



O impacto da instabilidade no cálculo do Erro Normalizado (E_n) no Programa de Comparação Interlaboratorial do Setor Elétrico Brasileiro.

Luiz Henrique Pereira Junqueira ¹, Dalvir Maguerroski ², Kathia Andrade de Oliveira ³

¹ Furnas Centrais Elétricas SA, São José da Barra - MG, Brasil, luizhpj@furnas.com.br

² Eletrosul Centrais Elétricas SA, Florianópolis - SC, Brasil, dalvir@eletrosul.gov.br

³ Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu - PR, kathia@itaipu.gov.br

Resumo: O trabalho apresenta o programa de comparação interlaboratorial de eletricidade e frequência do setor elétrico brasileiro denominado de PCI – Eletricidade. Esse é fundamental para garantia de qualidade do setor, o qual iniciou em 2006 e em 2008 participaram 12 importantes empresas do setor elétrico brasileiro. A evolução, a metodologia e o tratamento matemático para a instabilidade do padrão circulante na determinação do erro normalizado - E_n são temas abordados. As referências são os Laboratórios de Metrologia Elétrica do INMETRO (Tensão, corrente e resistência) e FURNAS (Frequência).

Palavras chave: Interlaboratorial, Erro Normalizado, Instabilidade, Setor Elétrico, Metrologia.

1. INTRODUÇÃO

O Programa de Comparação Interlaboratorial do setor Elétrico Brasileiro – **PCI Eletricidade** ocorre no setor elétrico nas grandezas de tensão DC e AC, corrente DC e AC, resistência e frequência e seu início foi no ano de 2006. A preocupação das empresas em processos de medições nas áreas de eletricidade e frequência com possíveis reflexos comerciais e a dedicação dos pesquisadores dos laboratórios envolvidos são fatores que determinaram a instituição e a manutenção deste programa de comparação interlaboratorial. Outro fator determinante foi a constatação, pelos laboratórios acreditados do setor elétrico brasileiro, da ocorrência de poucos programas interlaboratoriais para garantia da qualidade conforme requerido pela norma NBR ISO/IEC 17025 [2] que baliza a acreditação de laboratórios de calibração. Algumas redes metrológicas estaduais buscam preencher esta lacuna, porém a abrangência do PCI Eletricidade é nacional. No Brasil, esses ensaios de proficiência são orientados pela Norma ABNT ISO/IEC Guia 43 [1] e a necessidade de participação pela Norma NIT-DICLA-26 - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO [3] para laboratórios acreditados.

A instabilidade do padrão circulante exige um tratamento mais criterioso, pois com a evolução da Metrologia no Brasil, os laboratórios diminuíram os valores

de incertezas praticadas e quando esses valores estão na ordem de grandeza do valor da instabilidade do padrão circulante, o E_n calculado de forma tradicional [1], conforme equação 1, pode não refletir o real desempenho do laboratório.

As normas atuais não tratam explicitamente a questão da instabilidade do padrão circulante. Numa análise teórica inicial, o padrão circulante deveria ser invariável no tempo. Essas constatações têm como consequência a busca de alternativas para tratar as não idealidades do padrão circulante e os reflexos no tratamento de dados para apresentação dos resultados do PCI Eletricidade.

2. LABORATÓRIOS PARTICIPANTES

Coordenação e Vice-Coordenação: São eleitos pelos participantes por um período de dois anos.

Em 2008 o programa teve como participantes as seguintes empresas:

- CELG - Centrais Elétricas de Goiás S.A
- CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais
- CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
- CHESF - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
- COELBA - Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia
- CTEEP - Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
- ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A
- ELETROSUL - Eletrosul Centrais Elétricas S.A
- FURNAS - Furnas Centrais Elétricas S.A
- INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
- LATCE* - Laboratório de Tensão e Corrente
- LARES* - Laboratório de Resistência
- ITAIPU – Itaipu Binacional
- LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento

**Laboratórios de referência nacional pertencentes ao INMETRO*

3. OBJETIVO

O PCI Eletricidade auxilia o laboratório no atendimento do requisito 5.9.1 da NBR ISO/IEC 17025 [2] e permite uma avaliação nos seguintes tópicos, visando garantir a qualidade em seus processos:

- Procedimentos técnicos aplicados;
- Desempenho das equipes técnicas envolvidas nas calibrações;
- Rastreabilidade metrológica dos padrões utilizados;
- Análises dos padrões, quanto aos níveis de incerteza;
- Comparação de resultados com um laboratório de referência através do indicador E_n - Erro Normalizado;
- Estabilidade dos padrões circulantes ao longo do tempo;
- Validação de métodos praticados;
- Subsídios para ações preventivas e corretivas;
- Estabelecimento de um fórum de discussão de assuntos metrológicos correlacionados entre as empresas participantes e
- Intercâmbio técnico na área de metrologia elétrica.

4. MÉTODOS

O padrão circulante é calibrado no laboratório referência no início e no final da circulação. O tempo entre estes dois eventos é de aproximadamente oito meses [5], sendo obtidos dois erros de referência, assim como, duas incertezas de medição para o mesmo artefato [4]. A primeira indagação é de como aplicar estes valores na equação 1, pois numa visão simplificada deveriam ser iguais (ou bem próximos), porém os relatórios apresentam diferenças.

As empresas participantes, através de seus laboratórios, executam as calibrações conforme seus procedimentos próprios, mas em pontos e condições predefinidos. Após o tratamento dos dados, encaminham seus resultados para a empresa coordenadora.

A instabilidade do padrão circulante é parte integrante na determinação do erro do laboratório participante. A instabilidade tem apresentado características de uma variável aleatória [5,6] com uma distribuição ainda não definida nos três anos de existência do programa de intercomparação.

Como o objetivo de visualizar a influência da instabilidade no erro normalizado, foram definidos os seguintes parâmetros α e β (equações 2 e 3) que expressam qual a tolerância da instabilidade tendo como base a incerteza da referência conforme o gráfico da figura 1:

$$E_n = \frac{E_{lab} - E_{ref}}{\sqrt{(U_{lab})^2 + (U_{ref})^2}} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\Delta I}{U_{ref}} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{U_{lab}}{U_{ref}} \quad (3)$$

Onde:

E_n = Erro normalizado

E_{lab} = Erro do laboratório da empresa participante

E_{ref} = Erro do laboratório referência

U_{lab} = Incerteza do laboratório da empresa participante

U_{ref} = Incerteza do laboratório referência

ΔI = Instabilidade do padrão circulante

β = Relação entre a instabilidade e a incerteza de referência

α = Relação entre a incerteza do laboratório participante e incerteza do laboratório referência

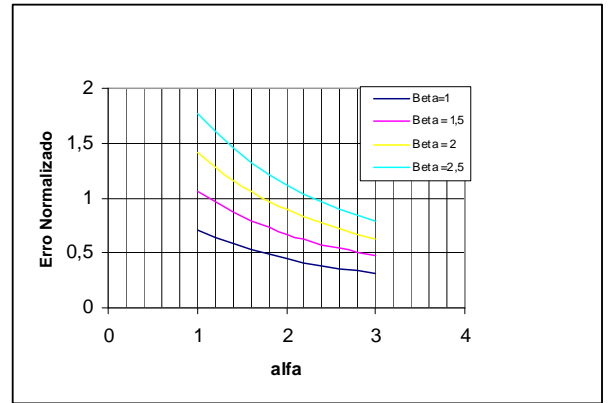


Fig. 1. – Erro e Instabilidade

Observa-se na figura 1 que os laboratórios com incertezas na ordem de grandeza do laboratório de referência são fortemente afetados pela instabilidade do padrão circulante.

Uma forma encontrada de se considerar no cálculo do E_n as medições iniciais e finais do laboratório de referência e a instabilidade do padrão circulante está descrito nas equações 4 e 5.

$$E_n = \frac{E_{lab} - \left(\frac{E_{ref(inicial)} + E_{ref(final)}}{2} \right)}{\sqrt{(U_{lab})^2 + \{2 \times \text{Max}[U_{ref(inicial)} / k_{ref(inicial)}, U_{ref(final)} / k_{ref(final)}]\}^2}} \quad (4)$$

$$E_n = \frac{\left(E_{lab} - \frac{(E_{ref(inicial)} + E_{ref(final)})}{2} \right)}{\sqrt{(U_{lab})^2 + (U_{ref})^2}} \quad (5)$$

Onde, na equação 5

$$(U_{ref}) = \sqrt{\{2 \times \max[U_{ref}(início) / k_{ref}(início), U_{ref}(final) / k_{ref}(final)]\}^2 + \left(\frac{E_{ref}(final) - E_{ref}(inicial)}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

(6)

Onde:

E_n = Erro normalizado

E_{lab} = Erro do laboratório da empresa participante

E_{ref} = Erro do laboratório referência (inicial e final)

U_{lab} = Incerteza do laboratório da empresa participante

U_{ref} = Incerteza do laboratório referência (inicial e final)

k_{ref} = Fator de abrangência do laboratório referência (inicial e final)

Nas equações 4, 5 e 6 o erro da referência é o valor médio das duas calibrações (inicial e final) e a diferença é uma fonte de incerteza, denominada de instabilidade e assume-se para essa uma distribuição retangular (equação 6).

Uma vez definido o E_n para cada laboratório, o mesmo terá resultados satisfatórios [1], ou não, conforme equações 7 e 8.

$$|E_n| \leq 1 = \text{satisfatório} \quad (7)$$

$$|E_n| > 1 = \text{insatisfatório} \quad (8)$$

5. RESULTADOS

As tabelas 1 e 2 apresentam os resultados da circulação de 2008 [5].

Tabela 1. Resultados considerando a instabilidade

Empresas	Percentual de Satisfatório	Pontos calibrados
Empresa 02	75,0	40
Empresa 03	88,4	43
Empresa 04	97,7	43
Empresa 05	81,4	43
Empresa 06	100	39
Empresa 07	93,0	43
Empresa 08	97,5	40
Empresa 09	97,5	40
Empresa 10	95,3	43
Empresa 11	90,7	43
Empresa 12	87,5	40

Tabela 2. Resultados desconsiderando a instabilidade

Empresas	Percentual de Satisfatório	Pontos calibrados
Empresa 02	62,5	40
Empresa 03	74,4	43
Empresa 04	97,7	43
Empresa 05	79,1	43
Empresa 06	100	39
Empresa 07	72,1	43
Empresa 08	97,5	40
Empresa 09	97,5	40
Empresa 10	88,4	43
Empresa 11	88,3	43
Empresa 12	85,0	40

Com os resultados [5,6] obtidos neste período de três anos do programa foi possível observar, que tanto o Erro, Incerteza, Fator de Abrangência e Grau Efetivo de Liberdade da Referência, em muitos pontos medidos apresentaram valores diferentes no início e no final da circulação.

Em virtude desse fato podem ser obtidos dois percentuais de resultados satisfatórios em função dos valores calculados de E_n . O primeiro levando-se em conta a instabilidade (Tabela 1) do artefato sob calibração conforme equações 5 e 6, um segundo não levando-se em conta a instabilidade (Tabela 2), conforme equação 4.

6. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na circulação de 2008 [5], como pode ser observado nas tabelas 1 e 2 comprovam que alguma adaptação se faz necessário no cálculo do erro normalizado, observando-se que o impacto é maior nos laboratórios que praticam incertezas de valor baixo e que numa primeira análise poderiam estar com resultados não satisfatórios. Da mesma forma, esse impacto não ocorre para os laboratórios que possuem incertezas de valor elevado. Logo, é possível a definição de algumas premissas de discussão, que são fundamentais para que um programa de comparação interlaboratorial atenda ao esperado:

1. Tempo da circulação;
2. Critérios para escolha do padrão circulante em relação às suas características metrológicas;
3. Tempo do histórico de acompanhamento preliminar do padrão circulante,
4. Relação de incerteza entre os laboratórios participantes, referência e padrão circulante;
5. Número adequado [7] e representativo de participantes;
6. Escolha de procedimentos;
7. Combinações de erros e incertezas do laboratório referência (inicial e final);
8. Equacionamento adequado para o erro normalizado, pois a equação 1 não contempla a possibilidade da instabilidade do padrão circulante;

9. Instabilidade aceitável, sem comprometer a circulação e
10. Custo para obtenção de padrões de qualidade e adaptação à realidade nacional.

6.1 Erro Normalizado (En) da Referência

Foi observado que o En , conforme equação 4, das medições da Referência no início e no final, em muitos casos, não é zero, como seria esperado. O motivo principal é devido à instabilidade do artefato sob calibração, mas não seria o único motivo, pois por exemplo, o VVC (valor verdadeiro convencional) da referência poderia ter variado.

Nos resultados da circulação de 2008 [5], do total de 43 pontos calibrados, em 17 pontos o En foi acima de 1, variando de 1 a 3,7. Dois exemplos podem ser citados:

1. Ponto de tensão alternada de 1 V em 60 Hz

$$E_{ref\ inicial} = -0,0196\%, U_{ref\ inicial} = \pm 0,0012\%, (k = 2,00)$$

$$E_{ref\ final} = -0,0206\%, U_{ref\ final} = \pm 0,0012\%, (k = 2,00)$$

$$E_{ref\ médio} = -0,0201\%, U_{ref} = \pm 0,0012\%$$

$$En_{inicial} = 3,06 \quad En_{final} = 3,06$$

2. Ponto de 900 Hz com amplitude de 1 V

$$E_{ref\ inicial} = 0,00054\%, U_{ref\ inicial} = \pm 0,000037\%, (k = 4,53)$$

$$E_{ref\ final} = 0,00064\%, U_{ref\ final} = \pm 0,000024\%, (k = 3,31)$$

$$E_{ref\ médio} = 0,00059\%, U_{ref} = \pm 0,000016\%$$

$$En_{inicial} = 1,24 \quad En_{final} = 1,72$$

Ao se levar em conta a instabilidade, conforme equação 6, os En das medições da Referência no início e no final se tornam menores do que 1.

6.2 Influências de Arredondamento no En

Outro fator de influência no valor do En vem a ser o número de algarismos significativos e o arredondamento dos E_{ref} e U_{ref} .

Tem-se dois exemplos, um para a Empresa 03 e outro para Empresa 02, conforme equações 5 e 6:

1. Ponto de tensão alternada de 700 V em 60 Hz (Empresa 03)

Valores arredondados:

$$E_{ref\ inicial} = -0,017\%, U_{ref\ inicial} = \pm 0,0033\%, (k = 2,08)$$

$$E_{ref\ final} = -0,017\%, U_{ref\ final} = \pm 0,0033\%, (k = 2,08)$$

$$E_{ref\ médio} = -0,017\%, U_{ref} = \pm 0,0032\%$$

$$E_{lab} = -0,016\%, U_{lab} = \pm 0,0096\%, (k = 2,00)$$

$$En = 0,99$$

Valores não arredondados:

$$E_{ref\ inicial} = -0,01730\%, U_{ref\ inicial} = \pm 0,0033\%, (k = 2,08)$$

$$E_{ref\ final} = -0,01726\%, U_{ref\ final} = \pm 0,0033\%, (k = 2,08)$$

$$E_{ref\ médio} = -0,0173\%, U_{ref} = \pm 0,0032\%$$

$$E_{lab} = -0,016\%, U_{lab} = \pm 0,0096\%, (k = 2,00)$$

$$En = 1,26$$

2. Ponto de tensão alternada de 1 V em 60 Hz (Empresa 02)

Valores arredondados:

$$E_{ref\ inicial} = -0,020\%, U_{ref\ inicial} = \pm 0,0012\%, (k = 2,00)$$

$$E_{ref\ final} = -0,021\%, U_{ref\ final} = \pm 0,0012\%, (k = 2,00)$$

$$E_{ref\ médio} = -0,021\%, U_{ref} = \pm 0,012\%$$

$$E_{lab} = -0,019\%, U_{lab} = \pm 0,0060\%, (k = 2,00)$$

$$En = 1,15$$

Valores não arredondados:

$$E_{ref\ inicial} = -0,01956\%, U_{ref\ inicial} = \pm 0,0012\%, (k = 2,00)$$

$$E_{ref\ final} = -0,02060\%, U_{ref\ final} = \pm 0,0012\%, (k = 2,00)$$

$$E_{ref\ médio} = -0,0201\%, U_{ref} = \pm 0,0121\%$$

$$E_{lab} = -0,019\%, U_{lab} = \pm 0,0060\%, (k = 2,00)$$

$$En = 0,80$$

Como podemos observar, esta influência pode aumentar ou reduzir o En .

6.3 Instabilidade do padrão circulante

Ao longo dos três anos do PCI Eletricidade [5,6] a instabilidade do padrão circulante foi objeto de acompanhamento. Como parâmetro de comparação adotou-se a classe de exatidão, especificada pelo fabricante, para 1 ano e 90 dias. Para cada ponto calibrado a instabilidade é comparada com a especificação de 1 ano e 90 dias daquele ponto.

Os valores da instabilidade foram sempre menores que a especificação do fabricante para 90 dias, da ordem de 5 a 10 vezes menores.

A seguir estão alguns exemplos para a circulação de 2008 [5]:

1. Ponto de tensão contínua de 100 mV

$$Instabilidade = +0,00060\%$$

$$Classe\ Exatidão_{90\ dias} = \pm 0,0075\%$$

2. Ponto de corrente contínua de 1 A

$$3. Instabilidade = -0,0027\%$$

$$Classe\ Exatidão_{90\ dias} = \pm 0,090\%$$

4. Ponto de tensão alternada de 1 V em 60 Hz

$$Instabilidade = +0,010\%$$

$$Classe\ Exatidão_{90\ dias} = \pm 0,080\%$$

5. Ponto de tensão alternada de 700 V em 1 kHz

$$Instabilidade = +0,00\%$$

$$Classe\ Exatidão_{90\ dias} = \pm 0,082\%$$

6. Ponto de tensão alternada de 10 V em 10 kHz

$$Instabilidade = +0,0070\%$$

$$Classe\ Exatidão_{90\ dias} = \pm 0,080\%$$

7. Ponto de corrente alternada de 3A em 60 Hz

Instabilidade = - 0,0070%

Classe Exatidão 90 dias = +/- 0,21%

8. Ponto de corrente alternada de 1A em 1 kHz

Instabilidade = + 0,010%

Classe Exatidão 90 dias = +/- 0,14%

9. Ponto de 100 MΩ

Instabilidade = + 0,0080%

Classe Exatidão 90 dias = +/- 0,81%

10. Ponto de 300 kHz com amplitude de 100 mV

Instabilidade = + 0,000060%

Classe Exatidão 90 dias = +/- 0,010%

11. Ponto de 10 Hz com amplitude de 1 V

Instabilidade = - 0,00030%

Classe Exatidão 90 dias = +/- 0,050%

6.4 Variantes no cálculo do En

Analisando-se atentamente os resultados das circulações do PCI Eletricidade [5,6] podemos observar que alguns valores de incerteza da referência U_{ref} , resultantes dos cálculos conforme equações 4 e 6, podem ser menores do que a $U_{ref\ inicial}$ e $U_{ref\ final}$. Tal fato ocorre se o k (*fator de abrangência*) for diferente de 2,00 e se a instabilidade for muito baixa ou zero.

São apresentadas a seguir algumas formas de se contornar esta questão.

No caso em que a instabilidade não é considerada, equação 4, pode-se adotar a equação 9:

$$E_n = \frac{E_{lab} - \left(\frac{E_{ref\ (inicial)} + E_{ref\ (final)}}{2} \right)}{\sqrt{(U_{lab})^2 + \{Max[U_{ref\ (inicial)}, U_{ref\ (final)}]\}^2}} \quad (9)$$

Para o caso em que a instabilidade é considerada, equações 5 e 6, são possíveis duas alternativas equações 10 e 11), em substituição à equação 6:

$$(U_{ref}) = \sqrt{\{(Max(U_{ref\ (inicial)}, U_{ref\ (final)}))\}^2 + \left(\frac{E_{ref\ (final)} - E_{ref\ (inicial)}}{\sqrt{3}} \right)^2} \quad (10)$$

$$(U_{ref}) = \sqrt{\{(Max(U_{ref\ (inicial)}, U_{ref\ (final)}))\}^2 + (E_{ref\ (final)} - E_{ref\ (inicial)})^2} \quad (11)$$

Na equação 10 tem-se a máxima incerteza entre a $U_{ref\ inicial}$ e $U_{ref\ final}$ e esta é combinada com a instabilidade, sendo a instabilidade considerada como uma distribuição retangular.

Na equação 11 tem-se a máxima incerteza entre a $U_{ref\ inicial}$ e $U_{ref\ final}$ e esta é combinada com a instabilidade, sendo a instabilidade considerada na sua totalidade.

As tabelas 3 e 4 apresentam os resultados da circulação de 2008 [5], conforme equações 10 e 11.

Tabela 3. Resultados considerando a instabilidade (equação 10)

Empresas	Percentual de Satisfatório	Pontos calibrados
Empresa 02	75,0	40
Empresa 03	88,4	43
Empresa 04	97,7	43
Empresa 05	81,4	43
Empresa 06	100	39
Empresa 07	83,7	43
Empresa 08	97,5	40
Empresa 09	95,0	40
Empresa 10	95,3	43
Empresa 11	88,4	43
Empresa 12	80,0	40

Tabela 4. Resultados considerando a instabilidade (equação 11)

Empresas	Percentual de Satisfatório	Pontos calibrados
Empresa 02	75,0	40
Empresa 03	88,4	43
Empresa 04	97,7	43
Empresa 05	81,4	43
Empresa 06	100	39
Empresa 07	93,0	43
Empresa 08	97,5	40
Empresa 09	97,5	40
Empresa 10	95,3	43
Empresa 11	90,7	43
Empresa 12	85,0	40

7. CONCLUSÃO

Pela observação dos resultados apresentados nas tabelas 1, 2, 3 e 4, os mesmos apresentam, para algumas empresas, valores diferentes entre si. Tal fato, conforme apresentado ao longo do trabalho, se deve a diversos fatores, mas principalmente à instabilidade e a forma que a mesma é considerada nos cálculos. Naturalmente que para aquelas empresas as quais praticam níveis de incertezas menores este fator é mais relevante.

A influência dos arredondamentos no erro normalizado ocorre em menor escala, logo, cuidados ao tratar esses valores devem ser tomados.

A solução adotada para cálculo do erro normalizado conforme equações 5 e 6 continuará sendo utilizada, pois resultou da contribuição de especialistas que participam deste e de outros ensaios de proficiência.

O tema é considerado relevante pelos participantes e a cada reunião anual o conceito é aprofundado de forma

contínua. Em outros programas nacionais podem ocorrer fatos similares, desta forma, se pretende é levar para a comunidade metrológica a experiência obtida no PCI - Eletricidade do Setor Elétrico Brasileiro, como contribuição para uma harmonização das questões levantadas, bem como novas sugestões poderão surgir, no sentido da melhoria do processo.

AGRADECIMENTOS

Obrigado pela contribuição de todas as empresas do setor elétrico que fazem parte do PCI Eletricidade.

REFERÊNCIAS

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas, (1999), “Ensaio de proficiência por comparações interlaboratoriais”, ABNT ISO/IEC Guia 43-1.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas, (2005), “Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração”, ABNT ISO/IEC 17025.
- [3] INMETRO - Norma NIT-DICLA-026, (2008), “Requisitos sobre a participação dos laboratórios de ensaio e calibração em atividades de ensaio de proficiência”, NIT-DICLA-026.
- [4] Terceira Edição Brasileira (2003); “Guia para a expressão da incerteza de medição”, ABNT/INMETRO.
- [5] Coordenação PCI Eletricidade (2008), “Relatório do PCI Eletricidade – circulação 2007 e 2008”.
- [6] Coordenação PCI Eletricidade (2006), “Relatório do PCI Eletricidade – circulação 2006”.
- [7] Ikeda, Minoru (2001), “Programa de comparação interlaboratorial na área de energia elétrica no Brasil, Anais do 1o Congresso Ibero-Americano de Laboratórios, Lisboa, Portugal.