4.1 Capacitores

Capacitores são componentes de fundamental importância na eletrônica. A ideia do capacitor é extremamente simples; um capacitor consiste de dois condutores, um isolado do outro. Nos capacitores usados na eletrônica os dois condutores vêm encapsulados num pequeno invólucro, e o acesso elétrico a estes condutores é por conta de dois fios saindo do invólucro. Os técnicos chamam estes fios muitas vezes de “pernas”.

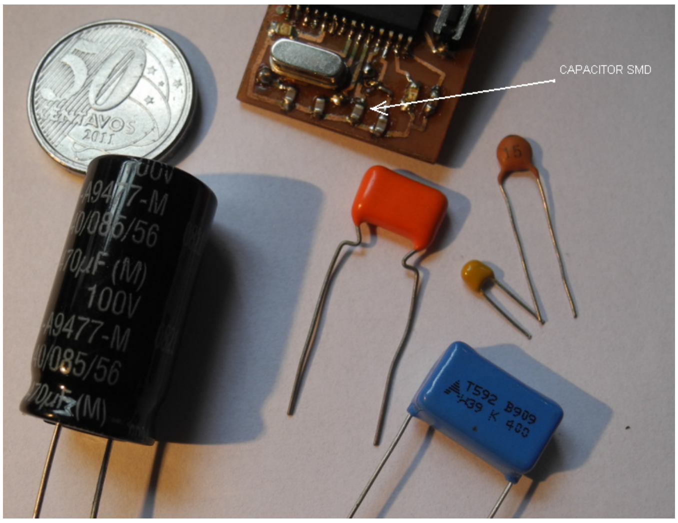

Fig. 4.1.1 Coleção de capacitores.

Há também capacitores sem estas pernas, e neles o acesso é através de bloquinhos de metal que se soldam diretamente nos trilhos de um circuito impresso. Este tipo de componente que se solda direto nos trilhos se chama SMD (Surface Mounted Device). A figura 4.1.1 mostra uma pequena coleção de capacitores junto com uma moeda de 50 centavos para comparação de tamanho. Um circuito impresso com capacitores SMD também aparece na imagem.

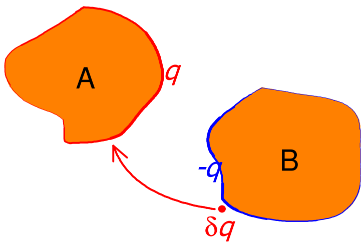

Fig.4.1.2 Transporte de carga entre dois condutores que formam um capacitor.

Uma das aplicações dos capacitores é o armazenamento de energia. Imagine que retiremos uma pequena quantidade de carga δq de um dos dois condutores, digamos do condutor B, e levemos esta carga para o outro condutor A, como indicado na figura 4.1.2. Depois arrancamos mais um δq do primeiro condutor e levamos esta carga de novo para A. Neste segundo transporte temos que vencer forcas elétricas, pois pelo primeiro depósito de δq no condutor A, este tem agora carga do mesmo sinal do δq, e o condutor B fica com carga do sinal oposto. Então este segundo transporte custa energia. Se continuarmos com estas transferências de carga de B para A teremos que vencer forças cada vez mais intensas e o transporte custa cada vez mais energia. Mas esta energia gasta não está perdida, pois todo o processo pode ser invertido e, ao transportar as cargas de volta, podemos recuperar a energia. Então temos um armazém de energia.

Armazenar energia é um dos principais desafios tecnológicos da vida moderna. Pensem, por exemplo, em um caminhão descendo uma ladeira. Uma quantidade enorme de energia é inutilmente desperdiçada nos freios. Se pudéssemos guardar esta energia para a próxima subida do caminhão seria uma vantagem enorme. Outro exemplo da necessidade de armazenar energia: fala-se muito de “energia limpa” e a energia mais limpa que temos é a energia solar. Muito bem. Só tem um problema com esta energia; geralmente ela está disponível nos horários quando não precisamos dela! Então surge de novo o problema de armazenar energia.

Infelizmente os capacitores não servem para estes exemplos. Veremos nas próximas seções que a quantidade de energia que pode ser estocada em capacitores é bem modesta[1] e que também é difícil estocar a energia por muito tempo. A atração das cargas de sinais opostos é forte. Com o passar do tempo, mesmo com um isolamento cuidadoso dos dois condutores, as cargas conseguem escapar para "um feliz reencontro dos sexos opostos". Mas há situações em que o uso de capacitores como armazém de energia faz sentido. Quando se precisa de muita energia durante um intervalo de tempo curto, ou seja, quando queremos muita potência durante pouco tempo, capacitores são frequentemente usados. Nestes casos a energia é lentamente depositada no capacitor através das transferências de carga, como descrito acima, e no uso desta energia a transferência inversa é feita repentinamente. Um caso típico desta aplicação é o flash de uma máquina fotográfica. Um circuito eletrônico na unidade de flash gera alta tensão, isto é, uma grande diferença de potencial elétrico, e carrega um capacitor lentamente. "Carregar um capacitor" é o nome que se dá ao processo de transferência de carga que aumenta a diferença de potencial entre os dois condutores. Na hora de tirar a fotografia, o capacitor é repentinamente descarregado através da lâmpada de flash produzindo luz de alta intensidade, mas de pouca duração.

Temos outro exemplo do uso de capacitores como armazém em praticamente todos os equipamentos eletrônicos que são alimentados na tomada. O que tem na tomada não é uma voltagem constante no tempo. Por razões, que entenderemos mais para o final do semestre, as companhias elétricas não fornecem uma voltagem constante, mas uma oscilação. A voltagem oscila aqui no Brasil com uma freqüência de 60 Hz, em alguns outros países com 50 Hz. A voltagem muda de sinal 60 ou 50 vezes por segundo. Praticamente todos os equipamentos eletrônicos precisam de uma voltagem constante e especialmente não pode haver inversão do sinal da voltagem. As inversões de sinal podem ser evitadas com um dispositivo chamado de *diodo*. O diodo é o análogo elétrico da válvula de ar que você tem no pneu da sua bicicleta. Esta válvula deixa o ar passar para dentro do pneu na hora de encher o mesmo com a bomba de ar. Mas a válvula não permite o fluxo de ar no sentido contrário. O diodo reage de forma parecida em relação ao fluxo de carga elétrica. Nos esquemas de circuitos elétricos os diodos são representados com o símbolo da figura 4.1.3

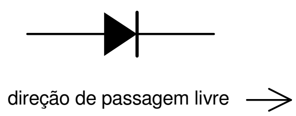

Fig. 4.1.3 Símbolo de diodo. As palavras "direção de passagem livre" e a seta não fazem parte do símbolo.

Na forma mais simples, o diodo pode ser usado como na figura 4.1.4 para evitar as inversões de sinal da voltagem.

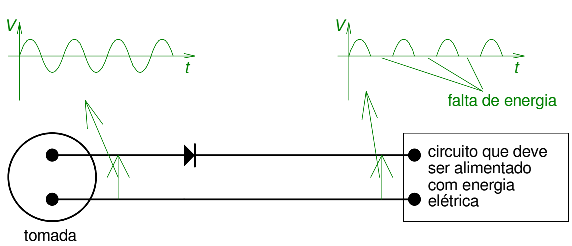

Fig. 4.1.4 Retificação simples.

Percebemos que há intervalos de falta de energia que aparecem periodicamente. Imaginem só como ficaria sua música se você alimentasse um amplificador de som desta forma! Isto não é viável. Pode-se melhorar a situação um pouco usando os diodos de forma mais inteligente. A figura 4.1.5 mostra um esquema melhor.

[1] Restringindo a validade desta afirmação, eu tenho que dizer que há desenvolvimentos recentes de *supercapacitores*. Estes começam a ser aplicados no problema de freios de veículos.

Notamos que as faltas de energia melhoraram muito em comparação com o esquema da figura 4.1.4. Mesmo assim, a sua música ficaria ainda muito prejudicada. Para obter um fornecimento de energia elétrica sem “buracos” usa-se um capacitor. Nos esquemas elétricos os capacitores são representados com dois traços paralelos que simbolizam os dois condutores e, conectados aos traços, se desenham dois fios que servem para acessar os condutores para poder efetuar os processos de carga e descarga do capacitor. A figura 4.1.6 mostra o símbolo de capacitor.

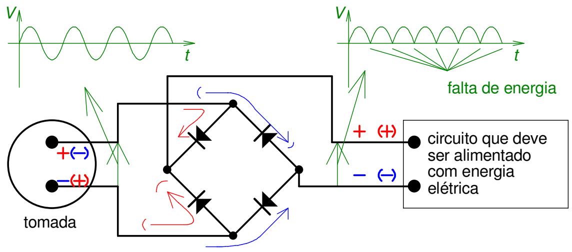

Fig. 4.1.5 Retificação completa com ponte de diodos.

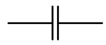

Fig. 4.1.6 Símbolo de capacitor.

O esquema da figura 4.1.5 pode ser melhorado colocando um capacitor na entrada do circuito a ser alimentado para armazenar energia para os “tempos de vacas magras”. A figura 4.1.7 mostra este esquema com capacitor.

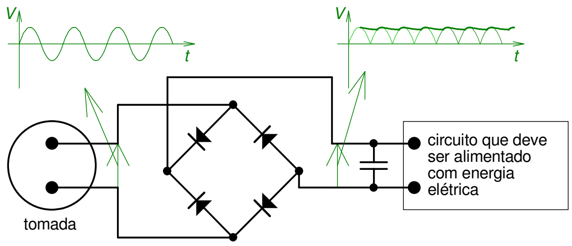

Fig. 4.1.7 Retificação completa com ponte de diodos e armazenamento de energia com ajuda de um capacitor.

Para demonstrar que capacitores realmente armazenam energia montei aqui um capacitor grande, composto de vários capacitores menores. A figura 4.1.8 mostra este capacitor dentro de uma caixinha de vidro que evita que professores desatentos coloquem a mão nos capacitores e morram eletrocutados. Na minha mão seguro uma haste metálica que serve para descarregar o capacitor repentinamente. Carrego este capacitor com uma ponte retificadora como aquela da figura 4.1.7 ligando esta ponte na tomada. A ponte se encontra escondida na base do equipamento. Depois descarrego o capacitor com a barra metálica. Ouve-se um estouro. Aqui nas notas de aula, o estouro fica por conta da imaginação, mas na fotografia (Fig. 4.1.9) aparece a faísca da descarga.

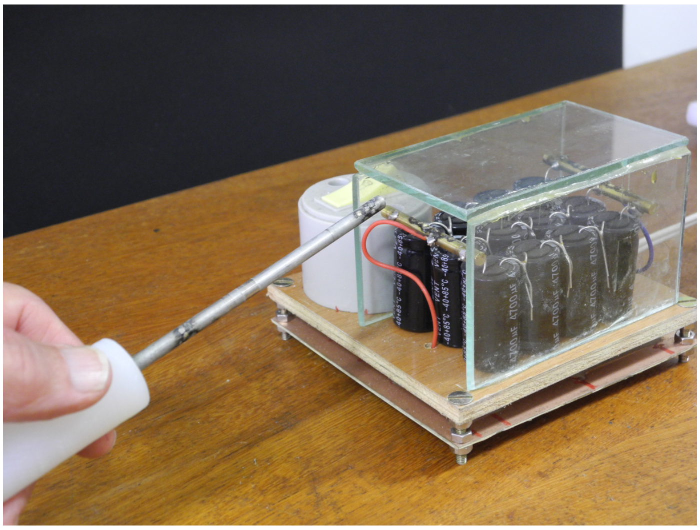

Fig. 4.1.8 Capacitor feito com uma junção de 12 capacitores menores. Na base do equipamento há 4 diodos que permitem carregar o capacitor quando se aperta o interruptor atrás da caixa de vidro. Na mão do experimentador se vê uma haste de metal para descarregar o capacitor. Na haste há marcas de experiências anteriores.

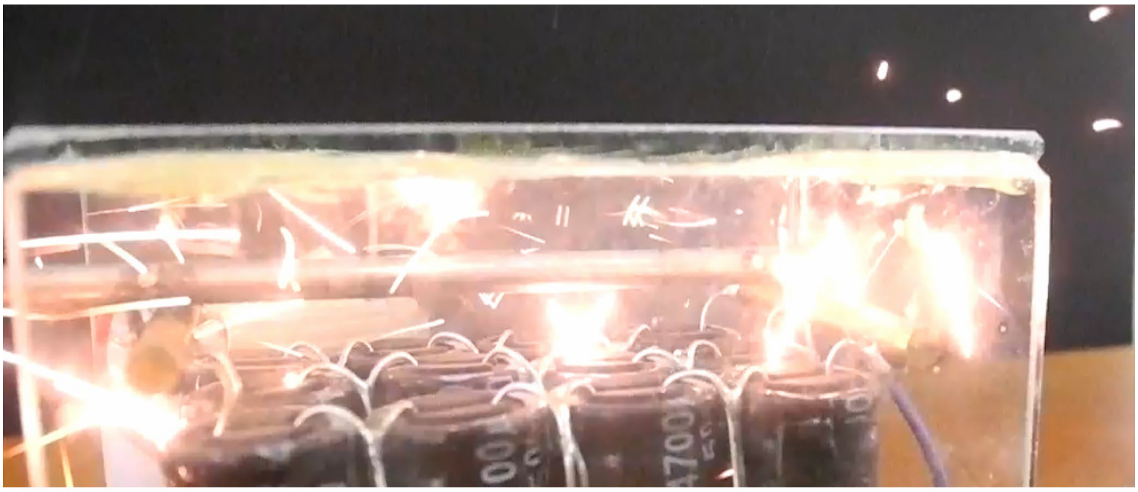

Fig. 4.1.9 Fotografia do momento de descarga do capacitor da figura 4.1.8. A voltagem do capacitor era aproximadamente 180 V. Alguns dos clarões na imagem são reflexos nos vidros. A faísca é o clarão forte no lado direito. Aparecem também gotas de metal derretido.

O armazenamento de energia não é a única aplicação dos capacitores. Nas futuras seções, que tratam das correntes elétricas, veremos outro tipo de aplicação muito usada na eletrônica, a saber, a possibilidade de definir uma escala de tempo com uma combinação de capacitor e resistor.

Há ainda uma terceira aplicação dos capacitores muito interessante. Um capacitor pode ser usado para armazenar informação. Isto acontece no seu Pen Drive ou Memória USB Flash Drive. A ideia é armazenar uma informação do tipo sim – não interpretando o capacitor descarregado como um sim e o capacitor carregado como um não. Naturalmente queremos que uma informação armazenada não se apague com o passar do tempo. Acima falamos que mesmo com um isolamento cuidadoso dos dois condutores de um capacitor, as cargas conseguem escapar com o passar do tempo. Mas para pequenas quantidades de carga um dos condutores (chamado de ”*floating-gate*”) pode realmente ser isolado de tal forma que a carga no condutor não escape nem durante muitos anos. Consegue-se este isolamento enterrando o floating-gate dentro de dióxido de silício (quartzo). Este condutor totalmente isolado não tem nenhuma conexão condutora para o mundo externo. O outro condutor tem dois contatos que permitem injetar corrente elétrica nele. Este condutor, chamado de *canal*, tem propriedades especiais que permitem medir se o capacitor está carregado ou não. Há ainda um terceiro condutor que tem um papel na leitura e escrita da memória.

Entendemos que o truque de enterrar um nos condutores completamente em dióxido de silício resolve o problema da pouca durabilidade da carga no capacitor. Mas, se este condutor está totalmente isolado do mundo externo, como se pode escrever ou apagar a memória? Para colocar carga (no caso carga negativa) no floating-gate passa-se uma corrente intensa no canal. Esta corrente excita alguns elétrons termicamente e estes “elétrons quentes” têm tanta energia que conseguem atravessar a barreia de dióxido de silício. Para retirar os elétrons do floating-gate aplica-se “alta tensão” (12 V) e isto modifica a função de energia potencial dos elétrons de tal forma que eles conseguem escapar com a ajuda do efeito túnel que mencionamos no fim da seção 3.2.

Todo este capacitor complicado é tão pequeno que bilhões destes cabem dentro do seu Pen Drive junto com uma eletrônica que controla a leitura e escrita, a comunicação com o computador e junto com um gerador de 12 V (a porta USB do computador fornece somente 5 V). Dá para imaginar que o microscópio eletrônico de varredura que descrevemos na seção anterior é um instrumento indispensável no desenvolvimento deste tipo de objeto. Talvez o mais chocante destes objetos é o fato de que milhões destes estão nas mãos de pessoas que não têm absolutamente nenhuma ideia dos conceitos fundamentais que estão por trás destas invenções.

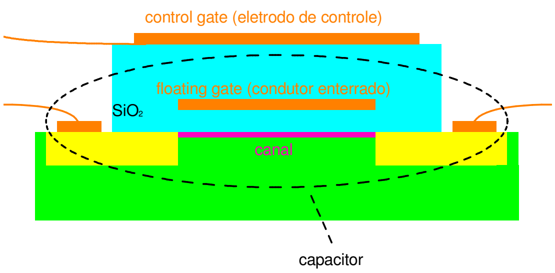

Fig. 4.1.10 Unidade de armazenamento de informação de uma memória flash. Os elementos dentro da elipse pontilhada formam um capacitor. Um dos condutores deste capacitor (o floating gate) não tem "perna", em compensação o outro tem duas "pernas".

Na memória do Pen Drive os capacitores são usados para estocar informação de forma digital. Existem também aplicações de capacitores como memória analógica. Neste caso um valor de voltagem é estocado carregando um capacitor até que a diferença de potencial dos condutores do capacitor atinja o valor desta voltagem. Numa futura leitura da informação, esta diferença de potencial é medida. De novo há o problema da fuga de carga que poderia alterar o valor memorizado. Mas estas memórias são tipicamente aplicadas para um armazenamento de curta duração (geralmente menos que milissegundos) e desta forma o problema da fuga de carga não é grave. Tipicamente esta memória é usada em conversores analógico-digitais. Nestes dispositivos uma voltagem deve ser medida e o valor deve ser transformado num número digital. O processo de digitalização leva algum tempo e se a voltagem que deve ser digitalizada variasse durante este tempo, ocorreriam erros na digitalização. Para evitar isto, se captura a voltagem primeiro, armazena o valor num capacitor e depois digitaliza o valor sem ter o perigo de variações durante a digitalização. Este esquema é conhecido com o nome "*sample and hold*".

Há ainda aplicações de capacitores como sensores e instrumentos de medida. Por exemplo, no seu paquímetro digital (que você futuro engenheiro ou cientista deve ter na sua casa) há capacitores que permitem a determinação da posição da parte móvel do paquímetro.

Depois deste passeio pelas aplicações dos capacitores, vamos enfrentar a tarefa de calcular a energia armazenada num capacitor. Num cálculo de energia, o potencial elétrico é obviamente uma ferramenta útil. Precisamos de uma relação entre diferença de potencial dos dois condutores e valor da carga que foi transferida de um condutor para o outro. Dependendo da geometria dos condutores, o cálculo da diferença de potencial pode ser uma tarefa bastante difícil. O que teria que resolver é a equação diferencial (3.2.9) para o espaço fora os condutores, onde a densidade de carga é nula:

$$\Delta V = 0 \tag{4.1.1}$$

Esta equação diferencial parcial teria que ser resolvida com a condição de contorno que a função V tenha um único valor V^A na superfície do condutor A e um único valor V^B na superfície do condutor B. Quando efetuamos este processo de transferência de carga de um dos condutores para o outro, geramos sempre situações que mantêm o capacitor como um todo neutro, ou seja, as cargas q^A e q^B nos respectivos condutores satisfazem $q^A = -q^B$. Existem soluções da equação (4.1.1) que não satisfazem esta condição. Mas, como veremos futuramente, na grande maioria das aplicações vale de fato $q^A = -q^B$. Então, com a lei de Gauss, podemos acrescentar ainda a restrição

$$\oiint_A \operatorname{grad} V \cdot d\vec{S} \quad = \quad -\oiint_B \operatorname{grad} V \cdot d\vec{S} \qquad (4.1.2).$$

Se a geometria dos condutores for complicada, a solução deste problema pode ser muito difícil. Mas vamos supor que alguém encontrou alguma solução não trivial[2] deste problema e vamos chamar esta solução de V_1 e correspondentemente as cargas e valores de potencial de $q_1^A = -q_1^B$ e V_1^A e V_1^B. A partir desta solução podemos obter outras de forma bem simples: para qualquer numero real λ seja V_λ a função $V_\lambda(x, y, z) = \lambda V_1(x, y, z)$. Se V_1 tinha valores constantes nas superfícies dos condutores, V_λ evidentemente também tem valores constantes nestas superfícies. Além disso, vale $\oiint \operatorname{grad}(\lambda V_1) \cdot d\vec{S} = \lambda \oiint \operatorname{grad} V_1 \cdot d\vec{S}$ e $\Delta(\lambda V_1) = \lambda \Delta V$, e portanto V_λ também satisfaz as equações (4.1.1) e (4.1.2). Os valores constantes do potencial nas superfícies dos condutores são $V_\lambda^A = \lambda V_1^A$ e $V_\lambda^B = \lambda V_1^B$. Com a lei de Gauss e com $\oiint \operatorname{grad}(\lambda V_1) \cdot d\vec{S} = \lambda \oiint \operatorname{grad} V_1 \cdot d\vec{S}$, segue ainda $q_\lambda^A = \lambda q_1^A$. Com o teorema de unicidade que mencionamos na seção 3.2, sabemos que (fora de uma possível constante aditiva e irrelevante) estas soluções V_λ são as únicas do problema. Como

$$V_\lambda^A - V_\lambda^B = \lambda\left(V_1^A - V_1^B\right) \qquad (4.1.3)$$

e

$$q_\lambda^A = \lambda q_1^A \qquad (4.1.4)$$

mostramos que a diferença de potencial gerada entre os condutores A e B pela transferência de uma carga q é proporcional a este valor de carga. A constante de proporcionalidade depende apenas da geometria dos dois condutores, a não ser que haja outros materiais isolantes no espaço ente os condutores. Trataremos este caso com materiais dielétricos, mais tarde.

O resultado da proporcionalidade entre carga e diferença de potencial justifica uma **definição**:

> O quociente da carga q^A $(= -q^B)$ e da diferença de potencial $V^A - V^B$ dos dois condutores de um capacitor é chamado de *capacitância* do capacitor:
>
> $$C \underset{def.}{=} \frac{q^A}{V^A - V^B} \qquad \text{com} \quad q^A = -q^B \qquad (4.1.5)$$

A proporcionalidade entre q^A e $V^A - V^B$ significa que C não depende de q^A. Inclusive q^A pode mudar de sinal. Isto não altera o sinal de C. De fato, <u>C é sempre positivo</u>! Se você por acaso calculou um valor de capacitância e encontrou um valor negativo, o seu cálculo, com certeza, contém um erro. Muito provavelmente você simplesmente confundiu $V^A - V^B$ com $V^B - V^A$. Na próxima seção veremos uns exemplos de cálculo de capacitâncias.

---

[2] V não constante.

Podemos escrever valores de capacitâncias com a unidade C/V. Como capacitores são de uso muito frequente na eletrônica, inventou-se um nome especial para esta combinação de Coulomb e Volt. Ela é chamada de Farad, homenageando Michael Faraday.

$$\mathrm{F} \underset{def.}{=} \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{V}} \tag{4.1.6}$$

A unidade Farad é muito grande. É extremamente raro encontrar capacitores com 1F. Por exemplo, o capacitor composto que usei na demonstração de descarga (fig. 4.1.9) tem uma capacitância de aproximadamente 3,5 mF, o capacitor de maior tamanho da figura 4.1.1 tem 470 μF, o capacitor pequeno amarelo em forma de lentilha na figura 4.1.1 tem 18 pF. ($\mathrm{p} = \mathrm{pico} = 10^{-12}$).

Munidos com a relação entre carga e diferença de potencial, podemos calcular a energia armazenada num capacitor. Vamos escrever a diferença de potencial como

$$V_C \underset{def.}{=} V^A - V^B \tag{4.1.7}$$

e chamá-la *voltagem no capacitor.* Agora imaginem uma situação como aquela desenhada na figura 4.1.2 onde já existe uma carga q no condutor A e uma carga $-q$ no condutor B. Se transportamos mais uma quantidade infinitesimal δq de B para A, temos que realizar o trabalho $\delta q V_C$. Com "quantidade infinitesimal" queremos dizer que δq é tão pequeno que alterações do potencial devido à retirada desta carga do condutor B possam ser desprezadas no cálculo deste trabalho. Mas, se continuamos levando carga de B para A, naturalmente temos que considerar que V_C aumenta na medida em que q aumenta. Então se queremos saber o trabalho feito numa transferência finita de carga, temos que somar estas contribuições infinitesimais tomando as variações de V_C devidamente em consideração. Isto significa que temos que calcular uma integral:

$$\text{trabalho necessário para aumentar } q \text{ de } q_1 \text{ até } q_2 = \int_{q_1}^{q_2} V_C \, dq \tag{4.1.8}$$

Com

$$V_C(q) = \frac{1}{C} q \tag{4.1.9}$$,

esta integral é facilíssima de se calcular:

$$\text{trabalho necessário para aumentar } q \text{ de } q_1 \text{ até } q_2 = \frac{q_2^2 - q_1^2}{2C} \tag{4.1.10}$$

Vamos definir como energia armazenada num capacitor com carga Q o trabalho necessário de se criar este estado de carga a partir do capacitor descarregado. Repare que nesta definição de energia usamos um ponto zero de energia diferente daquele usado no fim da seção anterior. Não faria sentido montar os condutores do capacitor a partir de 10 elevado a vinte e tantas cargas positivas de negativas escondidas no infinito. Então escolhendo $q_1 = 0$ e $q_2 = Q$, obtemos a energia do capacitor com carga Q a partir da (4.1.10):

$$E_C = \frac{Q^2}{2C} \tag{4.1.11}$$

Muitas vezes é prático expressar o valor de Q pela voltagem no capacitor. Substituindo $Q = CV_C$, obtemos

$$E_C = \frac{C}{2}\left(V_C\right)^2 \tag{4.1.12}$$

Esta fórmula é curiosamente parecida com a expressão da energia cinética de uma partícula, o que facilita a memorização deste resultado.

Exercícios:

E 4.1.1: Na experiência da figura 4.1.9 usei um capacitor de aproximadamente 3,5 mF. Calcule a energia armazenada se a voltagem vale 180 V. Compare o valor de energia com a energia perdida quando um caminhão de 20 toneladas desce 100 m de altura (usando $g \approx 10\,\mathrm{m\,s^{-2}}$).

E 4.1.2: Escreva os pontos de destaque desta seção.