

- manutenção de insumos (ênfase em manutenção de recursos materiais);
- garantia de padrões de qualidade de serviços e produtos (introdução ao controle de qualidade);
- estudos de mercado (principalmente técnicas de previsão);
- obtenção de recursos materiais (principalmente modelos de estoques).

Em "Instalações Industriais 2", por outro lado, que corresponde ao lado direito do DIAGRAMA 5.4, são apresentados os conceitos básicos relativos ao processo de obtenção da instalação industrial (fases de concepção e implantação), com rápidas pinceladas sobre a fase de desativação, completando-se assim a cobertura do ciclo de vida da instalação. Os tópicos cobertos por essa disciplina são os seguintes:

- processo de planejamento da empresa e colocação das instalações industriais no contexto desse processo;
- planejamento, controle e sistema de informações associados às fases de concepção, implantação e desativação (ênfase à fase de concepção) do macrosistema Empresa, com especial atenção nos seguintes tópicos:
 - planejamento e controle de projetos;
 - técnicas de caminho crítico;
 - localização industrial;
 - arranjo físico;
 - avaliação econômica de investimentos;
- outros tópicos (usualmente em forma de seminários):
 - tempos e métodos;
 - custos industriais;
 - higiene e segurança do trabalho;
 - avaliação de investimentos a custos sociais;
- projeto, a nível de estudo preliminar, de uma instalação industrial.

Um ponto importante a ser destacado é que essa última disciplina tem "Instalações Industriais 1" como pré-requisito, pois é preciso primeiro entender a operação para se poder então conceber, implantar e mesmo desativar e reciclar uma instalação industrial.

VII. CONCLUSÕES

O modelo sistêmico desenvolvido, juntamente com o conceito de ciclo de vida e do processo dinâmico associado aos sistemas no âmbito da instalação industrial, fornecem a base para a obtenção da taxionomia para o entendimento de instalações industriais e a conseqüente definição de disciplinas específicas.

Para o caso particular do curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, foram definidas duas disciplinas específicas. A taxionomia desenvolvida, entretanto, pode ser utilizada para definir outras disciplinas, diferentes daquelas, ou mesmo para orientar reagrupamentos de disciplinas existentes.

Outra contribuição da abordagem é facilitar aos alunos identificarem, a nível de instalação industrial como um todo, oportunidades de propostas de estágios supervisionados.

Pode também ser ressaltado que, a menos de adaptações no modelo sistêmico, é possível utilizar a mesma abordagem para outras instituições que não instalações industriais, como por exemplo instalações hospitalares, firmas prestadoras de serviços e entidades governamentais.

Finalmente, as conclusões mais ambiciosas e também mais polêmicas. Apesar de ter sido dirigida especificamente ao ensino de Instalações Industriais, a abordagem apresentada pode dar subsídios à estruturação do currículo de Engenharia Mecânica. Assim, a Empresa, que é uma organização que operacionaliza o regime de propriedade de bens e serviços inerentes ao Sistema Econômico, pode ser entendida dentro de um modelo global de sociedade. Dentro desse enfoque, as Matérias de Formação Geral deveriam dar uma visão geral da sociedade, mostrando tanto o posicionamento relativo da Empresa na sociedade como também suas inter-relações com outras organizações dos sistemas que compõem a sociedade. As matérias de Formação Profissional Geral e Formação Profissional Específica podem tomar como base a taxionomia do DIAGRAMA 5.4, com concentrações em matérias associadas às fases do ciclo de vida da instalação industrial: concepção (projetos), implantação (construções e montagens), operação (operação e manutenção) e desativação (desativação e reciclagem).

ARTIGO

REDUÇÃO DA INCERTEZA EM MEDIDAS DE CORRENTES CONTÍNUAS EM ELETRÔNICA

B.J. Mass*

MASS, B.J. Redução da incerteza em medidas de correntes contínuas em eletrônica. *Rev. Ensino Eng.*, S. Paulo, 2: 105-111, 1º sem. 1983.

O emprego de uma fonte de correntes padrão e de regressão linear revela que é possível estabelecer coeficientes para corrigir os valores indicados de correntes contínuas tipicamente encontrados em semicondutores, reduzindo assim a incerteza nas medidas. A idéia é simples e pode ser estendida a correntes alternadas e outras variáveis. Neste trabalho são comunicados alguns resultados particulares demonstrando que o procedimento pode ser introduzido nos laboratórios de ensino das universidades e escolas técnicas.

Medidas de corrente. Incerteza. Fonte de correntes padrão. Análise de regressão.

MASS, B.J. Reduction of the uncertainty in measurements of DC currents in electronics. *Rev. Ensino Eng.*, S. Paulo, 2: 105-111, 1º sem. 1983.

The utilization of a standard current source and of linear regression reveals that it is possible to establish coefficients to correct the indicated values of DC currents typically encountered in semiconductors, thus reducing the uncertainty in measurements. The idea is a simple one and can be extended to AC currents and other variables. In this paper some particular results are reported demonstrating that the procedure can be introduced in the teaching laboratories of universities and technical schools.

Current measurement. Uncertainty. Standard current source. Regression analysis.

I. INTRODUÇÃO

Não obstante o grande desenvolvimento da eletrônica e dos instrumentos eletrônicos de medida nas últimas décadas, do ponto de vista de engenharia a incerteza nos resultados de medidas continua sendo um problema de interesse educacional.

Para medir corrente, tensão e resistência, por exemplo, continuamos sem poder contar com instrumentos de precisão significativamente melhor que a ordem de grandeza usual de 3% a 5% e que sejam ao mesmo tempo suficientemente baratos para serem adotados em larga escala nos laboratórios de ensino. Por outro lado, o hábito de indicar a incerteza em torno de dados apresentados em relatórios, artigos e trabalhos científicos em geral, não é comum, caracterizando uma situação contraditória na ciência e na tecnologia[7], cuja solução interessa ao ensino de engenharia.

Com esse trabalho pretende-se sugerir um procedimento que uma vez ensinado a estudantes de graduação de engenharia elétrica pode ser executado rotineiramente, envolvendo o estudante numa atmosfera de preocupação pela incerteza e pelos erros nos processos de medida. A idéia consiste em determinar a relação existente entre os valores reais de correntes e os valores indicados por um multímetro comum que sofreu diferentes tipos de descalibração. Se esta relação for linear então poucas medidas são suficientes para se determinar os dois números que caracterizam a relação funcional entre valores reais e valores lidos numa determinada escala. De posse desses números um aluno pode facilmente corrigir cada valor lido na escala em questão. A determinação dos coeficientes exige uma fonte de correntes padrão e uma calculadora programável, que deve ser do tipo "de bolso" para que o método possa ser aplicado com

* Aluno de pós-graduação no Depto. de Eletricidade da Escola de Engenharia de São Carlos, USP. Professor de Circuitos Eletrônicos da Faculdade de Engenharia de Barretos. Endereço: Caixa Postal 487. 13.560. São Carlos, SP, Brasil.

flexibilidade em laboratório. Se a relação entre os valores reais e os valores indicados não for linear, ainda assim o método é aplicável, mas torna-se necessário não apenas um número maior de medidas para caracterizar a relação funcional, como também uma aproximação conveniente para cada função, o que é possível com a maioria das calculadoras empregadas atualmente.

Os valores corrigidos apresentam uma melhora sensível, apesar de que quantitativamente essa melhora depende de cada caso particular. Somente resultados particulares do caso linear são apresentados nesse trabalho, com o objetivo único de expor a idéia.

Uma análise rigorosa levando em conta a incerteza inerente ao gerador de correntes padrão e ao processo de regressão, poderá indicar as limitações do método. Nesse sentido, vale a pena examinar a Ref. [2] por se tratar de uma avaliação crítica dos programas de regressão mais comuns em calculadoras pessoais.

II. UMA ORIGEM DO PROBLEMA

Uma experiência comum em cursos de engenharia elétrica é a construção de um gráfico mostrando ganho estático de corrente versus corrente de coletor para um determinado transistor. O gráfico é construído a partir de pares de correntes de base e de coletor, medidas com um ou dois multímetros. A maioria dos multímetros analógicos normalmente empregados em ensino tem uma precisão da ordem de 3% da máxima deflexão (fundo de escala), nas medidas de corrente.

A incerteza cresce porcentualmente sobre os valores indicados à medida que o ponteiro se aproxima da origem de uma escala. Para uma escala de 30 mA por exemplo, 3% significa 0,9 mA, mas uma leitura de 18 mA nessa escala terá 5% de incerteza. Uma leitura de 9 mA terá 10% de incerteza, e assim por diante. Ao passarmos de uma escala para outra há sempre um salto na incerteza nominal como mostra a Fig. 1.

Passando de 28 mA para 32 mA por exemplo, somos forçados a mudar da escala de 30 mA para a escala de 100 mA, e se a precisão nominal for 3% de máxima deflexão, teremos uma incerteza bem diferente para cada uma das medidas: 28,0 mA \pm 0,9 mA e 32,0 mA \pm 3,0 mA. Por outro lado, ao medirmos valores em seqüência, como é o caso na determinação do ganho estático, ocorrerão descontinuidades que serão visíveis no gráfico.

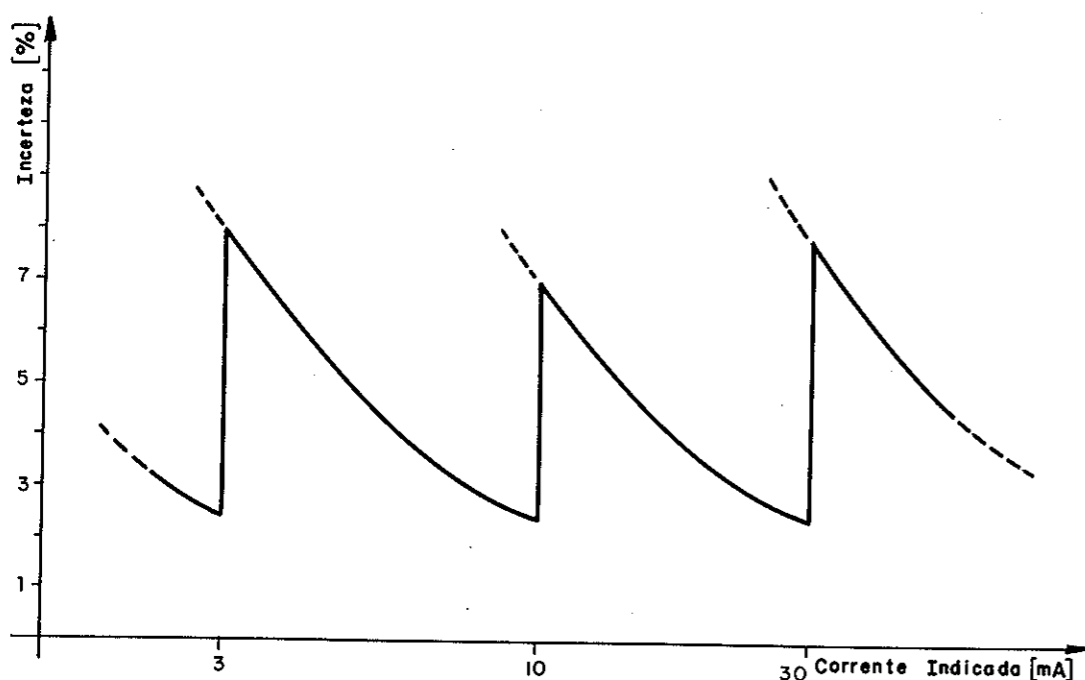


Fig. 1 — Comportamento típico da incerteza nas escalas de corrente de um multímetro analógico. As divisões no eixo das abscissas indicam os limites superiores das diferentes escalas.

Um outro processo que causa deterioração no resultado de medidas é uma espécie de ampliação da incerteza que ocorre quando se calcula uma função de uma ou mais medidas. Esse é o caso de h_{FE} , como mostra o desenvolvimento abaixo, considerando-se uma imprecisão nominal de 3% sobre os valores de corrente medidos:

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \quad \text{Ganho estático de corrente} \quad (1)$$

h_{FE}^* — Ganho estático calculado
 I_C^* — Corrente de coletor indicada
 I_B^* — Corrente de base indicada

$$h_{FE} = \frac{I_C^* \pm 3\%}{I_B^* \pm 3\%} \quad (2)$$

Desenvolvendo-se (2) tem-se

$$h_{FE} \approx \frac{I_C^*}{I_B^*} + 6,19\% - 5,83\%$$

ou

$$h_{FE} \approx h_{FE}^* + 6,19\% - 5,83\% \quad (3)$$

A expressão (3) ocorre nas melhores condições, considerando apenas a precisão nominal sobre valores muito próximos da máxima deflexão. Numa situação típica poderíamos ter por exemplo $I_C^* = 31$ mA e $I_B^* = 0,31$ mA; a corrente de coletor seria lida na escala de 100 mA e a corrente de base na escala de 100 micro A. O ganho estático de corrente seria

$$h_{FE} = \frac{31 \pm 10\%}{0,31 \pm 10\%}$$

$$h_{FE} \approx 100 + 22,22\% - 18,18\% \quad (4)$$

A incerteza em (4) ocorreria com um instrumento de precisão nominal de 3%, sem considerar a incerteza imposta pela resolução e sem considerar problemas com a calibração. A precisão nominal de um multímetro pressupõe que o instrumento esteja calibrado, mas instrumentos portáteis, de circuito ativo sofrem dois tipos de descalibração. Em primeiro lugar a calibração inicial feita pelo usuário pode eventualmente se deteriorar, devido a descarga das baterias ou a uma causa qualquer. Em segundo lugar, a calibração interna feita pelo fabricante ou laboratório de padrões degrada em razão de vários fatores incluindo envelhecimento e substituição de componentes. Torna-se claro, portanto, que qualquer descalibração adiciona uma componente de incerteza não conhecida, que pode piorar intoleravelmente uma medida. A título de ilustração a Tabela I mostra os erros encontrados quando correntes conhecidas foram lidas num multímetro eletrônico Philips PM 2403/5, no Departamento de Eletricidade da Escola de Engenharia de São Carlos. As correntes injetadas no multímetro foram geradas por uma fonte de correntes padrão Yokogawa YEW 2853. Pode-se observar que os erros foram grandes apesar do multímetro ter sido cuidadosamente calibrado pelo usuário.

III. UMA SOLUÇÃO POSSÍVEL

Os problemas de calibração dificultam um dimensionamento completo da incerteza de um multímetro, e por isso o tabelamento dos erros em cada escala representa uma solução possí-

TABELA I

ERROS EM ALGUMAS MEDIDAS DE CORRENTE NUM MULTÍMETRO ELETRÔNICO PM 2403/5		
Corrente Injetada [μ ADC]	Corrente Indicada [μ ADC]	Erro Aprox. [%]
0,100	0,180	80,00
0,200	0,280	40,00
0,300	0,390	30,00
0,400	0,480	20,00
0,500	0,590	18,00
0,600	0,680	13,33
0,700	0,780	11,43
0,800	0,890	11,25
0,900	0,990	10,00

OBS.: Os valores indicados são arredondados de tal forma que a incerteza devido a resolução não é aparente na tabela.

vel, ainda que limitada. Os dados apresentados a seguir são resultantes de uma experiência do autor no Departamento de Eletricidade da Escola de Engenharia de São Carlos, na qual todas as escalas de corrente de várias unidades diferentes de um multímetro eletrônico Philips modelo PM 2403/5 foram comparadas com as correntes geradas por uma fonte padrão Yokogawa modelo YEW 2853. Determinou-se que a corrente indicada em cada escala de cada instrumento está linearmente relacionada com os valores verdadeiros.

O multímetro PM 2403/5 é representativo dos instrumentos empregados em laboratórios de ensino de engenharia, o que permite generalizar para outros instrumentos a solução sugerida. Uma descrição mais ou menos completa do PM 2403/5 encontra-se em [1] e [5]. Quanto ao gerador ou fonte de correntes padrão, trata-se de um instrumento com precisão nominal de 0,07% mais ou menos uma divisão (resolução), com os valores de corrente programados no painel através de chaves digitais. A incerteza sobre os valores de corrente gerados, sendo pelo menos uma ordem de grandeza melhor que a precisão nominal dos multímetros mais comuns (analógicos), permite que estes valores sejam considerados verdadeiros numa aproximação de primeira ordem. Durante as experiências a fonte de correntes padrão revelou-se um instrumento precioso e indispensável para a implementação da idéia central desse trabalho.

Uma vez observada uma aparente linearidade no gráfico de corrente injetada versus corrente lida ou indicada numa determinada escala, aplicou-se regressão linear [2] e [6] para se obter a corrente real em função da corrente lida, de acordo com o seguinte modelo:

$$I_{\text{real}} = m I_{\text{lida}} + b \quad (5)$$

Utilizando um programa facilmente implementável na maioria das calculadoras científicas de bolso [8], foram encontrados coeficientes de correlação muito próximos da unidade para o modelo (5) aplicado a várias escalas de diferentes instrumentos. Recentemente Krane & Schechter [2] apontaram incorreções nos algoritmos mais comuns nas calculadoras. A idéia central desse trabalho contudo não se altera.

Na Tabela II tem-se uma amostra das comparações realizadas. Na coluna dos valores lidos são arrolados os valores mais prováveis, estando implícita uma resolução equivalente à metade da menor divisão. Para a escala de 1000 μ A os parâmetros do modelo (5) são:

$$\begin{aligned} m &= 1,059529349 \\ b &= 2,955670235 \end{aligned} \quad (6)$$

com coeficiente de correlação $r = 0,9999581336$

TABELA II

EXEMPLO DE COMPARAÇÃO DE CORRENTES EM MULTÍMETRO ANALÓGICO PM 2403/5, COM FONTE DE CORRENTES PADRÃO YEW 2853		
Corrente Injetada [μ A]	Corrente Lida [μ A]	$\Delta I/I$ lida [%]
50	40	25,0
100	90	11,1
150	140	7,1
200	187,5	6,7
250	232,5	7,5
300	280	7,1
350	325	7,7
400	375	6,7
450	425	5,9
500	470	6,4
550	515	6,8
600	565	6,2
650	610	6,6
700	655	6,9
750	705	6,4
800	755	6,0
850	800	6,3
900	845	6,5
950	895	6,1
1000	940	6,4

OBS.: Na escala de 100 μ A a resolução é 0,5 μ A; na de 300 μ A, e na de 1000 μ A é de 5 μ A.

Com os coeficientes (6) pode-se corrigir os valores da Tabela II e construir a Tabela III cuja terceira coluna ilustra a melhora no erro típico relativamente aos valores reais das correntes. Os coeficientes (6) foram obtidos para os valores de corrente lidos na escala de 1000 μ A e naturalmente só valores desta escala constam da Tabela III.

TABELA III

VALORES DE CORRENTE CORRIGIDOS COM REGRESSÃO LINEAR			
Corrente Inj. [μ A]	Corrente Lida [μ A]	Corrente Corrigida [μ A]	I/I Lida [%]
350	325	347,30	-0,77
400	375	400,28	0,07
450	425	453,26	0,72
500	470	500,93	0,19
550	515	548,61	-0,25
600	565	601,60	0,27
650	610	649,27	-0,11
700	655	696,95	-0,44
750	705	749,92	-0,11
800	755	802,90	0,36
850	800	850,58	0,07
900	845	898,26	-0,19
950	895	951,23	0,13
1000	940	998,91	-0,11

Os desvios são em módulo inferiores a 0,8% sobre os valores nominais das correntes injetadas através da fonte padrão, os quais foram considerados valores reais. Levando em conta a incerteza de 0,07% inerente à fonte, então 0,9% é o limite superior para os desvios em módulo. Adicionando uma margem de segurança e tomando 1% como a incerteza sobre os valores corrigidos, ainda esta será um terço da incerteza sobre o fundo de escala para o exemplo considerado, o que sem dúvida constitui uma melhora.

IV. CONCLUSÕES

A idéia apresentada através de um exemplo quantitativo indica uma maneira de reduzir a incerteza em medidas de corrente usuais em laboratórios didáticos. O procedimento demanda o emprego de uma calculadora científica programável e de uma fonte de correntes padrão uma vez que se trata essencialmente do estabelecimento de uma curva de calibração otimizada por aproximação pelo método dos mínimos quadrados. A idéia básica pode ser aplicada a medidas de tensões e resistências, tanto em instrumentos analógicos como digitais. Somente correntes contínuas foram empregadas nos experimentos citados, o que não impede que o procedimento seja aplicado a correntes e tensões alternadas. A redução da incerteza para alguns dos casos particulares citados não atingiu uma ordem de grandeza, mas uma melhora concreta pode ser observada em todos os casos.

V. RECOMENDAÇÕES

O envolvimento de alunos de graduação de engenharia num processo rotineiro de aplicação de estatística e calibração em laboratório é desejável senão necessário. Por outro lado, qualquer processo que venha melhorar o resultado de medidas em eletrônica ou qualquer área é sempre bem-vindo. Além disso, uma forma qualquer de calibração sistemática dos instrumentos é necessária para qualquer laboratório de eletrônica. Todos esses aspectos sugerem as seguintes recomendações:

- a) Que os Departamentos de Engenharia Elétrica incorporem a seus laboratórios, quando ainda não o tiverem feito, fontes padrão para que possam ser utilizadas por alunos de graduação em experiências como sugeridas indiretamente neste trabalho. Fontes padrão em geral são bastante caras, mas podem ser desenvolvidas na própria instituição, através de projetos que podem também envolver alunos de graduação. Em [3] é descrito o circuito de uma fonte de padrão de baixo custo para uma aplicação específica, mas que pode ser modificada ou aperfeiçoada.
- b) Que nas disciplinas que tratam de medidas, nos cursos de Engenharia Elétrica, as fontes de corrente e de tensão padrão sejam incluídas em experiências específicas em laboratório, e que seu funcionamento seja analisado pelo menos do ponto de vista funcional para que não sejam ignoradas pelos alunos. As Refs. [4] e [9] são leituras recomendáveis para mestres e alunos, no interesse de se fomentar um respeito pelo rigor em medidas.
- c) Que os coeficientes por regressão para cada escala e cada instrumento, sejam revistos periodicamente e mantidos disponíveis de modo que possam ser aplicados rotineiramente em experiências didáticas ou de pesquisa, por professores e alunos que já conheçam sua origem.
- d) Que o projeto de fontes de correntes ou tensões padrão seja sugerido como tema de trabalhos individuais para alunos de graduação de Engenharia Elétrica (Eletrônica). Dos vários pontos positivos de uma iniciativa dessa natureza pode-se destacar a contribuição positiva para o esforço em desenvolver instrumentação nacional.

Agradecimentos

O autor agradece ao Departamento de Eletricidade da Escola de Engenharia de São Carlos pela cessão de instrumentos e laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] — KLOPPERS, H. — The PM 2403, A simple but effective multimeter. *Philips Measuring and Microwave Notes* Eindhoven, Holanda, (1): 7-8, 1971.
- [2] — KRANE, K.S. & SCHECTER, L. — Regression line analysis, *American Journal of Physics*, New York, 50 (1): 82-4, January 1982.
- [3] — LANDIS, G. & GODWIN, M. — Portable precision DC voltage — current transfer standard for electrometer calibration. *Review of Scientific Instruments*, New York, 53 (8) 1280-1, August 1982.
- [4] — METH, I.M. & ROSENTHAL, L. — An experimental approach to the teaching of the theory of measurement errors. *IEEE Trans. on Education*, New York, E-9 (3): 142-8, September 1966.
- [5] — ONSTEE, H.G. — How to select a multimeter. *Philips Electronic Measuring and Microwave Notes*, Eindhoven, Holanda, (1): 3-5, 1971.
- [6] — PUGH, E.M. & WINSLOW, G.H. — *The analysis of physical measurements*. Reading, MA, EUA, Addison-Wesley, 1966. 246 p.
- [7] — RUBIN, L. — High precision instrumentation can mean poor research results. *IEEE Instrumentation and Measurement Group Newsletter*, New York, (56): 1-2, August-September 1974.
- [8] — TEXAS INSTRUMENTOS ELETRÔNICOS DO BRASIL LTDA., Campinas, SP — *Calculadora eletrônica programável SR-56: manual de aplicações (p. 43-5)*. Campinas, SP, Texas Instrumentos, s.d., 192p. (Publicação LC 517002-A).
- [9] — WAKS, S. — A tutorial presentation of statistical procedures for educational experiments in engineering laboratories. *IEEE Trans. on Education*, New York, E-19 (4): 159-64, November 1974.