



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Autorizada pelo Decreto Federal nº 77.496 de 27/04/76

Recredenciamento pelo Decreto nº 17.228 de 25/11/2016



PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENAÇÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

XXIV SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEFS **SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - 2020**

Espectroscopia de impedância: modelização por circuitos equivalentes.

William Max dos Santos Silva Silva¹, José Carlos Oliveira de Jesus² e
Álvaro Santos Alves³

¹Bolsista PIBIC/CNPq, Graduando em Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail:
max.fisuefs@gmail.com

²Orientador, Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: jcojesus@uefs.br

³Orientador, Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: asa@uefs.br

PALAVRAS-CHAVE: Espectroscopia; Impedância; Circuitos.

INTRODUÇÃO

O uso da Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS, do inglês *Electrochemical Impedance Spectroscopy*), tem se mostrado uma potente e eficiente técnica investigativa. É evidente seu uso para estudo de corrosão, transporte eletrônico, qualidade alimentar, sensoriamento e caracterização de sistemas eletroquímicos.(ESTEVEES et al., 2014; AYALA, AGUDELO, VARGAS, 2012; MACDONALD, BARSOUKOV, 2005; TERUYA, 2008)

A técnica consiste em aplicar um sinal alternado (AC, do inglês *Alternate Current*) de baixa amplitude em um sistema ou circuito, e então analisar sua resposta. A análise da impedância do sistema permite obter características capacitivas, resistivas ou indutivas. Uma abordagem comum para análise são os circuitos equivalentes. Para tanto, propõem-se um circuito com resposta comparável à observada. Todavia esta abordagem apresenta dificuldades, uma vez que circuitos diferentes podem produzir respostas semelhantes.(SILVA,2013, p.4-7)

Considere uma tensão complexa de frequência angular ω , amplitude $|\mathbb{V}|$ e fase inicial $\delta_0 = \omega t_0$. $j = \sqrt{-1}$.

$$\mathbb{V}(t) = |\mathbb{V}|e^{j(\omega t - \delta_0)}. \quad (1)$$

Logo, a corrente será de mesma natureza, mas defasada da tensão excitadora, por uma diferença de fase β .

$$\mathbb{I}(t) = |\mathbb{I}|e^{j(\omega t - \delta_0 - \beta)}. \quad (2)$$

É sabido que grandezas complexas contém parte real e imaginária, logo, $\mathbb{V}(t)$ e $\mathbb{I}(t)$ podem ser expressas na forma cartesiana

$$\mathbb{V}(t) = |\mathbb{V}| \cos(\omega t - \delta_0) + j|\mathbb{V}| \sin(\omega t - \delta_0) \quad (3)$$

$$\mathbb{I}(t) = |\mathbb{I}| \cos(\omega t - \delta_0 - \beta) + j|\mathbb{I}| \sin(\omega t - \delta_0 - \beta) \quad (4)$$

A tensão e corrente nestes sistemas podem ser expressas deste modo devido a linearidade das equações diferenciais dos circuitos passivos *RLC*, ou seja, vale o princípio de superposição das soluções. (SILVA, 2013, p.9-19) Tendo em vista as equações 1 e 2, existe um fator de proporcionalidade ($e^{j(\omega t - \delta_0)}$), entre a corrente e a tensão, de sorte que é possível escrever

$$\frac{\mathbb{V}(t)}{\mathbb{I}(t)} = \frac{|\mathbb{V}|}{|\mathbb{I}|} e^{j\beta} = \mathbb{Z}. \quad (5)$$

Essa grandeza chama-se impedância, uma generalização do conceito de resistência e expressa oposição à passagem de corrente AC devido às reatâncias indutivas e capacitivas presentes no circuito. A resolução de um circuito consiste em conhecer a evolução temporal de tensões e correntes em suas várias partes, mediante a solução de equações diferenciais, quase sempre acopladas. Todavia, graças aos artifícios de Fourier e Laplace podemos escrever essas equações no domínio da frequência, onde as mesmas tornam-se simples equações algébricas, semelhantes aos problemas de análise de circuitos elementares que utilizam as leis de Kirchhoff.

Nesta perspectiva a espectroscopia de impedância visa analisar a resposta de sistemas em função da frequência. Para tal, usa-se curva de atenuação ($A(\omega)$ vs ω), Diagramas de Bode ($|Z|$ e ϕ vs ω) e Nyquist (Z'' vs Z') ajudam na interpretação de dados.

No presente trabalho, foram analisados circuitos passivos, particularmente circuitos RC série e paralelo, tanto com componentes comerciais quanto capacitores cilíndricos, construídos especialmente para esta pesquisa. A caracterização destes capacitores cilíndricos é necessária, porque serão utilizados como porta-amostras para fluidos dielétricos que serão investigados via EIS no desdobramento deste projeto.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste trabalho foram utilizados: Um gerador de sinal BK Precision®¹ modelo 4011, de 5 MHz, um osciloscópio de duplo canal BK Precision®³ modelo 2120B, de 20Mhz, um osciloscópio digital HP™² Hewlett modelo 54615B, de 500MHz, e multímetro digital Bside®, modelo ZT301. Utilizou-se também componentes elétricos comerciais diversos. Para montagem do capacitor foram usados tubos de cobre (comprimento: 1m; diâmetros: 25,55mm e 22,20mm) e *O-rings* de borracha (diâmetro:9,65mm espessura: 6,60mm).

O processo de medidas consiste em escolher a configuração que forneça os parâmetros de interesse, ou seja, trabalhar numa faixa de frequência fornecida pelo gerador que possibilite

¹Marca registrada BK Precision Corporation

³Marca registrada BK Precision Corporation

²HP é marca registrada da empresa americana Hewlett-Packard

a visualização da atenuação e variação de fase. Com o multímetro foi verificada a continuidade dos contatos elétricos bem como os valores das resistências [(100,0 ± 0,1)kΩ; (47,0 ± 0,1)kΩ] e capacitâncias [(1,011 ± 0,001) μF; (0,376 ± 0,001) nF] dos elementos.

Na produção dos capacitores foi feita a soldam de fios, para contato elétrico, em uma das extremidades de cada tubo de cobre, logo depois foram montados concentricamente, isolados por *O-rings* de borracha. Foram feitos capacitores com diferentes distâncias entre os tubos, Para a discussão de resultados, tomou-se apenas um dos capacitores cilíndricos.

Tipicamente, no canal 1 do osciloscópio é colocado o sinal de referência, chamado canal de entrada, no canal 2 mede-se o sinal em um ponto específico do circuito, chamado sinal de saída. Na tela do osciloscópio, o eixo horizontal representa o tempo e o vertical representa tensão elétrica. Com o auxílio de cursores e o *grid* é possível medir diretamente a atenuação e defasagem entre os sinais de entrada e saída. No osciloscópio HP a medida de frequência é direta, no analógico é preciso determiná-la a partir da medida do período.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todo dispositivo sob teste em um osciloscópio pode ser modelado considerando o tempo de carregamento da ponta de prova, ou seja, a interferência da mesma no experimento.(ALVES, 1998, p.30-33; Tektronix Ink®,2011) Trata-se de considerar o elemento sob medida como uma impedância, Z_2 , a ponta de prova como Z_p (um resistor (R_p) e um capacitor (C_p) em paralelo), e todo resto do circuito como também a resistência (R_g), $Z_1 + R_g$. Tendo em vista que a resistência da fonte é muito pequena se comparada às demais impedâncias presentes no circuito, esta foi desconsiderada. Para este caso a simulação está mostrada na figura 1.

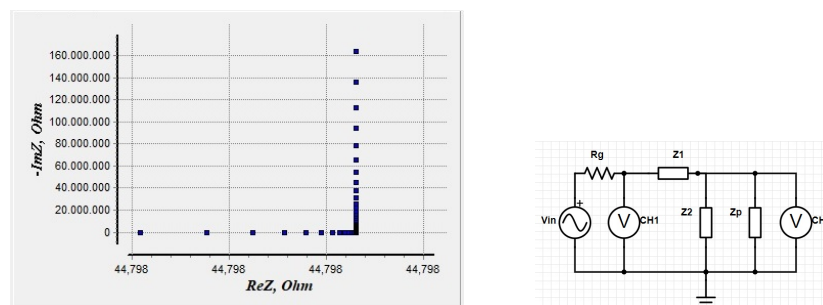


Figura 1: Diagrama de Nyquist RC-série com efeito da ponta de prova e um caso geral de medidas elétricas AC com osciloscópio.

Na simulação da figura 1 é evidenciado uma variação da parte real da impedância, este efeito deve-se à presença da capacitância da ponta de prova. Ao analisar o circuito da figura 1 a impedância total do sistema no caso do filtro passa-alta, Z_2 representa um resistor, R , e Z_1 um capacitor, C . A impedância equivalente do par Z_2 Z_p é tal que $\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_p}$, escrevendo Z_{eq} em função de $R_{eq} = \frac{RR_p}{R+R_p}$, obtém-se:

Então a impedância total e a atenuação são:

$$|Z| = \sqrt{\left[\frac{R_{eq}}{1 + (\omega R_{eq} C_p)^2}\right]^2 + \left[\frac{1}{\omega C} + \frac{\omega R_{eq}^2 C_p}{1 + (\omega R_{eq} C_p)^2}\right]^2}; A(\omega) = \frac{|V_{out}|}{|V|} = \frac{|Z_{eq}|}{|Z|}. \quad (6)$$

Nos gráfico da figura 3 o capacitor em uso é o cilíndrico. Neste caso o efeito da ponta é mais expressivo, basta observar que o diagrama de Nyquist não fecha e representa um RC-paralelo. Bem como o *gap*, a medida que ω aumenta, entre o experimento e o ajuste desconsiderando a ponta de prova.

Figura 2: Atenuação do circuito RC com capacitor cilindro preenchido com ar.

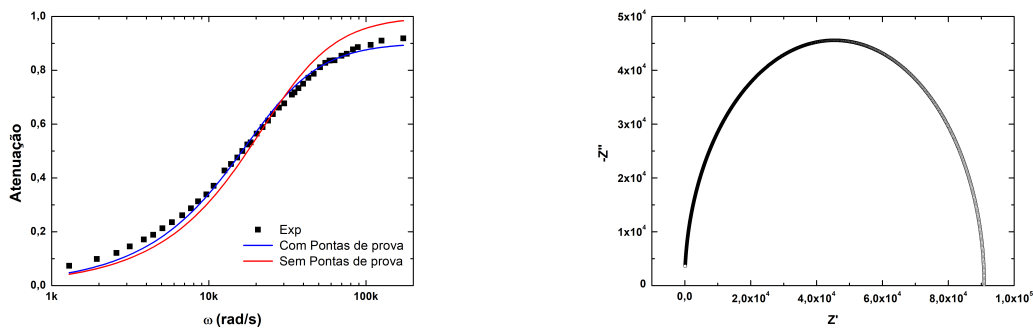


Figura 3: Atenuação e diagrama de Nyquist simulado a partir do ajuste com a ponta de prova.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia de medida da espectroscopia de impedância é sensível ao efeito das pontas de prova do osciloscópio, como se mostrou nessa investigação, podendo falsear bastante a contribuição de amostras para a impedância total do circuito. Nesse sentido, realizou-se um estudo preliminar, visando caracterizar completamente o método utilizado, para evitar a elaboração de modelos irreais para amostras fluidas, objeto desse projeto. Em uma primeira etapa, foram utilizados resistores e capacitores comerciais, em uma ampla faixa de valores, comparáveis com a resistência e a capacitância da ponta de prova. Com isso, fez-se uma crítica à metodologia de medida, estabelecendo funções de transferência que levam em consideração os efeitos não desprezíveis das pontas de prova, estabelecendo uma correção importante para estudos futuros. A partir dessa compreensão mais profunda do método, serão realizadas medidas de amostras fluidas, meios dielétricos de interesse industrial e comercial.

Referências

- TERUYA, Márcia Yumi. *Espectroscopia de impedância em soluções iônicas e mistura de etanol/água*. 2008.
- SILVA, L. M. *Introdução a análise de sistemas eletroquímicos no domínio da frequência*. UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI, 2013.
- AYALA, German; AGUDELO, Ana; VARGAS, Ruben. *Effect of glycerol on the electrical properties and phase behavior of cassava starch biopolymers*. Dyna, v. 79, n. 171, p. 138-147, 2012.
- MACDONALD, J. Ross; BARSOUKOV, E. *Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications*. History, v. 2, n. 8, p. 1-13, 2005.
- ALVES, Mário Ferreira. *ABC do osciloscópio*. Instituto Politécnico Porto Departamento de Engenharia Electrotécnica, 1998.
- Tektronix Ink®. *Introdução às pontas de prova do osciloscópio*. Disponível em: <http://www.pctronics.com.br/manuais/probes-instructors-guide-pt-5698d0884fb2b.pdf>. Acesso em 07/08/2010