteza Expandida [3]

De posse da incerteza combinada, pode-se calcular a incerteza expandida da medição. Uma vez que para combinar as componentes de incerteza as mesmas tiveram que ser reduzidas à mesma forma (perdendo sua distribuição de probabilidade natural), assim também há de se retirar um fator multiplicativo para que a incerteza possa ser expressa em sua forma expandida. Esse fator multiplicativo é resultado da resposta da *função T de Student* ao número de graus de liberdade efetivos da medição (7) e à probabilidade de abrangência desejada. O termo ν_i representa o grau de liberdade para a incerteza i .

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_j^4(q_i)}{\nu_i}} \quad (7)$$

O fator multiplicativo, denotado por k , é então multiplicado pela Incerteza Padrão Combinada $u_c(y)$, resultando na Incerteza Expandida representada por U (8).

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (8)$$

IV. METODOLOGIA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS [4]

A partir deste ponto serão apresentados os resultados experimentais da comparação entre os medidores assim como a maneira utilizada para obtê-los.

A. Local das Medições

As medições foram realizadas no Laboratório de Calibração de Grandezas Elétricas (CAEL), do Centro de Tecnologia da ELETRONORTE, em Belém. Trata-se de uma sala totalmente blindada a fim de diminuir os efeitos eletromagnéticos sobre os pequenos sinais. Além disso, o controle de temperatura e umidade é exercido por duas centrais de ar e monitorado através de termohigrômetros devidamente calibrados.

A sala contém alguns dos melhores Padrões de Energia, Multímetros de Alta Precisão, Fontes e Calibradores, como mostra a Fig. 1.



Fig 1. Sala de calibração de grandezas elétricas

B. Instrumentos Envolvidos

Para realizar as medições foram utilizados três medidores e uma fonte de distúrbios, cujas características são mostradas a seguir:

Equipamento 1 - Registrador

O primeiro instrumento utilizado é um registrador trifásico de qualidade de energia (eventos), que já foi utilizado várias vezes em medições de campo e diagnósticos elétricos. Dentre suas funções está a de medir tensão, corrente, potência ativa, potência reativa, variações momentâneas de tensão e distorção harmônica (objeto deste estudo). Possui “memória de massa”, muito importante para a detecção de eventos aleatórios. Neste experimento utilizou-se a memória de massa do registrador a fim de agilizar o processo e diminuir os erros grosseiros.

Equipamento 2 - Analisador

O segundo instrumento considerado é um analisador de energia cujo principal objetivo é o diagnóstico de sistemas de energia, observando a estabilidade no valor RMS da tensão e da corrente. Tal instrumento foi adquirido a pouco tempo através de um projeto de P&D em parceria entre a UFPA e a ELETRONORTE, sendo, portanto um instrumento de pouco

uso e que supostamente não possui deriva em relação à utilização demasiada. Ele não apresenta memória de massa, mas permite gravar 10 (dez) conjuntos de dados e 10 (dez) telas demonstrativas. Possui, entre outras funções, a capacidade de medir tensão, corrente, potência, desbalanceamento, harmônicos até a 50ª ordem, afundamentos de tensão/corrente, elevações de tensão/corrente e Flickers. Para o experimento proposto utilizou-se a função de “captura de dados” para agilizar o processo de medição.

Equipamento 3 - Comparador de Energia

Diferentemente dos instrumentos já citados, esse medidor não é dedicado às medições de QEE, não apresentando um histórico de medições nesse critério. Na realidade, o comparador de energia tem como função principal a medição de potência e energia. Tal instrumento nunca foi utilizado para efetuar medições em campo, sendo proposto como padrão de laboratório. A única grandeza relacionada com a QEE é a distorção harmônica, que pode ser selecionada através da função que mostra os 32 primeiros harmônicos ou da função que mostra os 64 primeiros harmônicos. O display do instrumento mostra ainda a forma de onda da tensão e da corrente no tempo, na presença de harmônicos. Há a possibilidade também de se visualizar a presença de cada harmônico através do espectro de frequência.

Equipamento 4 - Fonte

Através dessa fonte foram geradas as formas de onda que serviram como parâmetro para as medições dos instrumentos até agora citados. Ela foi considerada como padrão (referência) na comparação descrita, pois sua classe de exatidão é de 150 ppm (o que é melhor do que os demais instrumentos). Esse equipamento pode gerar formas de onda com praticamente todos os distúrbios de QEE conhecidos. Para os harmônicos a fonte suporta configuração até a 99ª ordem, com uma distorção harmônica total correspondendo à soma das componentes harmônicas com a fundamental, de tal maneira que o pico máximo não ultrapasse o fundo de escala da faixa selecionada.

No presente trabalho, a tensão nominal utilizada foi de 120 V RMS na faixa de 23 – 230 V para a tensão, e de 5 A RMS na faixa de 2 – 10 A para a corrente. As amplitudes das harmônicas foram referidas ao valor RMS tanto para a tensão quanto para a corrente. A fonte apresenta uma interface de comando bastante intuitiva, o que se tornou uma vantagem na hora de definir as formas de onda utilizadas. Em seu display percebe-se a forma de onda construída, representada no domínio do tempo ou, se preferir, no domínio da frequência [5].

A Fig. 2 mostra o esquema de medição montado.



Fig 2. Esquema de medição das distorções harmônicas

C. Algoritmo de Aquisição das leituras [6]

O algoritmo para aquisição e tratamento estatístico das medidas se reduz aos seguintes passos:

- a) Coleta de dez leituras de cada instrumento;
- b) Exportação desses valores a uma planilha eletrônica (EXCEL);
- c) Determinação da média aritmética das leituras realizadas para cada instrumento;
- d) Determinação do desvio padrão da média (incerteza tipo A) para o conjunto de leituras de cada instrumento;
- e) Levantamento das demais contribuições de incerteza para os instrumentos;
- f) Determinação da incerteza ligada à resolução do instrumento sob medição;
- g) Determinação da incerteza ligada à resolução do padrão;
- h) Determinação da exatidão do padrão (extraída do certificado);
- i) Determinação dos fatores divisores para cada contribuição de incerteza;
- j) Determinação da incerteza padrão combinada;
- k) Determinação do número de coeficientes de liberdade efetivos a partir do coeficiente de liberdade para cada componente de incerteza;
- l) Consulta à tabela com os parâmetros da distribuição *T de Student*, ocasião em que se admitiu uma probabilidade de abrangência de 95.45% (correspondente a aproximadamente dois desvios padrões da distribuição normal), para a determinação do fator K;

- m) De posse do fator k, determinou-se a incerteza expandida que é o valor final de incerteza considerado.

D. Pontos Escolhidos para a medição

Buscou-se fazer um experimento baseado nos limites expressos por algum laboratório de referência mundial que por sua vez utilizasse os parâmetros impostos pela Norma 61000-3-3 e pela IEEE 519. Nesse sentido, foi feita uma pesquisa aprofundada sobre qual laboratório executava a calibração de medidores de harmônicos. Optou-se por tomar como padrão o NPL (*National Measurement Laboratory*), que já é bastante experiente nesse tipo de calibração e que apresenta parâmetros de calibração referentes ao das normas citadas. Escolheram-se, então, 5 formas de onda para a tensão e 4 formas de onda para a corrente, conforme mostra a Tabela I:

TABELA I
Pontos Escolhidos para Aplicação da Metodologia [7]

Tensão	Corrente
Carga residencial	Classe A
Carga comercial	Classe B
Apartamento	Classe C
Carga Industrial	Classe D
NPL pior Caso	-

Embora a análise de distorção harmônica tenha sido feita para todos as formas de onda citadas na Tabela I, neste trabalho serão apresentados as características e os resultados referentes à forma de onda Classe C para a corrente e à carga de um apartamento para a tensão.

A Figura 3 mostra o perfil da carga de um instrumento Classe C no domínio do tempo.

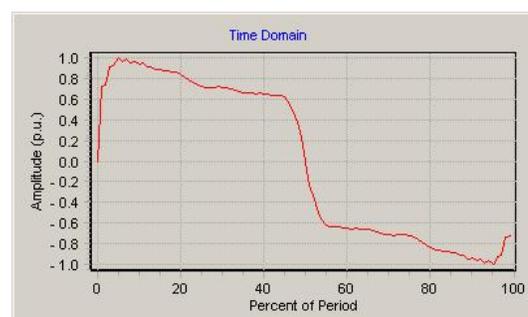


Fig 3. Carga Classe C no domínio do tempo

A classificação Classe C para um instrumento abrange todos os equipamentos luminosos, incluindo os reguladores de intensidade (*dimmers*). Para esses equipamentos os níveis de distorção aceitáveis segundo a Norma IEC 61000-3-2 são descritos pela Fig. 3.

E. Resultados

Para a forma de onda de corrente apresentada os três instrumentos apresentaram disparidade nos resultados mostrados na Fig. 3 quando comparados entre si e com o instrumento tomado como referência (fonte de distúrbios). A Tabela II mostra o resultado de THD (Distorção Harmônica Total) para cada instrumento, o erro em relação à fonte Padrão e a incerteza calculada conforme os procedimentos descritos no item C.

TABELA II
Erro e Incerteza no THDi dos Instrumentos

	THDi% Medido	THDi% Esperado	Erro %	Incerteza %
Equipamento 1	34,867	34,828	0,112	0,027
Equipamento 2	34,763	34,828	-0,186	0,031
Equipamento 3	33,601	34,828	-3,52	0,514

Nota-se que o comparador (equipamento 3) apresentou um erro relativo de aproximadamente 3,52%, o qual é maior que o dos outros dois instrumentos. A incerteza do comparador também foi a maior devido à sua baixa classe de exatidão e à sua incerteza Tipo A, a qual diz respeito aos valores medidos. A Fig. 4 mostra um gráfico de dispersão, o qual revela de forma bastante clara a disparidade do erro e o grande intervalo de incerteza associado ao THDi do comparador para a forma de onda Classe C.

Além do THDi, os resultados para os componentes harmônicos individuais revelou resultados semelhantes aos obtidos. O melhor instrumento para os pontos de corrente foi o Analisador (equipamento 2), que é um instrumento de campo muito pouco utilizado e dedicado a esse tipo de medições.



Figura 4. Gráfico de Dispersão para os resultados

A Figura 5 mostra o erro associado à maior incerteza expandida obtida para cada instrumento, onde é fácil perceber o comportamento dos três instrumentos para todas as componentes harmônicas que compõem a forma de onda Classe C.

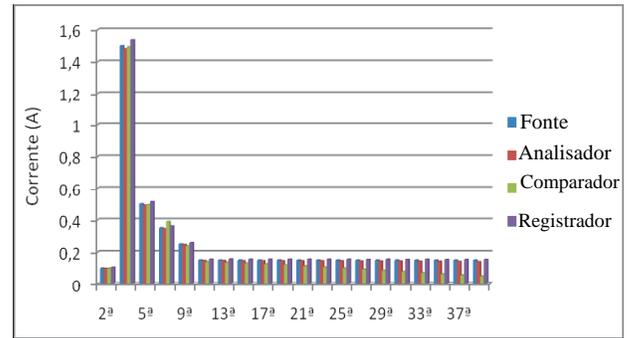


Figura 5. Erro associado aos três instrumentos para a forma de onda Classe C

Os resultados obtidos quando aplicadas as demais formas de onda para a corrente apresentaram resultados semelhantes aos obtidos com a forma de onda Classe C.

Já para a tensão o instrumento com o pior desempenho foi o equipamento 1 e o melhor instrumento foi o equipamento 2. Os resultados para a tensão podem ser visualizados na Fig. 6, a qual mostra o perfil dos três instrumentos para a carga de um apartamento. As demais curvas de tensão citadas na Tabela I apresentaram resultados semelhantes à curva do apartamento.

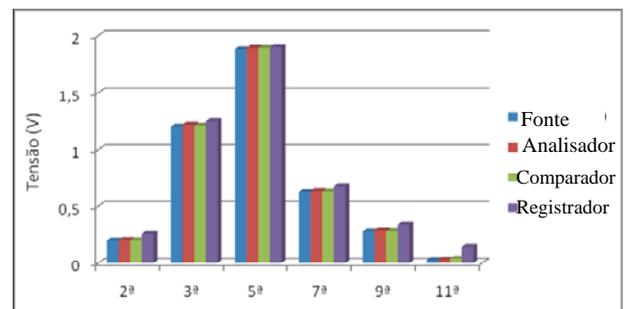


Figura 6. Erro associado aos três instrumentos para a forma de onda da carga de um apartamento.

É notável o erro do equipamento 1 principalmente nas harmônicas de 2ª, 3ª e 11ª ordens.

V. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que por mais que o aparato de medição seja da mais alta tecnologia, do melhor fabricante, usado na realização de diagnósticos elétricos de sucesso, a medição realizada poderá não ser totalmente verdadeira. Aliás, não se pode confiar em nenhuma medição que não seja proveniente de um instrumento devidamente calibrado por um padrão rastreado.

Os valores da incerteza expandida associada a cada medição também podem ser expressos, evidenciando o seguinte: ainda que os erros sistemáticos sejam eliminados por meio de correções matemáticas, os valores que as medidas podem assumir encontram-se em uma faixa com uma distribuição de probabilidade semelhante a uma gaussiana e nível de confiança expresso pelo fator k (tabela *T de Student*).

No presente trabalho, foi perceptível que o equipamento 2 foi o que apresentou o melhor desempenho quando comparado aos outros dois equipamentos. O equipamento 1 não apresentou resultados satisfatórios para as curvas de tensão enquanto o equipamento 3 teve um mal desempenho nos pontos de corrente. A resposta para esses resultados pode estar no histórico de cada equipamento: a fonte (equipamento 4) é um instrumento novo, com classe de exatidão de 150 ppm; o analisador (equipamento 2) é um instrumento novo adquirido na mesma época da fonte e, embora seja um instrumento de campo, nunca foi utilizado para efetuar medições fora do laboratório; o comparador de potência e energia (equipamento 3) é um instrumento com bastante uso em medições de potência e energia, mas nunca saiu das condições ambientais do laboratório para realizar medidas em campo, e o registrador de eventos de energia (equipamento 1) é um instrumento de uso freqüente em campo, que já tem muitas medições e diagnósticos elétricos em seu histórico e que por causa do tempo de uso acumulou uma deriva grande.

Percebe-se, então, que há necessidade de calibrar os instrumentos medidores de QEE não somente na distorção harmônica, mas também em VTCD's, nos parâmetros de FLICKER, no desbalanceamento e em qualquer outra forma de distorção na tensão e na corrente.

VI. BIBLIOGRAFIA

- [1] DUGAN, R.C.; MACGRANAGHAN, M.F; BEATY, H.W (1996). *ELECTRICAL POWER SYSTEMS QUALITY*. New York, Mcgraw-Hill.
- [2] VUOLO, José Henrique. **FUNDAMENTOS DA TEORIA DOS ERROS**. Edgar Blucher, São Paulo- 1992.
- [3] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **GUIDE TO THE ESPRESSION OF UNCERTAINTY IN MEASUREMENT**. ISO/TAG 4. Genevé, 1993
- [4] HORSKY, P. "STANDARDS OF DISTORTED SIGNAL FOR CALIBRATION OF TOTAL HARMONIC DISTORTION METERS". Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, 1998 6-10 July 1998 Page(s):367 – 368. WRIGHT, P. S.,
- [5] FLUKE, Corporation. **Guia do Usuário: 6100A. Electrical Power Standard**. FLUKE, Corporation. Setembro, 2003.
- [6] ALVES, R.S. França A.L.C. **METROLOGIA APLICADA À INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA: A IMPORTÂNCIA NA CIÊNCIA E INDÚSTRIA**. Trabalho de Conclusão de Curso submetido à UFPA para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista. Belém-PA, jan-2004.
- [7] NPL POWER QUALITY WAVEFORM LIBRARY Disponível em: < <http://www.npl.co.uk> > Acesso em: 23 fev. 2007
- [8] "A METHOD FOR THE CALIBRATION OF HARMONIC ANALYSERS USING SIGNALS CONTAINING FLUCTUATING HARMONICS IN SUPPORT OF IEC61000-3-2." IEEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 152, No. 3, May 2005.

VII. BIOGRAFIAS



Carminda Célia Moura de Moura Carvalho nasceu em Belém-PA-Brasil em 1970. Gradou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará em 1994. Concluiu o Mestrado e o Doutorado em Engenharia Elétrica pela mesma Universidade em 1996 e 2006, respectivamente. É professora do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Pará desde 1997. Suas linhas de interesse são operação de sistemas, qualidade da energia e instalações elétricas.



Maria Emília de Lima Tostes nasceu em Recife-PE-Brasil em 1966. Formada em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará em 1988, concluiu o mestrado em 1992 e o doutorado em 2003 pelo programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica da mesma Universidade. É professora do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Pará. Suas áreas de pesquisa são qualidade da energia, sistemas de distribuição e processos industriais.

Áthila Santos de Lima nasceu em Belém-PA-Brasil em 1983. Licenciado em Matemática Plena pela Universidade Estadual do Pará em 2005; Formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará em 2006.

É aluno regular do curso de mestrado em Sistemas de Energia da Universidade Federal do Pará. Suas áreas de pesquisa são qualidade da energia, redes de computadores e automação industrial



José Henrique Dias de Souza nasceu em Belém-PA-Brasil em 1983. Licenciado em Matemática Plena pela Universidade Estadual do Pará em 2005; Formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará em 2006.

É aluno regular do curso de mestrado em Sistemas de Energia da Universidade Federal do Pará. Suas áreas de pesquisa são qualidade da energia, metrologia e sistemas de controle.