

PROJETO DIDÁTICO: CONSTRUÇÃO DE SENSORES PARA MEDIDAS DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA EM SOLUÇÕES AQUOSAS*

Roberto A. Lando**

Sônia B. Faldini***

Resumo

Este projeto visa ao desenvolvimento e à construção, por estudantes universitários, de um sensor de baixo custo para medidas de condutividade elétrica em soluções aquosas.

Abstract

This project has the purpose of developing the assembly and using procedure for university students, of a low cost device for electrical conductivity measurements in aqueous solutions.

* Artigo apresentado na Intertech2000, realizada na Universidade de Cincinnati, EUA, em junho de 2000.

** Professor da Faculdade de Computação e Informática da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Mestre em Engenharia de Materiais. E-mail: lando@usp.br.

*** Profa. Dra. Titular das cadeiras de Físico-Química, Eletroquímica e Tratamentos Superficiais da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie. E-mail: soniafal@uninet.com.br.

1 INTRODUÇÃO

A análise da condutividade elétrica das soluções aquosas em atividades industriais (aquecimento de água em caldeiras), construção civil (quantidade de eletrólitos na água utilizada para o “concreto de responsabilidade”), eletricidade e saneamento ambiental (poluição) é baseada em suas características intrínsecas e na utilização de instrumentação para a realização de medidas. Tornam-se essenciais para o desempenho da análise o domínio dos conceitos com que a química trata da eletricidade e a correta interpretação dos dados obtidos em experimentos e medidas.

A hipótese de que a utilização de materiais condutores de baixo custo para a fabricação de sensores de condutividade alcança resultados experimentais aceitáveis, para a finalidade didática do trabalho, foi utilizada no desenvolvimento das pesquisas. Além disso, a utilização de dispositivos de baixo custo e a facilidade de construção permitirão que os alunos dos cursos de graduação de Engenharia Eletrônica, Engenharia Mecânica, Engenharia de Materiais, Química e Biologia utilizem os recursos da universidade para o desenvolvimento de um trabalho interdisciplinar de pesquisa, desenvolvimento, construção e utilização de um equipamento para medidas da condutividade elétrica em soluções aquosas. Segundo Steehler,¹ a química moderna tem boas razões para introduzir a instrumentação no ensino, tornando o aprendizado rápido e poderoso. Os estudantes precisam tomar contato o mais cedo possível com a instrumentação por diversas razões, entre elas a motivação do contato com a química real, o complemento da teoria com a parte experimental e a necessidade de iniciar o aprendizado da tecnologia envolvida.

Os estudantes de hoje respondem melhor ao conteúdo ministrado quando se dão conta de quais conceitos têm aplicação prática evidente. Tipicamente, o número de estudantes que conseguirão ter acesso à instrumentação para análise química de alto nível se reduz a 10% dos que ingressaram no curso de graduação. Para a maioria dos estudantes, a inicialização em laboratório com instrumentos de baixo custo ou didáticos chega a ser a única chance de exercitar a parte experimental da química. A ciência moderna usa de forma extensiva os métodos instrumentais, e os estudantes devem ser expostos a esta realidade, iniciando com o uso de equipamentos básicos.

*Deve-se permitir que nossos estudantes tomem contato com o poder e a diversão do uso dos instrumentos em qualquer nível** recomenda Steehler.

De acordo com Jeffery,² a revisão da literatura poderá levar à organização de uma lista de procedimentos viáveis, e a escolha final poderá ser feita à luz dos critérios previamente enunciados, atribuindo-se especial atenção às questões das interferências possíveis e ao equipamento disponível.

* No texto original: Let's allow our students the power and fun of using modern instruments at all levels.

Segundo Sevilla,³ os métodos instrumentais são usualmente mais rápidos que os processos puramente químicos e são utilizáveis em concentrações muito mais baixas que as acessíveis nas determinações que usam os métodos clássicos. Apesar das vantagens diversificadas dos métodos instrumentais, sua adoção não tornou obsoletos os métodos puramente químicos ou “clássicos”. Os instrumentos são caros e a sua adoção só se justifica quando a quantidade de amostras a serem analisadas é elevada, ou quando se trata da determinação de substâncias em alto grau de diluição. As medidas feitas através da instrumentação tornaram-se parte integrante das análises.

Tendo como limite as condições de trabalho e os prazos disponíveis, decidiu-se por restringir o ensaio aos materiais utilizados nos sensores considerados de boa performance, fácil uso e baixo custo.

O projeto didático teve como objetivo disponibilizar aos estudantes dos cursos de graduação um procedimento de montagem que permitisse a fabricação de sensores para medidas de condutividade elétrica em soluções aquosas, utilizando os recursos disponíveis na universidade.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A montagem do sensor para medidas de condutividade elétrica em soluções aquosas conteve as premissas de utilização de materiais de baixo custo e simplicidade de projeto para viabilizar a sua construção por alunos da graduação do curso de Engenharia Mecânica.

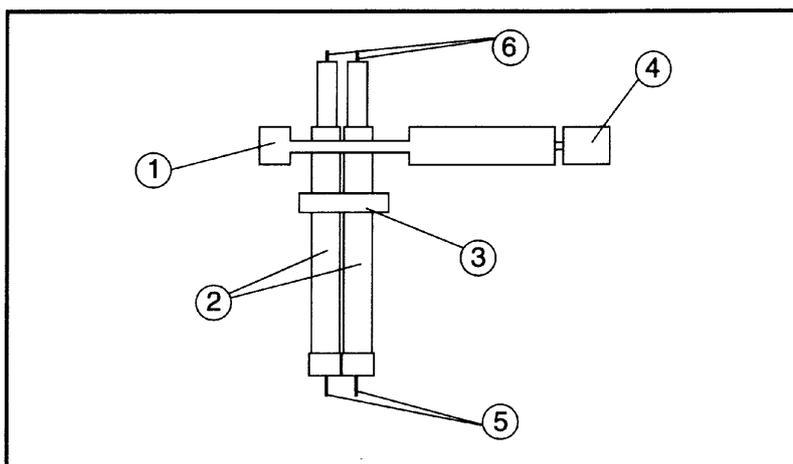


Figura 1 Esquema de montagem do sensor do condutímetro

A estrutura montada, conforme a Figura 1, é formada por duas hastes de material inerte (2), as quais suportarão as placas paralelas de material condutor que compõem o elemento sensor (5). Como a distância entre essas placas determina a constante de célula, e portanto deve se manter fixa, é necessário que as hastes permaneçam presas a uma

estrutura de suporte (1). Um elemento de fixação (3) garante o paralelismo das hastes (2), que deverão ter comprimento suficiente para permitir que se mergulhem as placas de material sensor na solução. A conexão elétrica das placas com o circuito eletrônico será feita através de fio condutor de cobre bitola 1,5mm, no topo das hastes (6).

O material utilizado para a fabricação das peças 1, 2, 3, 4 e 6 do sensor foi o PVC em tarugo e chapa, por ser material barato e inerte. O trabalho em oficina mecânica exigiu operações com fresa e torno. A placa de material condutor (peça nº 5) foi construída com aço inoxidável AISI 316,* usando-se apenas uma tesoura de metal.

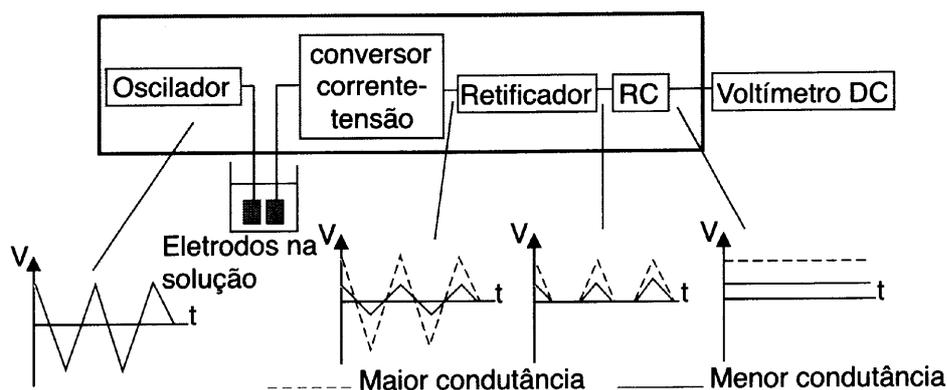


Figura 2 Diagrama de blocos do circuito eletrônico

No sensor, as duas placas paralelas de material condutor, mantidas fixas a uma distância de 1cm, formam a célula de condutividade. Na prática, as placas formam um espaço cúbico que encerra a quantidade de 1cm³ de solução. No circuito do condutímetro, a célula está conectada entre o gerador de AC e o conversor corrente-tensão, conforme mostra a Figura 2. A corrente elétrica entre essas placas é a informação, que será convertida em voltagem na saída do circuito, e cuja leitura (indireta) é feita através de um voltímetro DC. Este é um circuito típico utilizado em instrumentação.^{6,7}

Foram fabricados três sensores com aço inoxidável AISI 316. Duas peças receberam banho de material metálico – ouro e ródio –, elementos com boas características de material condutor. Os resultados dos ensaios foram comparados a um eletrodo comercial com sensor de platina. O tempo gasto para a fabricação de um eletrodo foi de quatro horas.

Como as medidas reportam à condutância da solução, foram desenvolvidas técnicas que convertem o valor medido em condutividade. Isso é feito medindo-se a constante de célula de cada equipamento, utilizando-se uma solução padrão de KCl (com valor de condutividade conhecida) Orion Research, Inc.,⁸ conforme equação (1):

$$1 \quad \text{Constante de célula (K)} \times \text{condutância (L)} = \text{condutividade (k)}$$

* Aço inoxidável AISI 316 para equipamento de indústria química, melhor resistência à corrosão química (Chiaverini⁴). Composição: 69,72% Fe, 18% Cr, 8% Ni, 2% Mn, 2% Mo, 0,2% C, 0,03% S, 0,045% (NBR 5601).⁵

A constante de célula (K) está relacionada às suas próprias características físicas. O valor de K , conforme a equação (2), é definido para um conjunto de eletrodos planos e paralelos, dividindo-se a distância d que os separa pela área A das placas. Assim, para o cubo de solução formado pela área de 1cm^2 , teremos

$$K = \frac{d}{A} = 1\text{cm}^{-1}$$

O valor unitário para a constante de célula tem interesse didático, uma vez que facilita os cálculos envolvidos. Contudo, as células profissionais trabalham com valores de K na faixa de valores que vai de 0,1 a 50. Essas células industriais possuem dimensões diferentes, já que a tecnologia de fabricação empregada permite que se trabalhe precisamente com áreas menores de materiais condutores. As vantagens de trabalhar com células cujo valor da constante é 0,1 está na facilidade no manuseio de um equipamento de dimensões menores e peso reduzido.

Para avaliar a curva analítica fornecida pelos sensores, compararam-se as medidas de condutividade elétrica de padrões de KCl, aferidas por um equipamento profissional (em siemens/cm), com as leituras obtidas pelo equipamento montado, em que a voltagem DC é proporcional à condutividade da solução. A leitura mais alta do voltímetro corresponderá ao valor do padrão com maior condutividade (referência), enquanto as demais serão convertidas através de simples cálculos matemáticos (proporção ou regra de três). A montagem de uma curva analítica, para uma determinada temperatura, nos permite a observação da linearidade do sensor fabricado pelos alunos.

Os equipamentos e materiais utilizados no ensaio comparativo foram:

- Condutivímetro Orion Model 105 e Sensor Orion Model 011050 – constante de célula 1.01 (platina).
- Padrões de KCl Orion/TDS Standard 0,141mS/cm (0,001mol/L) e 12,9mS/cm (0,1mol/L) – valores a 25°C.
- Padrões de KCl diluído em água 0,645mS/cm (0,005mol/L), 1,413mS/cm (0,010mol/L) e 6,450mS/cm (0,050mol/L), com precisão de 1%.
- Béquer de 100mL (6 unidades) e Pisseta de 500mL com água deionizada.

As medidas de condutividade elétrica foram realizadas da amostra de menor concentração para a maior, procedendo-se a limpeza da célula com água deionizada após cada medida. Esta seqüência de valores minimiza a contaminação dos padrões de KCl.

Num segundo tempo, alunos do curso de graduação em Engenharia de Materiais realizaram a Titulação Condutométrica de uma solução de sulfato de sódio com cloreto de bário, o sensor comercial e os sensores construídos pelos alunos do curso de Engenharia Mecânica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na curva analítica dos sensores, em medidas de condutividade elétrica de padrões de KCl, aferidos pelo eletrodo profissional Orion modelo 011050, estão na Tabela 1.

TABELA 1

Comparação entre medidas com sensor de materiais diferentes

Padrão de KCl (mol/L)	Medidas com Inox (mS)	Medidas com ródio (mS)	Medidas com ouro (mS)
0,001	0,151	0,132	0,148
0,005	0,668	0,691	0,685
0,010	1,431	1,450	1,472
0,050	6,225	6,555	6,618
0,100	12,900	12,900	12,900

Os resultados obtidos mostraram que os sensores fabricados pelos alunos do curso de graduação em Engenharia Mecânica apresentaram boa linearidade, o que pode ser comprovado no gráfico da Figura 3, quando comparados com o sensor comercial.

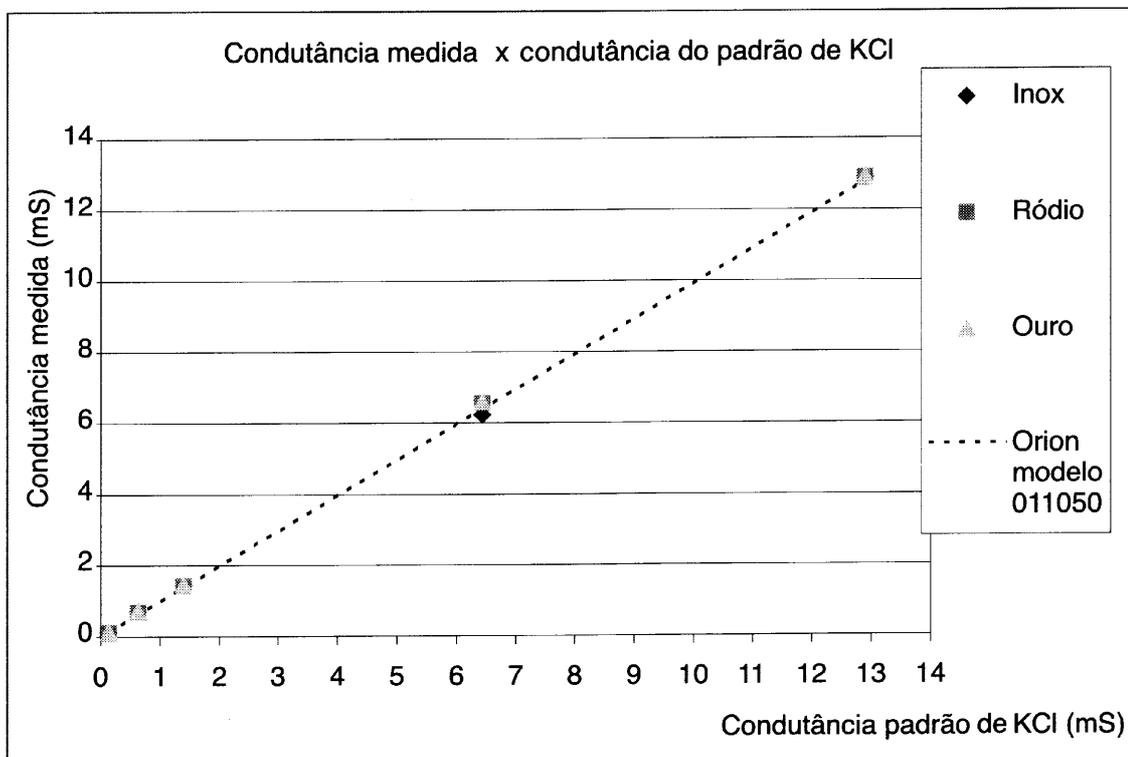


Figura 3 Medidas de condutância com sensores de materiais diferentes a 23,6°C

A análise das diferenças obtidas em relação ao valor da condutância dos padrões de KCl mostrou que os resultados das medidas efetuadas pelos sensores fabricados pelos alunos obtiveram diferenças menores de 8%. O comportamento dos materiais ensaiados está no gráfico da Figura 4, que reporta as diferenças verificadas para cada padrão de condutância utilizado.

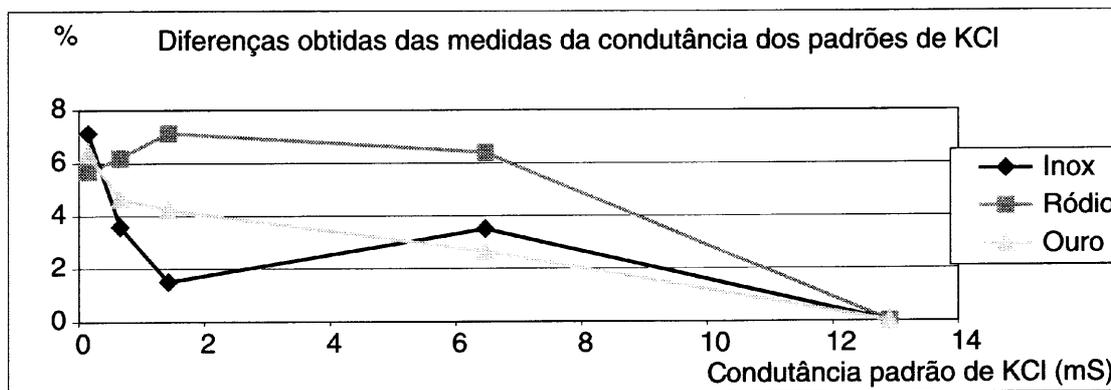


Figura 4 Medidas de condutância com sensores de materiais diferentes a 23,6°C

Analisando os valores representados no gráfico da Figura 4, percebe-se que para os padrões de KCl com menor valor de condutância foram verificadas as maiores diferenças. Esse fato deve-se à provável contaminação da amostra quando da lavagem do sensor.

A titulação condutométrica da solução de sulfato de sódio 0,05mol/L com cloreto de bário 0,05mol/L a 23°C apresentou os valores registrados no gráfico da Figura 5.

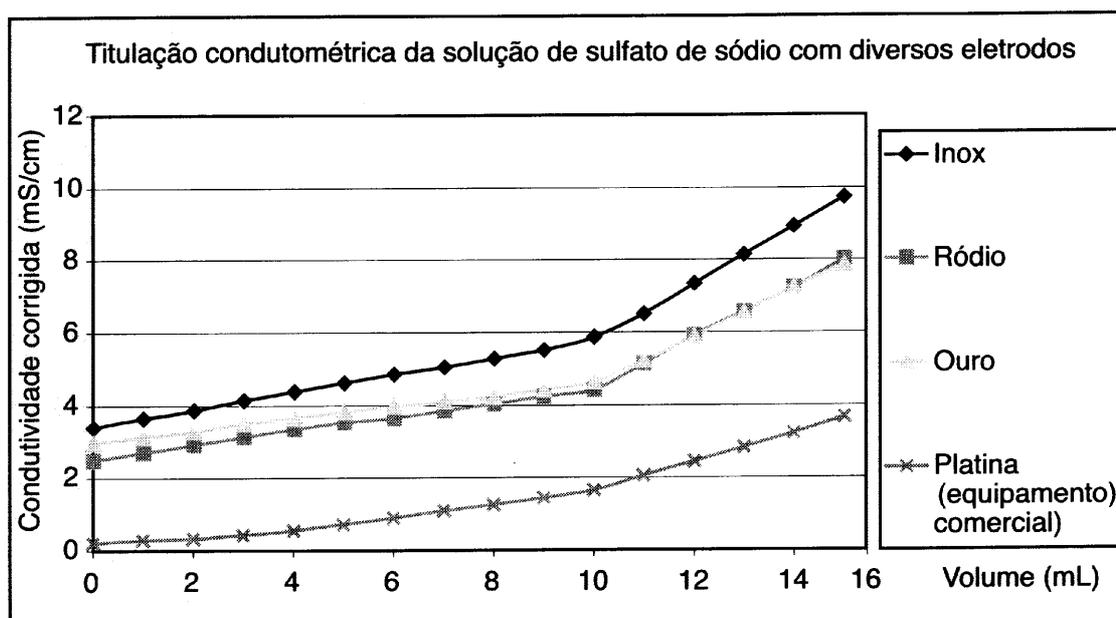


Figura 5 Variação da condutividade elétrica da solução de sulfato de sódio 0,05mol/L, durante a titulação com cloreto de bário 0,05mol/L a 23°C

A análise gráfica da variação da condutividade elétrica da solução de sulfato de sódio durante a titulação com cloreto de bário determinou o ponto de equivalência para a solução resultante. O resultado obtido com cada sensor, comparado ao equipamento comercial (sensor de platina), está na Tabela 2.

TABELA 2

Comparação entre valores obtidos para a concentração do Na_2SO_4 a 23°C

	Sensor de Inox	Sensor de ródio	Sensor de ouro	Sensor comercial
Medida	6,93g/mL	6,99g/mL	7,00g/mL	7,01g/mL
Desvio	Diferença de 1,14%	Diferença de 0,28%	Diferença de 0,14%	(referência)

Ao final deste projeto, em sintonia com os objetivos lançados, pode-se observar a contribuição decorrente da integração entre as diversas áreas da universidade, com dados obtidos nos ensaios de laboratório, levando-se à sistematização e ao aprimoramento dos conhecimentos das características do equipamento de medidas de condutividade elétrica das soluções aquosas. O trabalho e os ensaios já realizados e ainda a realizar, dentre os modelos teóricos e sua continuidade para a substituição dos equipamentos comerciais utilizados nos laboratórios de química da universidade, representam uma parcela de contribuição ao conhecimento pessoal e ao conhecimento técnico-didático adquiridos.

Os ensaios realizados e a conseqüente análise dos dados demonstraram a validade e a adequação da utilização de equipamentos com grau de sofisticação reduzido e baixo custo para desenvolvimento comparativo na análise de soluções aquosas, portanto acessíveis também à comunidade acadêmica em nível de graduação e às instituições nacionais envolvidas. Deve-se ressaltar ainda o custo deste equipamento desenvolvido na universidade, que ficou em torno de U\$ 50 (o equipamento profissional custa cerca de U\$ 1.300).

A hipótese básica da pesquisa, de que a análise da condutividade elétrica das soluções aquosas com o uso de instrumentos de baixo custo alcança resultados teóricos aceitáveis e adequados, quando comparados aos valores obtidos com os equipamentos comerciais sofisticados, mostrou-se atendida e válida, dentro dos limites impostos pela simplicidade do equipamento utilizado.

Com referência aos materiais utilizados para a fabricação dos sensores, observamos que o ouro obteve o menor desvio em relação aos resultados obtidos com o sensor comercial. Por outro lado, o aço inoxidável se mostrou o material de menor custo, porém com o maior desvio dentre os materiais ensaiados (máximo de 8%). Os resultados positivos deste trabalho servirão de ponto inicial para pesquisas de sensores de baixo custo com outras formas e dimensões expansíveis a outros materiais

4 APLICATIVO VISUAL

No presente trabalho, utilizamos um circuito que fornece voltagem DC proporcional à condutividade da solução. Levando-se em conta que a curva de resposta do sensor é bastante próxima de uma reta, não introduziremos erro significativo se trabalharmos com a interpolação linear para determinar o valor da condutividade a partir do conhecimento dos pontos extremos, ou um número maior de pontos desta reta. Contudo, a cada nova leitura faz-se necessário outro cálculo para a conversão da voltagem DC lida no voltímetro digital em condutividade, o que torna trabalhosa a tarefa de levantar vários pontos como no caso da titulação de uma solução.

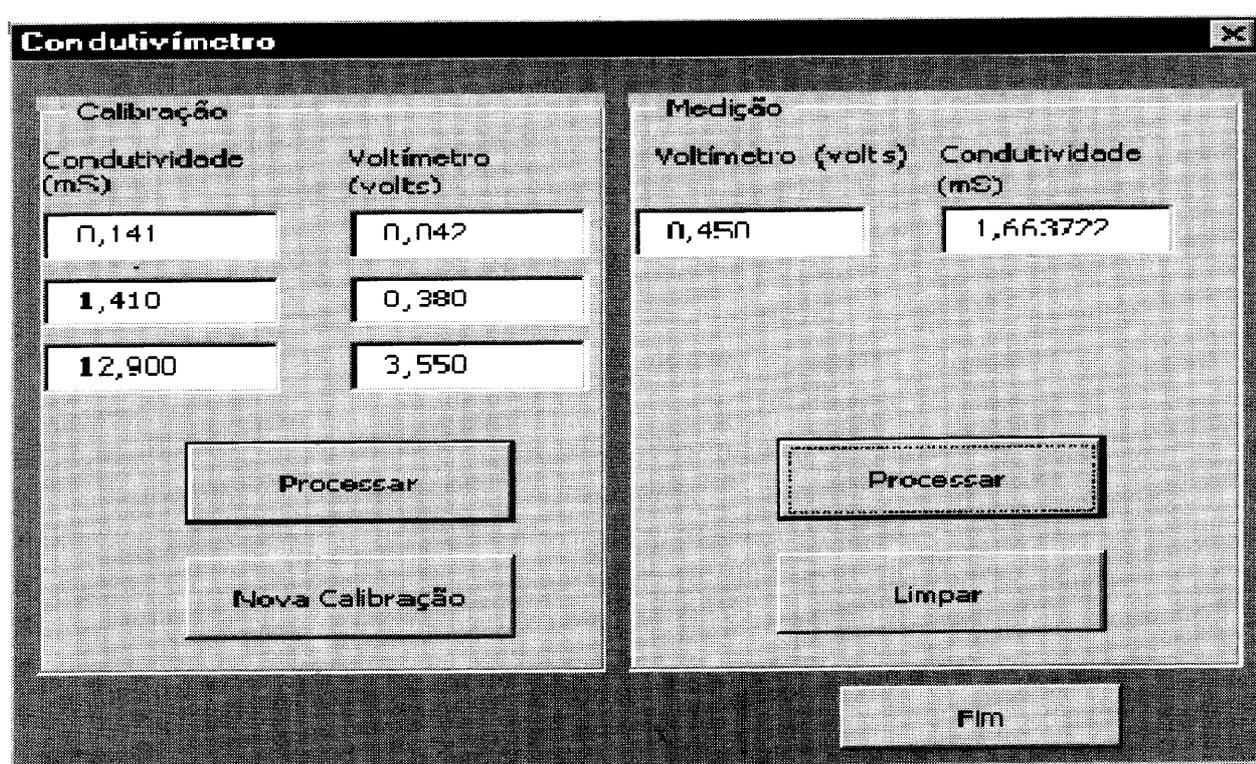


Figura 6 Aplicativo visual para conversão de voltagem DC em condutividade

Neste item apresentamos a sugestão de um software, que simplifica esta conversão. Desenvolvido em Excel com programação em Visual Basic Microsoft, o aplicativo apresenta uma tela simples e de fácil operação; a partir de dois ou mais pontos de calibração, o aplicativo está pronto para montar a curva de calibração, bastando para isso o acionamento via mouse do botão “Processar”. A partir deste ponto, o dispositivo está apto a receber uma informação em mV, correspondente à leitura da amostra reportada no voltímetro digital. Com um simples acionar do botão “Calcula”, o aplicativo fará a interpolação do ponto medido e mostrará o equivalente da medida em mS/cm.

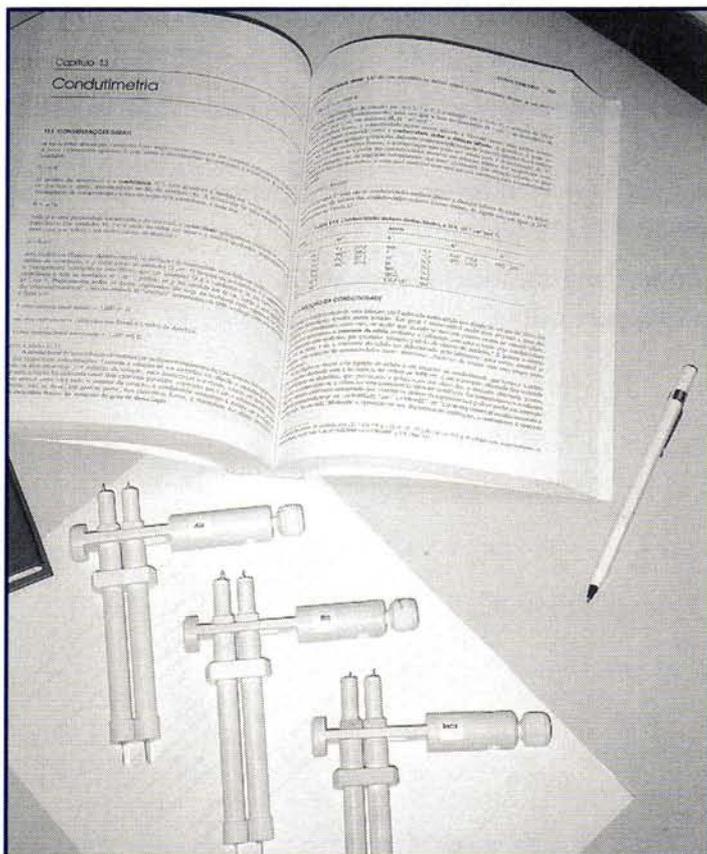
No caso de a medida resultar num ponto fora dos extremos informados para a curva de calibração, o aplicativo não terá condições de fazer a interpolação e enviará para a tela uma informação de erro, comunicando que os limites de calibração foram excedidos.

Para o caso de nova Calibração (outro sensor ou outro valor de temperatura), o aplicativo dispõe do botão “Nova Calibração”, que a partir de novos limites informados construirá uma nova curva de Calibração, que atende às novas condições de referência.

O aplicativo dispõe ainda de um botão “Limpar” para o caso de se digitarem novos valores de voltagem, visando à obtenção da condutividade correspondente. O botão “Fim” encerra o aplicativo.

5 CONCLUSÕES

Foram desenvolvidos, por alunos dos cursos de graduação em Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica, um dispositivo de medidas de condutividade elétrica em soluções aquosas, um equipamento de baixo custo e fácil construção, mostrados na Figura 7.



Este projeto, de caráter didático, foi capaz de integrar as diversas áreas científicas da universidade e contribuiu para que os alunos passassem a raciocinar cientificamente e fossem estimulados a desenvolver sua capacidade de conclusão diante de dados obtidos em ensaios científicos.

Figura 7 Sensores construídos por alunos da graduação

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos professores Dra. Márcia Guekezian, Ivanise Gauber, Henrique de Camargo Kotke e Lincoln Haruyuki Sato, pelas sugestões, e aos acadêmicos que colaboraram na concepção deste projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. STEEHLER, J.K. Should advanced instruments be used in introductory courses? *Journal of Chemical Education*, v.75, n. 3, p.274-275, 1998.
2. JEFFERY, G.H. et al. *VOGEL – Análise química quantitativa*. 5 ed. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 1989.
3. SEVILLA III, F. et al. The electrician's multimeter in the chemistry teaching laboratory. *Journal of Chemical Education*, v.70, p.580-584, 1993.
4. CHIAVERINI, V. *Aços e ferros fundidos*. 1 ed. São Paulo: ABM, 1996, p.412.
5. *NBR – 5601/1981*. Composição de aço inoxidável, 1981.
6. LANDO, R.A. & ALVES, S.R. *Amplificadores operacionais* 5 ed. São Paulo: Editora Érica, 1990.
7. ROCHA, R.T. et al. A low-cost and high-performance conductivity-meter. *Journal of Chemical Education*, v.74, n.5, p.572-574, 1997.
8. ORION RESEARCH, INC. Conductivity measurement theory and practice. The technical edge – customer service and support from Orion Research, Inc., 1999.