

Capacitores Eletrolíticos de Alumínio: Alguns cuidados e considerações práticas

Ewaldo L. M. Mehl (*)

Os Capacitores Eletrolíticos de alumínio, entre os diversos tipos de capacitores disponíveis, são extremamente importantes nos circuitos eletrônicos, principalmente porque apresentam valores elevados de capacitância em volume reduzido. É possível obter-se com essa tecnologia capacitâncias de até 1 F, com custos razoáveis. No entanto, principalmente para aqueles que travam os primeiros contatos com a eletrônica, chama logo a atenção a particularidade de que tais componentes apresentam-se com uma polaridade definida, ao contrário dos resistores, indutores e capacitores não-eletrolíticos, que são tipicamente componentes sem polaridade pré-definida. Porquê isso ocorre? Quais são os cuidados a serem tomados com estes capacitores?

1. Conceitos Fundamentais sobre Capacitores

Todo capacitor se compõe de duas partes condutoras (chamadas *armaduras*) separadas por um material isolante (ou material *dielétrico*). Supondo as armaduras como duas placas metálicas planas (Fig. 1), tendo entre elas uma folha de dielétrico, a capacitância (C) desse conjunto é dada por:

$$C = \epsilon_o \cdot \epsilon \cdot \frac{A}{d} \quad \text{Eq. 1}$$

onde: C = capacitância

A = área de cada armadura

d = espessura do dielétrico

ϵ_o = constante dielétrica do vácuo = $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$

ϵ = constante dielétrica relativa do material isolante

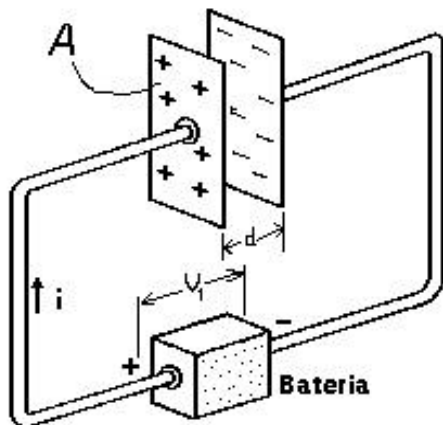


Figura 1: Esquema básico de um capacitor de placas planas paralelas.

Quando o capacitor assim constituído for ligado a uma fonte de corrente contínua com tensão V_1 (uma bateria, por exemplo), tem-se após um certo intervalo de tempo um valor de carga Q_1 positiva na

placa que estiver ligada ao “polo positivo” da bateria e igual quantidade Q_1 de carga negativa na placa ligada ao “polo negativo”. A carga em cada armadura é dada pelo produto:

$$Q_1 = C \cdot V_1 \quad \text{Eq. 2}$$

Se a bateria tiver uma tensão V_2 , a carga em cada armadura será Q_2 , obtendo-se:

$$Q_2 = C \cdot V_2 \quad \text{Eq. 3}$$

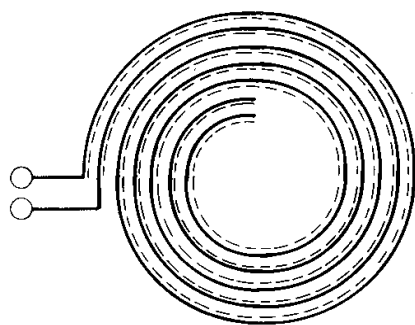
Assim, a capacitância C representa a “capacidade” da estrutura armazenar cargas elétricas.

Supondo que se deseja fabricar um capacitor com capacitância elevada, a observação da Equação 1 permite traçar-se algumas alternativas:

- Diminuir a espessura (d) do dielétrico, pois quanto mais próximas estiverem as armaduras maior será a capacitância. Por outro lado, ao se usar folhas finas de material isolante como dielétrico, a tensão máxima à qual pode ser submetido o capacitor será baixa, em comparação com a que se teria para folhas de maior espessura.
- Usar um material dielétrico com constante dielétrica relativa (ϵ) elevada. Na prática materiais com $\epsilon > 10$ tendem a ter estrutura cristalina, de difícil manipulação na forma de folhas finas.
- Usar folhas de armadura com área elevada, o que conduzirá a capacitores de grandes dimensões.

A maioria dos capacitores é construída com duas folhas finas de alumínio separadas por um filme do material dielétrico. Para permitir um encapsulamento compacto, normalmente emprega-se o esquema construtivo mostrado na Fig. 2, através do qual enrola-se as folhas metálicas e o dielétrico juntos. É assim que se são construídos os capacitores de papel, poliéster e policarbonato.

(*) Engenheiro Eletricista e Doutor em Engenharia Elétrica; Professor Adjunto do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná em Curitiba.



— folha metálica
 ---- dielétrico

Figura 2: Construção de capacitores com folhas de alumínio separadas por filme dielétrico.



Figura 3 Esquema de construção de capacitores "multicamadas".

O esquema de construção através de folhas enroladas faz com que o capacitor tenha uma indutância parasita elevada. Em contrapartida, a Fig. 3 mostra uma alternativa muito utilizada para capacitores destinados a uso em altas frequências, chamados capacitores "multicamadas", normalmente com dielétrico cerâmico.

2. Construção dos Capacitores Eletrolíticos

Os capacitores mostrados nas Figs. 2 e 3 atendem a uma boa parte das exigências em circuitos elétricos. No entanto, mesmo utilizando-se filmes dielétricos de pequena espessura, suas dimensões crescem em proporções alarmantes quando se necessita valores maiores que $1 \mu\text{F}$ ou $2 \mu\text{F}$. Os capacitores chamados *eletrolíticos* surgem então como alternativa para se ter capacitâncias elevadas em volume reduzido.

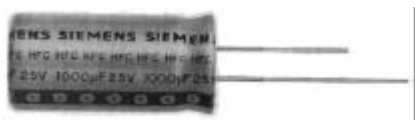


Figura 4: Capacitor eletrolítico de $1000 \mu\text{F}$, com tensão nominal de 25 V, aqui representado aproximadamente em tamanho natural.

O método de construção dos capacitores eletrolíticos difere fundamentalmente dos demais capacitores. Tem-se, nesses capacitores, os seguintes elementos:

Primeira armadura: é uma folha fina de alumínio, se constituindo no "terminal positivo" do capacitor.

Dielétrico: é uma camada finíssima de óxido de alumínio, depositada sobre a primeira armadura. Esta camada de óxido é criada por um tratamento

eletroquímico chamado *oxidação anódica*, aplicado na folha da primeira armadura. O óxido de alumínio é um excelente dielétrico, com $\epsilon = 10$.

Segunda armadura: é um líquido condutor de corrente elétrica (eletrólito), que entra em contato com a superfície oxidada da primeira armadura. Para melhorar o contato, é usada uma folha de papel poroso embebida com o eletrólito e uma segunda folha de alumínio, sem tratamento eletroquímico, chamada de "folha de catodo". Tem-se assim o "terminal negativo" do capacitor eletrolítico.

O "sanduíche" assim formado é enrolado e colocado no interior de uma "caneca" de alumínio, vedada por uma espécie de tampão de borracha. A "caneca" faz contato com o eletrólito, sendo portanto eletricamente ligada ao terminal negativo do capacitor. Um fio metálico atravessa o tampão de borracha e faz contato com a folha de alumínio da primeira armadura. Tem-se assim a construção chamada *axial*, mostrada na Fig. 5.

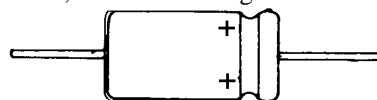


Figura 5: Capacitor Eletrolítico com terminais axiais.

Quando o espaço para montagem é crítico, dispõe-se também de capacitores eletrolíticos com terminais unilaterais, chamada montagem *radial* e mostrada na Fig. 6. Neste caso, apesar de ambos os terminais atravessarem o tampão de borracha, também tem-se a "caneca" metálica fazendo contato com o eletrólito e portanto eletricamente ligada ao terminal negativo.

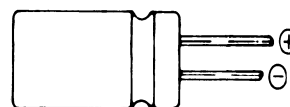


Figura 6: Capacitor Eletrolítico com montagem unilateral, terminais radiais.

O processo de oxidação anódica da primeira armadura produz uma camada de óxido de alumínio proporcional à tensão elétrica usada, da ordem de $0,0012 \mu\text{m/V}$. Assim, mesmo nos capacitores eletrolíticos de maior tensão, a camada de óxido faz com que a distância entre as armaduras seja de no máximo $0,7 \mu\text{m}$. Para efeito de comparação, uma folha de papel tem uma espessura de $6 \mu\text{m}$ a $8 \mu\text{m}$, mostrando que o grande "segredo" para os capacitores eletrolíticos apresentarem alta capacitância em pequeno volume é a pequena espessura da camada dielétrica de óxido de alumínio depositada sobre a primeira armadura. Por outro lado, reside também aí uma de suas desvantagens: capacitores eletrolíticos tem tensão nominal relativamente baixa, comparativamente aos capacitores construídos com dielétrico cerâmico ou com folhas de material polimérico (poliéster ou policarbonato).

Para elevar ainda mais a capacitância dos capacitores eletrolíticos, a folha de alumínio da primeira armadura recebe um tratamento eletroquímico prévio de decapagem ou corrosão, antes da oxidação. Como resultado, obtém-se uma superfície rugosa, com área de contato efetiva muito maior do que se teria com folhas lisas. Como a segunda armadura é um fluido, ele se adapta perfeitamente à superfície áspera da primeira armadura.

3. Cuidado: não ligar capacitores eletrolíticos com polaridade invertida!

Um capacitor eletrolítico construído conforme descrito no item anterior só funciona adequadamente quando se liga o polo positivo à folha de alumínio anodizada (anodo) e o polo negativo ao eletrólito (catodo), através da “caneca” metálica. Se a ligação for feita de modo invertido, inicia-se no interior do capacitor o mesmo processo eletroquímico que o fabricante usou para criar a camada de óxido na primeira armadura, porém agora localizado na folha de catodo, que não sofreu tal tratamento. Também a superfície interna da “caneca” de alumínio se oxida. Durante este processo ocorre a geração de gases e calor, que pode levar à explosão do capacitor. Muitos capacitores eletrolíticos possuem uma espécie de “válvula de segurança” para os casos de explosão. Alguns fabricantes usam para isso uma reentrância no tampão de borracha, enquanto outros introduzem um ponto frágil na caneca de alumínio.

Mesmo que a ligação errada seja desfeita antes que ocorra a explosão, o capacitor ficará comprometido, devido a dois fatores: Primeiro, a oxidação interna faz com que a camada de dielétrico seja maior do que a que existia originalmente, resultando em sensível diminuição no valor da capacitância. Em segundo lugar, mesmo que não ocorra explosão, o capacitor sofre os efeitos mecânicos do acúmulo de gases no seu interior, podendo vir a vazar em futuro próximo.

Deve-se tomar extremo cuidado com o eletrólito líquido. O eletrólito é constituído de uma solução ácida, que pode vir a corroer outros elementos do circuito em caso de vazamento. Nos casos em que ocorre explosão acidental do capacitor, os cuidados devem ser máximos. Se houver contato do eletrólito com a pele, deve-se lavar imediatamente o local atingido com água em abundância e sabão. Em caso de contato com os olhos, é imperativo a assistência de médico oftalmologista, sob o risco de lesões graves. Por isso, é recomendado que sejam usados óculos protetores nos laboratórios de eletrônica quando se manuseiam capacitores eletrolíticos em tensões maiores que 50 V.

Devido ao processo eletroquímico, os capacitores eletrolíticos são usados apenas em situações de tensão contínua entre seus terminais. Pode-se, é claro, ter-se uma tensão alternada

sobreposta à componente contínua, desde que em nenhum momento a tensão se torne invertida. Na verdade a ligação invertida da ordem de até 2 V é permitida, pois a folha de catodo é coberta por uma oxidação natural, que equivale a uma camada anódica de cerca de 2 V.

Outro ponto a ser tomado atenção é a tensão nominal dos capacitores eletrolíticos. A operação de um capacitor eletrolítico em tensão maior que a nominal faz com que ocorra uma oxidação adicional da folha de anodo, gerando gases e calor da mesma forma que acontece na ligação com polaridade invertida. Também nesse caso, mesmo que não ocorra explosão a capacitância diminuirá e a estrutura pode ficar comprometida pela pressão dos gases gerados internamente.

4. Capacitores eletrolíticos “bipolares”?

Existem capacitores eletrolíticos não polarizados (bipolares). Nesses capacitores utiliza-se folha de alumínio anodizada (oxidada) também na folha do catodo. Desta forma, pode-se usar esses capacitores tanto em tensões contínuas sem preocupação quanto à polaridade, assim como em tensões alternadas. No entanto, um capacitor eletrolítico bipolar tem praticamente o dobro do volume de um capacitor não-bipolar com mesmo valor de capacitância. Também multiplica-se pois dois a corrente de fuga, pois o dielétrico apresenta o dobro da área de contato.

5. Capacitância em Corrente Alternada e em Corrente Contínua

Há dois métodos básicos para se medir capacitâncias. Um deles é efetuar a carga do capacitor com uma tensão contínua fixa e em seguida efetuar sua descarga através de um resistor com resistência conhecida. Medindo-se o tempo de descarga, chega-se facilmente ao valor do capacitor, que é chamado “Capacitância em Corrente Contínua”. Outro método consiste em se colocar o capacitor sob teste num dos “braços” de um circuito em “ponte”, onde se tenha resistores e indutores de valor calibrado, alimentando-se o circuito com uma frequência senoidal fixa. Ajustando-se o circuito de modo a se ter ressonância, obtém-se o valor do capacitor, que é considerado assim sua “Capacitância em Corrente Alternada”. Normalmente utiliza-se uma frequência de 100 Hz ou 120 Hz para tal medição (Normas IEC).

Considerando-se capacitores ideais, a medição por qualquer um dos métodos daria resultados idênticos. Para capacitores eletrolíticos, no entanto, costuma-se obter a “Capacitância em Corrente Contínua” 1,1 a 1,5 vezes superior à “Capacitância em Corrente Alternada”. Há duas razões para tal divergência. A primeira delas é devido à adoção da construção na forma de folhas enroladas, fato que produz indutância parasita elevada. Por outro lado, tem-se que levar em conta que a corrente elétrica em

um capacitor eletrolítico percorre um eletrólito líquido, de forma bastante diferente do que se tem em um sólido. Em um fio metálico, a corrente elétrica é um fluxo de elétrons livres, que tem massa e tamanho reduzido, podendo considera-los como portadores de carga “ágeis”. Nos fluídos, apesar de existir também a condução eletrônica, existem os íons, que ao contrário dos elétrons são relativamente grandes e pesados. Se o capacitor eletrolítico está ligado a um circuito de alta frequência, os íons não são capazes de acompanhar o ritmo de variação da tensão, sendo que a tarefa de deslocar as cargas fica então exclusivamente a cargo dos elétrons, resultando em uma considerável redução no valor da capacitância. Finalmente, um detalhe de ordem prática: a capacitância nominal dos capacitores eletrolíticos, que está gravada no invólucro, é normalmente medida a 120 Hz, sendo portanto uma “Capacitância em Corrente Alternada”.

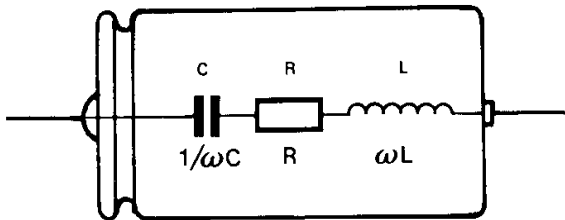


Figura 7: Circuito equivalente de um capacitor eletrolítico, incluindo a indutância parasita e a RSE (resistência-série-equivalente).

Os capacitores eletrolíticos possuem também uma resistência interna, devido a imperfeições no dielétrico e o uso do eletrólito fluido. Assim, o circuito equivalente de um capacitor eletrolítico, representado na Fig. 7, inclui uma capacitância, uma resistência e uma indutância, todas ligadas em série. Para melhor ilustrar este fenômeno, na Fig. 8 tem-se a curva de impedância obtida de um capacitor eletrolítico de 100 μF e tensão nominal de 63 V, sob diversas temperaturas. Nas frequências mais baixas, a impedância é determinada principalmente pela resistência e pela capacitância do capacitor. Em frequências mais altas, há predominância do efeito da indutância. Observa-se que há uma frequência onde a impedância do capacitor é mínima; ou seja, um capacitor eletrolítico atua como um filtro passa-faixa. A Fig. 8 também mostra o efeito das baixas temperaturas, que podem até solidificar o eletrólito, com conseqüente redução do valor da capacitância.

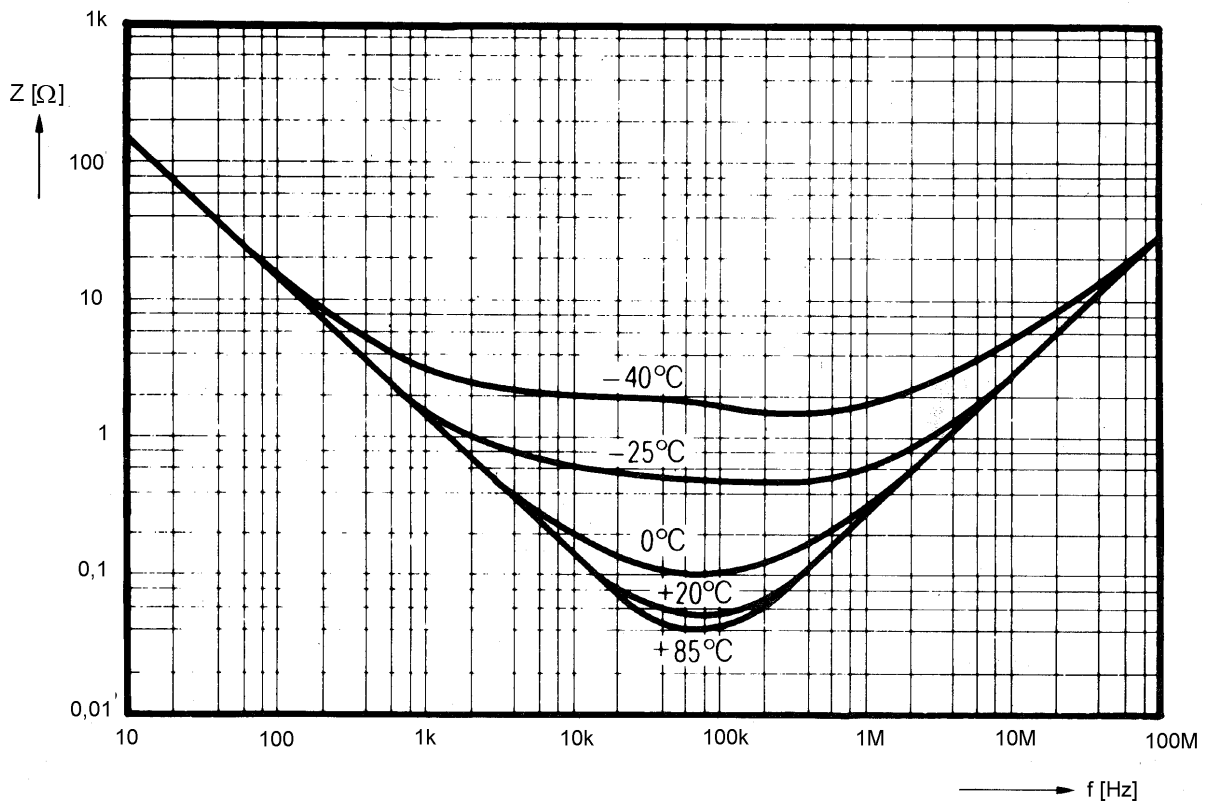


Figura 8: Curvas de impedância de um capacitor eletrolítico de 100 μF /63 V em função da frequência.

Outra característica importante é que a capacitância dos capacitores eletrolíticos sofre grande influência da temperatura, pois a viscosidade do eletrólito se altera. Tem-se como resultado um coeficiente de temperatura positivo, ou seja, a capacitância aumenta com a elevação da temperatura, já que a viscosidade do eletrólito diminui e sua condutividade aumenta nessa situação. De mesma forma, em baixas temperaturas o eletrólito aumenta a viscosidade e em consequência a capacitância diminui acentuadamente.

7. O problema do armazenamento sem tensão

Um capacitor eletrolítico armazenado tende a sofrer uma diminuição da espessura da camada de óxido na placa de anodo, enquanto que pode também se ter uma oxidação na placa de catodo. O resultado pode ser tanto um aumento como uma diminuição do valor da capacitância com o passar do tempo, sendo mais comum a diminuição da capacitância. Além disso, tem-se uma alta corrente de fuga quando tal capacitor for energizado. A partir do momento em que o capacitor for religado, a camada de óxido se regenera em cerca de uma hora. Entretanto, nos primeiros minutos de operação a corrente de fuga pode ser até 100 vezes maior que o seu valor normal.

Para que seja possível a regeneração do óxido de alumínio dielétrico, é necessário que ainda reste uma camada razoável de óxido original. Como consequência, os capacitores eletrolíticos “envelhecem” quando são guardados por longos períodos e podem se tornar imprestáveis. O limite do tempo “de prateleira” é controverso. Alguns autores falam em dois anos, enquanto que os fabricantes de capacitores citam o dobro disso. A maioria dos fabricantes de equipamentos prefere não manter em estoque uma quantidade grande de capacitores eletrolíticos, optando por compras frequentes. Pelo mesmo motivo, muitos técnicos de manutenção tem como norma substituir todos os capacitores eletrolíticos de

equipamentos que ficaram mais de um ano sem uso, antes de liga-los novamente.

8. Vida Operacional

Os capacitores eletrolíticos são certamente os componentes de um circuito eletrônico com menor tempo de vida operacional. Enquanto que para os semicondutores, resistores e capacitores não-eletrolíticos pode-se estimar um tempo de operação superior a 50 anos, os capacitores eletrolíticos provavelmente se deteriorarão muito antes desse prazo. Há versões de capacitores eletrolíticos chamados de “alta confiabilidade” pelos fabricantes onde a vida operacional situa-se na faixa de 10 anos, porém para os capacitores eletrolíticos comuns não se pode esperar um tempo de vida muito maior que 5 anos. Por este motivo, é prática comum em manutenção eletrônica efetuar a troca de todos os capacitores eletrolíticos de equipamentos antigos. A vida operacional dos capacitores é muito influenciada pela temperatura de operação, que deve ser mantida abaixo de 40 °C. Também é interessante, para aumentar a vida útil, que os capacitores eletrolíticos operem submetidos a tensão muito menor que seu valor nominal. Alguns fabricantes afirmam que a vida operacional pode dobrar se o capacitor eletrolítico trabalhar com tensão igual a 50% do seu valor nominal.

Conclusões

Talvez, à luz de tantos “problemas” associados aos capacitores eletrolíticos, possa se chegar a conclusão que é melhor não usa-los! No entanto os capacitores eletrolíticos continuam sendo a alternativa de mais baixo custo quando se necessita de alta capacitância específica (elevada capacitância em pequeno volume). Existem alguns desenvolvimentos importantes sendo feitos nessa área, como a utilização de eletrólitos orgânicos de baixa reatividade, o que aumenta a confiabilidade e a vida útil dos capacitores. Mesmo assim os capacitores eletrolíticos tradicionais continuarão a ser usados por muito tempo nos circuitos eletrônicos, principalmente para a filtragem em fontes de alimentação. Assim, é importante que sejam conhecidas suas limitações, de modo que seu uso nos circuitos eletrônicos seja feito com segurança.