

MEDIDA DE CAPACITÂNCIA POR MEIO DE CARGAS E DESCARGAS PERIÓDICAS*

ROBERTO HESSEL e ANTÔNIO J. BUCALON

Departamento de Física, Instituto de Geociências e Ciências Exatas,
UNESP, Rio Claro

RESUMO

Um método simples para medir capacitância consiste em repetir, a uma frequência suficientemente alta, a operação de carregar um capacitor e descarregá-lo através de um medidor de corrente, usando para isso um comutador apropriado. Tal procedimento permite relacionar capacitância com frequência de comutação, diferença de potencial e corrente ou então capacitância com frequência e resistência. Esse método, conhecido desde o fim do século, foi adotado tanto pelos autores do projeto PSSC quanto por aqueles do projeto Nuffield para medir capacitância.

A finalidade deste trabalho é descrever uma montagem semelhante àquelas utilizadas nesses projetos e depois, a título de aplicação, mostrar como podemos utilizá-la para medir a permissividade do vácuo a menos de 2%.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os diversos métodos disponíveis para medir capacitância, existe um que usa a técnica de carregar rápida e regularmente um capacitor e descarregá-lo através de um medidor de corrente. Essa operação é feita por meio de um dispositivo comutador apropriado. Na montagem esquematizada na Figura 1 o capacitor de capacitância C é carregado a uma diferença de potencial V , quando a chave está na posição p , e descarregado através de um medidor de corrente D.C. (M) quando está na posição q . Se essa seqüência de operações for feita a uma frequência (f) suficientemente alta, o ponteiro do medidor sofrerá uma deflexão constante, indicando conseqüentemente uma corrente média I .

Seja Q a carga armazenada pelo capacitor em cada operação. Como I é numericamente igual à carga que passa através do medidor em cada segundo,

$$I = f \cdot Q \quad (1)$$

*Trabalho financiado pela Comissão de Projetos Especiais da UNESP.

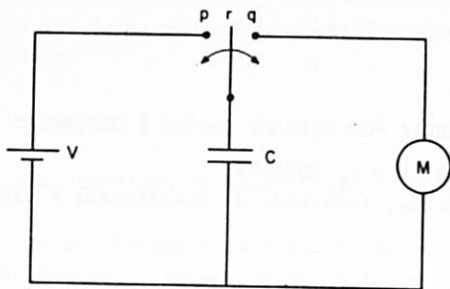


Figura 1 - Arranjo experimental para medir capacitância.

Mas como $Q = CV$, resulta, também, $I = fCV$, ou

$$C = \frac{I}{f \cdot V} \quad (2)$$

Desta maneira, a capacitância pode ser obtida através de leituras num voltímetro e num medidor de corrente e da medida da frequência de comutação.

A montagem descrita é simples o bastante para motivar, a nível de 2º ou 3º grau, a realização de práticas de laboratório que envolvam medidas de capacitância. Ela tem sido empregada, por exemplo, nos projetos PSSC⁽¹⁾ e Nuffield⁽²⁾. Ambos a utilizam para introduzir o conceito de capacitância ou para estudar associações de capacitores. O projeto Nuffield, num contexto mais avançado, também a utiliza para determinar a permissividade do vácuo ou para estudar as propriedades de capacitores de placas paralelas.

2. O DISPOSITIVO COMUTADOR

A peça fundamental na montagem que acabamos de descrever é o dispositivo comutador e o ponto crítico no seu projeto é a duração do contato. Isto porque devemos ter garantia de que o capacitor está sendo carregado ou descarregado completamente durante cada operação do comutador.

Vários modelos de comutadores já foram testados⁽³⁾. Os mais recentes são feitos com transistores⁽⁴⁾ ou com uma lâmina vibrante encapsulada⁽⁵⁾. O PSSC, em particular, utiliza um comutador construído sobre o eixo de um pequeno motor elétrico alimentado por pilhas de telefone. A frequência de rotação do motor, que pode variar

em função do número de pilhas empregado para alimentá-lo, é medida por meio de um estroboscópio. Já o Nuffield utiliza uma lâmina vibrante encapsulada, conhecida como chave de lâmina de polo duplo, que consiste numa cápsula de vidro (Figura 2b) contendo em seu interior três lâminas, das quais duas, p e r , são de material ferromagnético. Um dos contatos é normalmente fechado e o outro só se fecha quando a cápsula está imersa num campo magnético. A comutação é feita colocando-se a cápsula no interior de uma bobina ligada em série com um diodo e uma fonte de corrente alternada (Variac ou gerador de áudio). Quando um pulso de corrente suficientemente intenso atravessa a bobina, as lâminas r e p magnetizam-se, atraem-se e põem-se em contato; quando o diodo bloqueia o pulso, elas se desmagnetizam e r torna a juntar-se rapidamente com q . Desde que a frequência de pulsos não exceda o limite estabelecido pelo fabricante (até 900 hertz para alguns modelos), os contatos abrir-se-ão e fechar-se-ão na mesma frequência da fonte de alimentação.

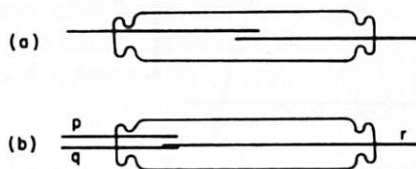


Figura 2 - Chaves de lâmina. a) Chave simples. b) Chave de polo duplo.

3. DESCRIÇÃO DA NOSSA MONTAGEM

3.1. O DISPOSITIVO COMUTADOR

Depois de termos trabalhado por alguns anos tanto com a montagem do PSSC quanto com a do Nuffield decidimos criar o nosso próprio dispositivo comutador (Figura 3). Ele consta de uma chave de lâmina de polo duplo, um pequeno ímã na forma de um U e uma "hélice plana" de várias pás de material ferromagnético (Figura 4), como por exemplo chapa de aço zincada, usada na confecção de calhas (daqui para frente ela será designada simplesmente de hélice para simplificar a linguagem). A hélice é fixada no eixo de um pequeno motor A.C. (motor de indução monofásico de polo sombreado), cuja rotação se mantém razoavelmente constante mesmo quando a tensão que lhe é aplicada varia (para uma tensão abaixo de um certo valor o motor simplesmente deixa de girar).

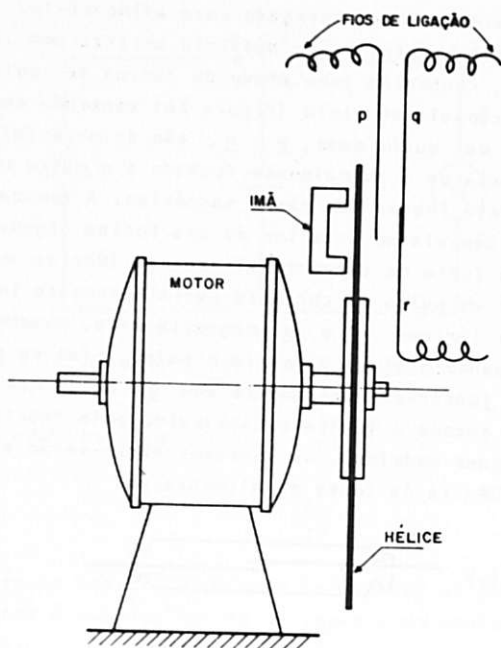


Figura 3 - Dispositivo comutador.

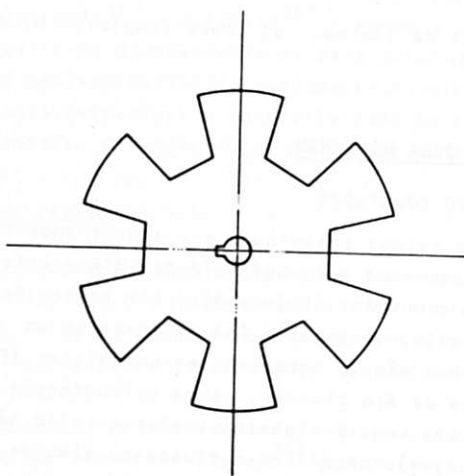


Figura 4 - Uma "hélice plana" de seis pás.

Enquanto uma das pás da hélice se interpõe entre o ímã e a chave, q e r permanecem em sua posição normal, isto é, em contato, pois a pá atua como uma blindagem para o campo magnético (as linhas de fluxo magnético seguem, preferencialmente, pela pá). Quando é um interstício que se interpõe, p e r é que estarão em contato pois agora elas são magnetizadas uma vez que a blindagem deixa de existir. Se a hélice tiver n pás e o eixo do motor girar a uma frequência ϕ , a frequência de comutação (f) será dada por

$$f = n \cdot \phi \quad (3)$$

Nosso motor gira a uma frequência de 29,0 hertz e nossas hélices têm um número de pás que varia de 2 a 12. Conseqüentemente podemos operar com frequências de comutação na faixa de 58,0 a 348 hertz.

Os resultados mostrados nas Figuras 5 e 6 ilustram o desempenho da montagem proposta. Para obter os dados da Figura 5 utilizamos um miliamperímetro de fundo de escala 1 mA, 1 pilha de 1,5 volts, um capacitor de poliéster de 1 microfarad ($\pm 10\%$) e hélices de 2, 3, 4, 6, 8 e 12 pás. A carga armazenada pelo capacitor, dada pela inclinação da reta, é a mesma quer usemos a hélice de 2 ou a de 12 pás.

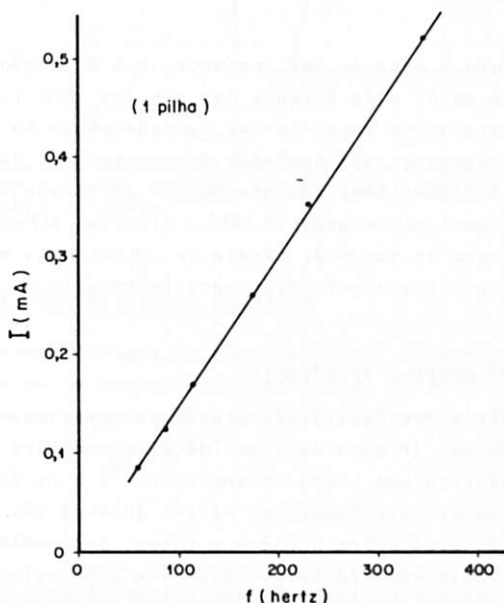


Figura 5 - A corrente em função da frequência de comutação.

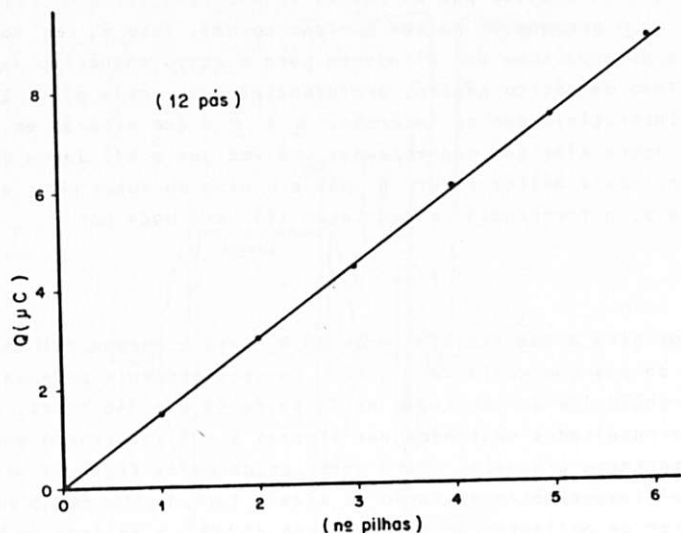


Figura 6 - A quantidade de carga armazenada pelo capacitor em função da diferença de potencial aplicada (número de pilhas em série).

Isto nos mostra que a duração dos contatos, que é função da frequência de rotação do motor e da largura das pás (ou dos interstícios) foi suficiente para que o capacitor se carregasse ou se descarregasse completamente durante cada operação do comutador. Para obter os dados da Figura 6 trabalhamos com uma hélice de 12 pás, um capacitor de políester de 1 microfarad ($\pm 10\%$), diversas pilhas de 1,5 volts e um miliamperímetro de fundo de escala de 10mA. Esta experiência, em particular, é utilizada pelo PSSC para introduzir o conceito de capacitância.

3.2. TÉCNICA PARA MEDIR A FREQUÊNCIA

Para medir a frequência de rotação do motor usamos uma chave simples de lâminas (Figura 2a), um ímã e um marcador de tempo, do mesmo tipo já descrito num trabalho anterior⁽⁶⁾, e na outra extremidade do eixo do motor instalamos uma hélice de duas pás (Figura 7). Quando uma das pás está entre o ímã e a chave, o circuito está aberto, em caso contrário está fechado. Assim, a cada rotação do motor o circuito fecha duas vezes e o marcador registra dois pontos na fita. Contando o número de pontos que são registrados pelo marcador

durante um certo intervalo de tempo Δt (medido com um cronômetro), podemos determinar a frequência de rotação (ϕ) do motor pela relação

$$\phi = \frac{n^{\circ} \text{ de pontos}}{2 \cdot \Delta t} \quad (4)$$

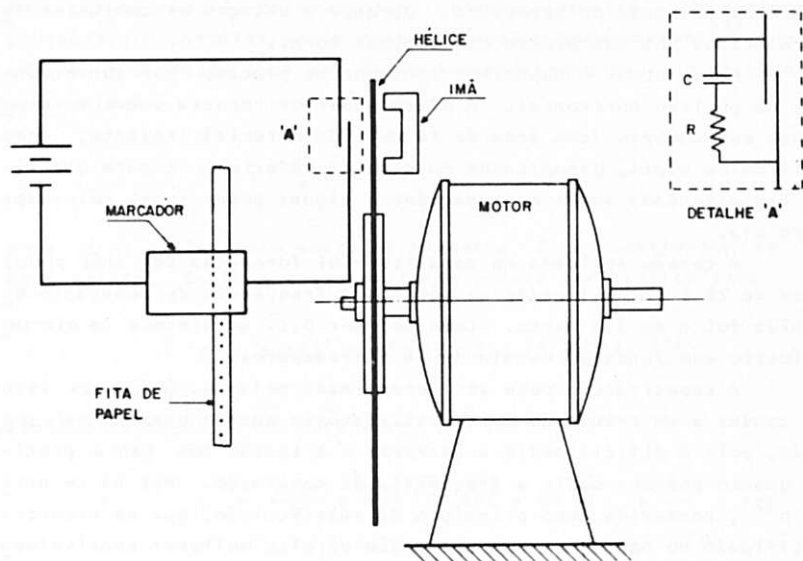


Figura 7 - Arranjo experimental para medir frequência. O detalhe 'A' mostra como podemos evitar o faiscamento durante a abertura da chave.

4. MEDIDA DA PERMISSIVIDADE DO VÁCUO

A permissividade do vácuo pode ser determinada a partir da capacitância de um capacitor de dimensões conhecidas. Nós escolhemos um capacitor de placas paralelas, cuja capacitância, ignorando o efeito de borda é dada por

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (5)$$

onde A é a área de cada placa, d a distância entre elas e ϵ_0 a permissividade do vácuo. Em princípio, o isolante entre as placas deveria ser o vácuo, mas na prática podemos usar o próprio ar a me-

nos que se pretenda fazer uma medida com extrema precisão. Este procedimento se justifica porque a permissividade relativa do ar, nas condições normais de temperatura e pressão, é igual a 1,0005.

Para construir as placas do capacitor nós colamos, com cola para fôrmica, chapas quadradas de aço zincado, de 0,4 mm de espessura e área aproximada de 0,25 m², sobre placas de madeira aglomerada de 3/4 de polegada de espessura. Durante a secagem os conjuntos foram mantidos sob uma prensa por algumas horas.

Para formar o capacitor montamos as placas, por conveniência, na posição horizontal. A placa superior repousa sobre nove pequenos espaçadores (com área de 10 mm²) de material isolante, como acrílico ou vinil, depositados em cima da inferior. E para que fique bem assentada sobre os espaçadores alguns pesos foram colocados sobre ela.

A tensão aplicada no capacitor foi fornecida por três pilhas secas de 22,5 volts ligadas em série e a frequência de comutação escolhida foi a de 348 hertz. Como medidor D.C. utilizamos um microamperímetro com fundo de escala de 50 microamperes.

A capacitância pode ser determinada pela eq. (2), mas isso não conduz a um resultado muito satisfatório quando queremos mais precisão, pois é difícil medir a corrente e a tensão com tanta precisão quanto podemos medir a frequência de comutação. Mas há um artifício (7), conhecido como princípio da substituição, que se encontra justificado no apêndice e cuja aplicação permite melhorar sensivelmente a medida. Esse artifício consiste em desligar o comutador e inserir entre os pontos *p* e *q* do circuito da Figura 1 um resistor variável de precisão, que deverá ser ajustado de tal forma a fazer o microamperímetro indicar a mesma corrente que era indicada quando o comutador estava ligado. (Como resistor variável empregamos alguns resistores de 1 megohm com tolerância de 1%, facilmente encontrados no mercado, e mais uma caixa de resistores de precisão, ligados em série.) Com isso a eq. (2) assume a forma

$$C = \frac{1}{f \cdot R} \quad (6)$$

Deste modo podemos obter *C* com um erro em torno de 1%, pois a frequência de comutação é conhecida a menos de 0,5% e a resistência a menos de 1%.

A capacitância que desejamos medir é aquela entre as placas. Entretanto existem, inevitavelmente, capacitâncias parasitas - por exemplo, a capacitância entre as placas e os fios de ligação. Além das capacitâncias parasitas temos que considerar o efeito da

borda. Quando se deduz a fórmula (5), supõe-se que o campo elétrico é uniforme no espaço entre as placas e cai bruscamente a zero fora dele, o que, obviamente, não é verdade. O campo elétrico diminui gradualmente quando nos aproximamos das bordas das placas e continua não-nulo fora da região entre elas. Como resultado, a capacitância medida será maior que a prevista. Isto significa que devemos corrigir a área A antes de levá-la para a eq. (5). Há muitas expressões que permitem fazer essa correção. Segundo Bohn⁽⁸⁾, por exemplo, a correção pode ser feita acrescentando ao lado do quadrado a quantidade

$$\Delta \ell = \frac{d}{2\pi} \ln \frac{2\pi \ell}{d} \quad (\text{se } \ell \gg d) \quad , \quad (7)$$

onde d é a distância entre as placas e ℓ o comprimento do lado do quadrado. Então a área corrigida poderá ser escrita como

$$A = (\ell + \Delta \ell)^2 = \ell^2 + 2\ell \cdot \Delta \ell = \ell^2 + \frac{\ell d}{\pi} \ln \frac{2\pi \ell}{d} \quad .$$

Levando esse resultado para a eq. (5) resulta:

$$C = \frac{\epsilon_0 \ell^2}{d} + \frac{\epsilon_0 \ell}{\pi} \left[\ln 2\pi \ell + \ln \frac{1}{d} \right] \quad . \quad (8)$$

Nessa expressão, a 1ª parcela entre os colchetes não depende de d , ao contrário da 2ª que depende mas varia lentamente com ele, devido à presença do logaritmo. Se escolhermos, por exemplo, espaçadores com espessuras que vão de 1,5 a 5 mm, a capacitância associada ao efeito de borda e dada pelo 2º termo do 2º membro da expressão (8) variará de 11 a 9 pF, ao passo que $\epsilon_0 \ell^2/d$ variará de 1500 a 500 pF, aproximadamente. Isto significa que a variação da capacitância associada ao efeito de borda (C_b) será de 2/1000 com relação à variação da capacitância sem a correção. Esta variação é imperceptível num gráfico de C em função de d . Além da capacitância associada ao efeito de borda existem as capacitâncias parasitas (C_p) que estão em paralelo com a capacitância das placas e são independentes de d . Desta forma podemos escrever

$$C = \frac{\epsilon_0 \ell^2}{d} + C_0$$

onde a correção $C_0 = C_b + C_p$ é praticamente constante, desde que C_p independe de d e C_b varia lentamente com d , se $\ell \gg d$. Es

sa análise nos sugere um método para eliminar a influência, não só da capacitância associada ao efeito de borda como das capacitâncias parasitas, sobre o valor extraído para a permissividade. Basta medir a capacitância para vários espaçamentos e levantar um gráfico de C versus $1/d$, que deverá resultar numa reta. A intersecção com o eixo de C dará o valor C_0 e a inclinação será igual a $\epsilon_0 A$. A Figura 8 ilustra um resultado típico. A espessura dos espaçadores utilizados variou de 1,60 a 5,92 mm e a área de cada placa mediu $0,2515 \text{ m}^2$.

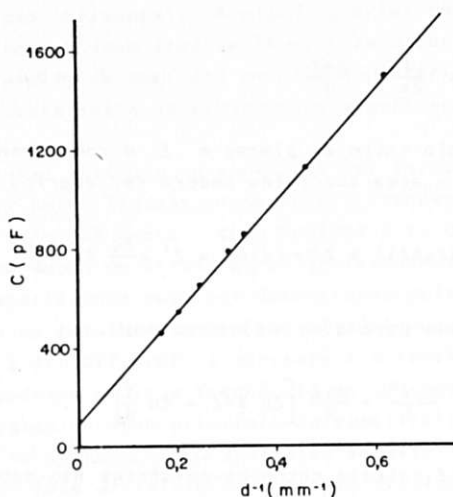


Figura 8 - Variação da capacitância com o inverso da separação entre as placas.

A permissividade do vácuo, obtida da inclinação da reta, resulta igual a $8,9 \times 10^{-12} \text{ F/m}$. Depois de repetir o experimento por mais de uma vez, podemos garantir esse resultado a menos de $0,1 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, de modo que o valor de ϵ_0 determinado pela nossa montagem resulta igual a

$$(8,9 \pm 0,1) \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

5. DISCUSSÃO FINAL

O método para medida de capacitância que utilizamos é designado por alguns ⁽⁹⁾ como "Método de Fleming e Clinton", embora a con

tribuição deles, como eles mesmo afirmam no seu trabalho⁽¹⁰⁾ datado de 1903, tenha se limitado à construção de uma chave rotativa que fosse satisfatória do ponto de vista prático. Segundo Rosa e Dorsey⁽¹¹⁾, o método já havia sido empregado em 1881.

Esse método é, ainda, uma variação de um outro conhecido como "Ponte D.C. de Maxwell com Dispositivo Comutador" que é utilizado para medir capacitância com grande precisão⁽¹²⁾. Aliás, quando Rosa e Dorsey se propuseram a fazer, em 1907, uma nova determinação da permissividade do vácuo a partir de medidas de capacitância⁽¹³⁾, que se tornou um exemplo clássico de trabalho experimental de precisão⁽¹⁴⁾, a montagem escolhida como a melhor, depois de uma análise cuidadosa⁽¹⁵⁾, foi a ponte de Maxwell. Essa ponte, entretanto, é mais difícil de ser utilizada num laboratório didático que a montagem de Fleming e Clinton.

Tanto o método de Maxwell quanto o de Fleming e Clinton têm suas limitações. Em princípio eles se prestam para determinação absoluta⁽¹⁶⁾ de capacitância ou para medir capacitâncias de capacitores com baixo fator de dissipação, tais como os de ar, de mica ou daqueles construídos com filmes plásticos metalizados, como por exemplo o poliestireno ou poliéster. Além disso, eles podem também ser indicados para medir frequência de rotação⁽¹⁷⁾.

No passado, a maior dificuldade do método sempre esteve associada ao dispositivo comutador. Na montagem proposta no PSSC essa dificuldade ainda permanece já que o contato é do tipo escova atritando com eixo de motor. A utilização da chave de lâmina encapsulada, da forma como o faz o projeto Nuffield, resolve o problema mas nos obriga a usar um gerador de áudio, se quisermos trabalhar com várias frequências. Por sua vez, o dispositivo comutador que projetamos elimina o uso do gerador de áudio, garante um contato seguro (já que também usamos a chave de lâminas encapsulada) e permite exercer controle sobre a duração do contato de forma simples e confortável, desde que esta duração é proporcional apenas à largura das pás (ou interstícios), se a rotação do motor é constante. Além disso, com a montagem proposta, o motor trabalha de forma praticamente livre (sem esforço), o que garante uma frequência de rotação bastante estável.

Com relação à experiência para determinar a permissividade do vácuo, poderíamos ter trabalhado com anel de guarda para eliminar o problema causado pelo efeito de borda. Embora isso seja possível⁽¹⁸⁾, a análise que fizemos nos mostra que não obteríamos um resultado melhor por isso, de modo que a utilização do anel de guarda complicaria desnecessariamente a montagem proposta (é claro que a situação seria diferente se pretendêssemos medir a permissividade do vácuo

com uma tolerância da ordem de 0,1%).

Finalmente, a idéia de variar a freqüência de comutação, mantendo a rotação do motor e utilizando hélices intercambiáveis, com diferentes números de pás, facilita o trabalho do aluno já que basta medir a freqüência uma única vez. E isto ele pode fazer, com a técnica descrita, de forma direta e precisa, no sentido de que medidas com tolerância de 0,5% são facilmente conseguidas. Além do mais, adotando essa idéia, podemos escolher um motor de rotação baixa, cuja freqüência pode ser medida com técnicas relativamente simples, como por exemplo, a que propusemos (o nosso marcador responde bem até a uma freqüência em torno de 80 hertz).

Agradecemos à Comissão de Projetos Especiais (CPE) da UNESP pela ajuda financeira recebida e ao Sr. Vitor H. Zumpano pelas contribuições de ordem técnica. Agradecemos, também, aos professores Alfredo P.N.R. Galeão, Fernando D. Prado e Renê A.M. Alfaro, quer pelas discussões que mantiveram conosco, em diferentes fases do projeto, quer pela leitura do manuscrito.

APÊNDICE*

A seguir damos uma explicação bastante idealizada da resposta de um microamperímetro a uma excitação periódica de pulsos de corrente e também uma justificativa da validade do método da substituição.

Em primeiro lugar vamos supor que as descargas do capacitor através do microamperímetro possam ser consideradas como uma série de pulsos de corrente de curtíssima duração, mas de modo que a área abaixo de cada pulso seja igual à carga do capacitor. Em outras palavras:

$$Q = \int_t^{t+\Delta t} Idt' \quad , \quad \Delta t \rightarrow 0 \quad . \quad (1a)$$

Suponhamos, ainda, que a resposta do microamperímetro a cada excitação seja da forma

$$\delta(t) = \delta_m e^{-t/\tau} \quad , \quad (2a)$$

*As deduções apresentadas neste apêndice foram desenvolvidas pelo prof. Renê A.M. Alfaro, UNESP, Rio Claro.

onde $\delta(t)$ é a deflexão do ponteiro em função do tempo, δ_m sua deflexão máxima imediatamente após o pulso e τ o tempo característico que dá uma medida do tempo necessário para que o microamperímetro se recupere da excitação.

Finalmente, façamos a hipótese de que a amplitude máxima, δ_m , é proporcional à área abaixo do pulso excitador, ou seja, que $\delta_m = \alpha Q$, onde α é uma constante característica do medidor em questão.

Quando o medidor é submetido a uma série de excitações, a resposta, num determinado momento, será a soma das respostas à cada excitação individual conforme ela esteja evoluindo naquele momento. Esta é a base da teoria da resposta linear. A Figura 9 mostra uma sucessão de excitações e a resposta a cada excitação. Por exemplo, no instante t'_1 , tomado no intervalo $nT < t'_1 < (n+1)T$, a resposta observada será a soma das amplitudes de cada excitação nesse instante.

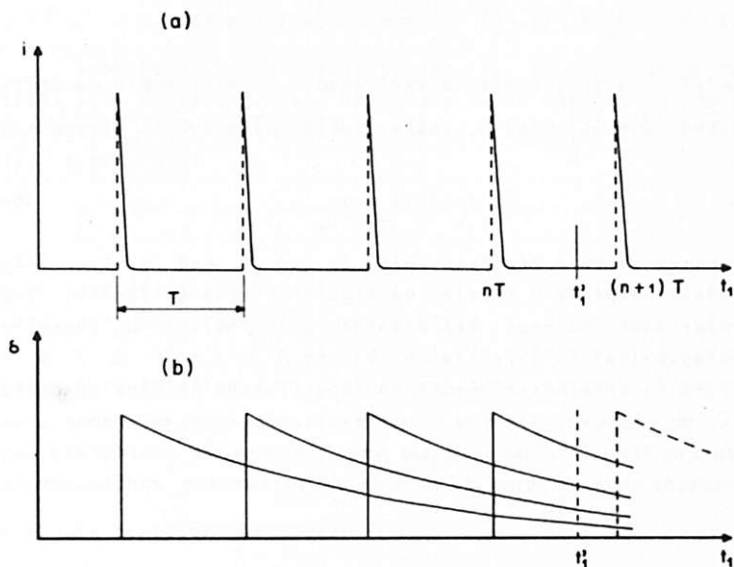


Figura 9 - a) Sucessão de excitações. b) Resposta a cada excitação.

Assim

$$\delta = \delta_m \left[e^{-\frac{t_1'}{\tau}} + e^{-\frac{t_1' - T}{\tau}} + e^{-\frac{t_1' - 2T}{\tau}} + \dots + e^{-\frac{t_1' - nT}{\tau}} \right]$$

Fazendo $t'_1 = nT + t$ e rearranjando os termos, resulta

$$\delta = \delta_m e^{-t/\tau} \left[1 + e^{-T/\tau} + e^{-2T/\tau} + \dots + e^{-nT/\tau} \right], \quad (3a)$$

onde as parcelas entre os colchetes formam uma s\u00e9rie geom\u00e9trica de raz\u00e3o $e^{-T/\tau} < 1$. O estado estacion\u00e1rio, alcan\u00e7ado quando $n \rightarrow \infty$, ser\u00e1 dado ent\u00e3o por

$$\delta(t) = \delta_m \frac{e^{-t/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}}, \quad 0 \leq t \leq T. \quad (4a)$$

Se a freq\u00fc\u00eancia de excita\u00e7\u00e3o \u00e9 tal que $T \ll \tau$, a eq. (4a) pode ser substitufda pela express\u00e3o

$$\delta(t) \approx \tau \delta_m f \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad \text{com} \quad 0 \leq t \leq T,$$

onde $f = 1/T$ \u00e9 a freq\u00fc\u00eancia de excita\u00e7\u00e3o. O valor m\u00e9dio da deflex\u00e3o dado por $\bar{\delta} = \frac{1}{T} \int_0^T \delta(t) dt$ ser\u00e1, ent\u00e3o, $\bar{\delta} = \tau \delta_m f \cdot \left(1 - \frac{T}{2T}\right)$ ou

$$\bar{\delta} \approx (\alpha\tau) f \cdot Q, \quad (5a)$$

se levarmos em conta a hip\u00f3tese feita de que $\delta_m = \alpha Q$ e $1 \gg T/2\tau$. Este resultado explica o gr\u00e1fico da Figura 5. Ele evidencia, tamb\u00e9m, a import\u00e2ncia do papel representado pela in\u00e9rcia do ponteiro, pois a rela\u00e7\u00e3o (5a) s\u00f3 \u00e9 v\u00e1lida se $T \ll \tau$.

Para entendermos o m\u00e9todo da substitui\u00e7\u00e3o devemos encontrar a resposta do microamper\u00edmetro a uma excita\u00e7\u00e3o constante, como a que est\u00e1 mostrada na Figura 10. Uma excita\u00e7\u00e3o desse tipo pode ser considerada como uma combina\u00e7\u00e3o de pequenos pulsos de corrente que se sucedem continuamente.

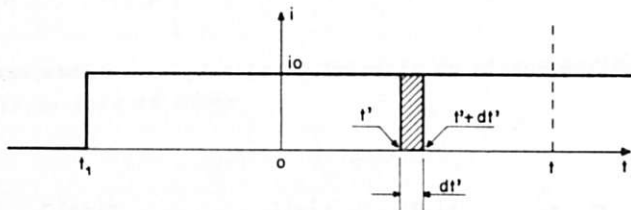


Figura 10 Uma excita\u00e7\u00e3o constante.

A Figura 10 mostra um desses pulsos acontecendo no instante t' . A resposta do microamperímetro a esse pulso será dada por

$$d\delta = \alpha e^{-\frac{t-t'}{\tau}} dQ$$

onde $dQ = I_0 dt'$. Disto segue que

$$\delta = I_0 \alpha \int_{t_1}^t e^{-\frac{t-t'}{\tau}} dt' .$$

O valor dessa expressão para $t_1 \rightarrow +\infty$, que corresponde ao estado estacionário, é então

$$\delta = I_0 \alpha \tau . \quad (6a)$$

Suponhamos agora que se ajuste I_0 de modo que a deflexão sofrida pelo ponteiro seja a mesma que havia sofrido quando pelo medidor passou uma sucessão de excitações. Então de (6a) e (5a), resulta $I_0 \alpha \tau = \alpha Q f$ ou

$$I_0 = f.Q = f.CV . \quad (7a)$$

Mas no caso do método da substituição, como vimos, o ajuste de I_0 se dava pela variação de uma resistência R inserida entre os pontos p e q do circuito da Figura 1, de modo que $I_0 = V/R$. Comparando este resultado com a expressão (7a), obtemos finalmente,

$$C = \frac{1}{fR}$$

que é onde pretendíamos chegar.

REFERÊNCIAS

- (1) PSSC, Física: Guia del Laboratorio, 3ª ed., Barcelona, Editorial Reverté, S.A., 1973. Experimento 39, p. 85.
- (2) a) Nuffield Advanced Science, Physics: Students' Laboratory Book, England, Penguin Books, 1972, p. 17-9, 59-61 e 99-100.
- b) Nuffield Advanced Science, Physics: Teachers Guide - Unit 3, Field and Potential, England, Penguin Books, 1971, p. 22-4, 28-9 e 32.

- c) Nuffield Advanced Science, Physics: Teachers' Handbook, England, Penguin Books, 1971, p. 175.
- (3) J.A. Fleming & W.C. Clinton, "On the Measurement of Small Capacities and Inductances", Phil. Mag. S.6, 5(29), 493-511, 1903.
- (4) R.G. Martin, "An Electronic 'Reed Switch'", S.S.R., 62(218), 117-8, 1980.
- (5) a) G.A.G. Bennet, "Electricity and Modern Physics", 2ª ed., London, Edward Arnold, 1981, p. 167-8.
b) Ver ref. 2a.
- (6) R. Hessel, "Descrição e Uso de um Aparelho para o Estudo da Dinâmica da Rotação", Rev. Ens. Fís. 5(2), 21-32, 1983.
- (7) Advanced Undergraduate Laboratory Experiments in Physics, Lloyd W. Taylor Manual, Massachusetts, Addison-Wesley, 1961, p. 332.
- (8) E.V. Bohn, "Introduction to Electromagnetic Field and Waves", Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company, 1968, p. 131.
- (9) a) Ver ref. 7, p. 331.
b) D.S. Ainslie, "Motor-Driven Vibrator Units for the Measurement of Capacitance", Am. J. Phys. 20, 52-3, 1952.
- (10) Ver ref. 3.
- (11) E.B. Rosa & N.E. Dorsey, "A Comparison of the Various Methods of Determining the Ratio of Electromagnetic to the Electrostatic of Electricity", Bulletin N.B.S. 3(4), 605-22, 1907.
- (12) B.M. Stout, "Curso Básico de Medidas Elétricas", Tradução de A. B. de Lima, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1975, Vol. 2, p. 273-4.
- (13) E.B. Rosa & N.E. Dorsey, "A New Determination of ratio of the Electromagnetic to Electrostatic Unit of Electricity", Bulletin N.B.S. 3(3,4), 433-604, 1907.
- (14) E.R. Cohen et al., "The Fundamental Constants of Physics", New York, Interscience Publishers, Inc., 1957, p. 112.
- (15) Ver. ref. 11.
- (16) Para a definição do que vem a ser uma medida absoluta, ver ref. 7, p. 327.
- (17) D.M. Considine (ed.), "Process Instruments and Controls Handbook", 2ª ed., New York, McGraw-Hill Book Company, 1974, Seção 9-48.
- (18) Ver ref. 7, p. 332.