



## SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



### A Lâmpada Elétrica e o Efeito Edison ou Efeito Termiônico.

Conforme vimos em alguns verbetes desta série, as primeiras experiências sobre descargas elétricas nos gases rarefeitos foram realizadas pelo físico inglês Michael Faraday (1791-1862), em 1838, ocasião em que observou uma região escura próxima ao eletrodo que se ligava ao pólo positivo (anodo) da fonte de energia elétrica utilizada para provocar a descarga elétrica, região essa que ficou conhecida como espaço escuro de Faraday. Essas experiências foram retomadas, em 1858, pelo matemático e físico alemão Julius Plücker (1801-1868), quando, usando um tubo de Geissler [nome dado pelo próprio Plücker, ao tubo inventado, em 1855, pelo físico alemão Johann Heinrich Wilhelm Geissler (1814-1879)], observou que os “raios” [posteriormente denominados de raios catódicos (“Kathodenstrahlen”) pelo físico alemão Eugen Goldstein (1850-1931), em 1876] originários do pólo negativo (catodo) podiam ser desviados quando em presença de um campo magnético.

Tentando obter um vácuo mais perfeito, o físico inglês William Crookes (1832-1919) construiu, em 1875, uma câmara de vácuo a uma pressão de ar de 75.000 vezes menor do que a encontrada em um tubo de Geissler, no qual adaptou, além do catodo e do anodo, lâminas metálicas para estudar a “radiação” que provinha do catodo. Aliás, Crookes pensava que essa “radiação” era constituída de moléculas “ultra-gasosas” e portadoras de cargas elétricas, consideradas por ele como sendo um “quarto estado da matéria. [H. W. Brock, *IN*: C. C. Gillispie (Editor), *Dictionary of Scientific Biography* (Charles Scribner’s, 1981).] Esse dispositivo construído por Crookes ficou conhecido como radiômetro de Crookes. Mais tarde, em 1879 (*Philosophical Transactions of the Royal Society* 170, pgs. 135; 641), Crookes descobriu o famoso espaço escuro de Crookes, uma região escura próxima do catodo, ao estudar a descarga elétrica nos gases, para o qual adaptou o seu “radiômetro” para realizar esse estudo. Observe-se que essa adaptação ficou conhecida como ampola de Crookes ou “ovo elétrico”. [William Francis Magie, *A Source Book in Physics* (McGraw-Hill Book Company, Inc., 1935).]

A possibilidade de obter vácuo cada vez melhor levou à invenção da lâmpada elétrica, como alternativa para substituir a iluminação a gás, conforme veremos a seguir. Parece haver sido o inventor inglês Joseph Wilson Swan (1824-1914) o primeiro a pensar em iluminação elétrica ao considerar a possibilidade de produzir luz elétrica por meio de carbono (C) e condutores metálicos, em forma de filamento e aquecidos no vácuo. No entanto, para produzir um dispositivo que produzisse aquela iluminação, Swan percebeu que havia três dificuldades: 1) uma fonte elétrica adequada para produzir o aquecimento; 2) o material em forma de filamento capaz de resistir a altas temperaturas; 3) um vácuo capaz de envolver o filamento para que ele não fosse destruído pela atmosfera.

Com essa idéia em mente, por volta de 1848, Swan usou papel cortado em tiras, às vezes saturadas de melaço, alcatrão ou outros líquidos, que embrulhava numa massa de carvão em pó e cozia a alta temperatura em um forno de cerâmica. Essas suas experiências duraram vários anos até que, em 18 de dezembro de 1878, ele apresentou, numa reunião da *Sociedade Química* de Newcastle-on-Tyne, uma lâmpada elétrica com um filamento de carbono colocado no vácuo. É oportuno esclarecer que antes de Swan, alguns tipos de “lâmpada elétrica” haviam sido inventados, como, por exemplo, pelo mecânico alemão Enrique Göbel, em 1854, usando filamentos

de bambu incandescentes; e, em 1877, pelo inventor norte-americano W. E. Sawyer trabalhando com filamentos de madeira e de papel. Note-se que Sawyer obteve uma patente dessa sua invenção. [Edward de Bono (Organizador), *Uma História das Invenções Desde a Roda até o Computador* (Editorial Labor do Brasil S. A., 1975); A Kistner, *Historia de la Física* (Editorial Labor S. A., 1934).]

A procura da iluminação elétrica também foi objeto de pesquisa do inventor norte-americano Thomas Alva Edison (1847-1931). Com efeito, em 1879, ele apresentou sua lâmpada elétrica com filamento de carbono (C) (fio de algodão) incandescente no vácuo, alimentada por corrente contínua gerada por um dínamo ou bateria elétrica, e que permaneceu acesa por 48 horas. Apesar desse imenso sucesso (as outras lâmpadas referidas acima apagavam logo), essa invenção apresentava uma grande desvantagem, pois a lâmpada enegrecia com o uso.

Procurando entender essa deficiência de sua lâmpada, Edison descobriu, em 1883, o que viria mais tarde a ser conhecido como efeito termiônico ou efeito Edison. Nesse ano, Edison observou que, em certas condições de vácuo e de certas voltagens, sua lâmpada apresentava um estranho clarão azulado, clarão esse causado por uma inexplicável corrente entre os fios que formavam o filamento da lâmpada. Essa corrente fluía na direção oposta à corrente principal que passava no filamento, ou seja, ia do catodo, carregado negativamente, ao anodo, carregado positivamente. Essa descoberta de Edison sobre o efeito que leva seu nome foi publicada na *Engineering*, p. 553, em 12 de dezembro de 1884, com o título: *A Phenomenon of the Edison Lamp*. Aliás, é oportuno anotar que, parece haver sido do físico francês Charles François Du Fay (1698-1739) a primeira observação, em 1733, de que o ar se tornava condutor de eletricidade nas proximidades de metais incandescentes. [Sir Edmund Taylor Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories* (Thomas Nelson and Sons, Ltd., 1951); Bernard S. Finn, *IN: Gillispie*, op. cit..]

Com a descoberta do elétron (vide verbete nesta série) pelo físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906), em 1897, os físicos começaram a desenvolver um tratamento matemático no sentido de entender o efeito Edison. O próprio Thomson, em 1899 (*Philosophical Magazine* 48, p. 547), mostrou ser aquele efeito decorrente da emissão de elétrons por parte de metais incandescentes. Desse modo, a questão que se colocava era a de saber o valor da corrente desses elétrons termiônicos, ou seja, a chamada corrente termiônica  $J$ . Um dos primeiros valores de  $J$  foi calculado, em 1902 (*Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 11, p. 286), pelo físico inglês Sir Owen Willans Richardson (1879-1959; PNF, 1928), ao considerar que os elétrons livres de um metal obedeciam à Estatística de Maxwell-Boltzman (EM-B). Nessa ocasião, ele obteve a expressão:  $J = A' \sqrt{T} \exp(-e \phi / k_B T)$ , onde  $A'$  é uma constante a ser determinada experimentalmente para cada material,  $T$  é a temperatura absoluta,  $e$  é a carga do elétron,  $k_B$  é a constante de Boltzmann, e  $e \phi$  é a função trabalho do material considerado, que se relaciona com a energia necessária para arrancar um elétron de um átomo por intermédio do efeito fotoelétrico (sobre esse efeito, ver verbete nesta série). Logo depois, em 1903 (*Philosophical Transactions of the Royal Society* A201, p. 497), Richardson apresentou uma série de medidas experimentais comprovando o fator exponencial de sua expressão. Com essas medidas, ele estimou a função trabalho para a platina (Pt) como sendo de 4,1 eV e de 2,6 eV para o sódio (Na). (Lembrar que 1 eV é a energia potencial elétrica de um elétron sob a diferença de potencial de 1 Volt.) Registre-se que a constante  $A'$  pode ser deduzida usando a EM-B. [Max Born, *Física Atômica* (Fundação Calouste Gulbenkian, 1971).]

Ainda em 1903 (*Philosophical Transactions of the Royal Society* A202, p. 243), o físico inglês Harold Albert Wilson (1874-1964) explicou o efeito termiônico por intermédio de um mecanismo semelhante ao da evaporação gasosa, com o respectivo calor latente de vaporização ( $\chi$ ) calculado pela famosa equação de Clapeyron-Clausius. Observe-se que esta equação foi obtida, independentemente, pelo engenheiro-civil francês Benoit-Pierre-Clapeyron (1799-1864), em 1834 (*Journal de l'École Polytechnique* 14, p. 190), e pelo físico alemão Rudolf Julius Emmanuel Clausius (1822-1888), em 1850 (*Annalen der Physik* 79, pgs. 368; 350), ao estudarem a relação entre  $\chi$ , a pressão ( $P$ ) do vapor e a temperatura ( $T$ ) da transição água-vapor. A equação referida

acima é dada por:  $\mathbf{x} = \mathbf{R} \mathbf{T}^2 (1/P) dP/dT$ , onde R é a constante universal dos gases. [Sir Edmund Taylor Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity: The Modern Theories* (1900-1926) (Thomas Nelson and Sons, Ltd., 1953).]

Uma nova expressão para J foi obtida, em 1913 (*Physical Review* 2, p. 329), pelo químico e norte-americano Irving Langmuir (1881-1957; PNQ, 1932) ao estudar a emissão termiônica de elétrons em superfícies metálicas (catodos) incandescentes. Nesse estudo, ele obteve a seguinte expressão:  $J = (4/9) \epsilon_0 (2efm)^{1/2} V^{3/2} x^{-2}$ , onde  $\epsilon_0$  é a constante dielétrica do vácuo, V é o potencial a uma distância x do catodo, e m é a massa do elétron. Observe-se que, como uma expressão análoga a essa, para a corrente iônica, havia sido obtida pelo físico norte-americano Clement Dexter Child (1868-1933), em 1911 [*Physical Review (Series I)* 32, p. 492], a mesma passou a ser conhecida como a lei de Child-Langmuir, que é a primeira *lei não-linear da Física*. [Lembrar que a relação entre voltagem (V) e corrente elétrica (I) era dada por uma relação linear, a famosa lei de Ohm (1825):  $V = R I$ , onde R significa a resistência elétrica.] Ainda nesse seu estudo, Langmuir demonstrou que: *A emissão de elétrons por catodos metálicos incandescentes é uma propriedade do próprio metal de que é feito o catodo, e não apenas um efeito secundário devido à presença do gás no tubo rarefeito.*

Em 1914 (*Philosophical Magazine* 28, p. 633), Richardson utilizou a idéia de Wilson e voltou a trabalhar com J, ocasião em que obteve um novo valor para ela, qual seja:  $J = A T^2 \exp(-e \phi/k_B T)$ , onde A é uma constante e  $e \phi$  representa o calor latente de vaporização de um gás monoatômico. Essa equação, juntamente com uma expressão analítica para a constante A, foi obtida pelo físico e químico russo-norte-americano Saul Dushman (1883-1954), em trabalho publicado em 1923 (*Physical Review* 21, p. 623). Nesse trabalho, ele usou a equação de Clapeyron-Clausius e a hipótese de que os elétrons no interior do metal obedecem à EM-B. Desse modo, encontrou para aquela constante o valor:  $A = 2\pi (m e k_B/h^3) = 60 \text{ amp}/(\text{cm.grau})^2$ , onde h é a constante de Planck. Em vista disso, essa equação passou a ser conhecida como equação de Dushman-Richardson (ED-R). Ao concluir este verbete, é oportuno fazer mais alguns comentários sobre o efeito termiônico ou *emissão termiônica*, como Richardson a chamava. Na segunda metade da década de 1920, o estudo dessa “emissão” foi realizado considerando o metal como sendo um “gás de elétrons”. Com efeito, em 1927 (*Naturwissenschaften* 15, p. 825), o físico alemão Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951) deduziu a ED-R usando o modelo de metal [gás degenerado de elétrons que obedece à estatística de Fermi-Dirac (vide verbete nesta série)] proposto pelo físico austro-norte-americano Wolfgang Pauli Junior (1900-1954; PNF, 1945), também em 1927 (*Zeitschrift für Physik* 41, p. 81).

Por sua vez, em trabalhos realizados em 1928 (*Zeitschrift für Physik* 46, p. 833) e 1929 (*Zeitschrift für Physik* 30, p. 177), o físico alemão Lothar Wolfgang Nordheim (1899-1985) estudou os metais sob a hipótese de que alguns elétrons metálicos poderiam atravessar a “barreira de potencial” representada pela superfície do metal, mesmo se tivesse energia menor que a altura da barreira. Com essa hipótese [equivalente ao efeito túnel de Gamow-Condon-Gurney (vide verbetes nesta série)], Nordheim demonstrou uma nova expressão para a ED-R:  $J = A G \bar{D} T^2 \exp(-e \phi/k_B T)$ , onde A é o coeficiente de Dushman, G é um parâmetro numérico,  $\bar{D}$  é o coeficiente médio de transmissão da parede dado por:  $\bar{D} = 1 - \bar{R}$ , sendo  $\bar{R}$  o coeficiente médio de reflexão e representa a relação entre o número médio de elétrons refletidos internamente na superfície do metal e o número médio dos elétrons que a atingem. Usualmente  $\bar{D} \ll 1$  e não necessita ser considerado, mesmo porque existe uma certa dificuldade em determinar experimentalmente o valor de A. Por exemplo, em 1928 (*Physical Review* 31, pgs. 236; 912), L. A. du Bridge determinou, experimentalmente, que  $A = 14.000 \text{ amp}/(\text{cm.grau})^2$  para a platina (Pt).

Ainda na expressão obtida por Nordheim,  $e \phi$  representa a função trabalho considerada por Richardson. No entanto, Nordheim admitiu que:  $e \phi = \epsilon - \epsilon_F$ , onde  $\epsilon$  é a energia potencial eletrostática entre o interior e o exterior do metal, e  $\epsilon_F$  é a energia de Fermi, que significa a energia mais alta que, no zero absoluto ( $T = 0$ ), o elétron pode ocupar em sua distribuição orbital. A *emissão termiônica* também foi objeto de estudo por parte do físico inglês Sir Ralph Howard Fowler

(1889-1944), em trabalhos realizados em 1928 (*Proceedings of the Royal Society* A118, p. 229) e 1929 (*Proceedings of the Royal Society* A122; A124, pgs. 36; 699), nos quais, inclusive, considerou  $G = 2$ , para levar em conta os dois possíveis estados de spin do elétron: *up* e *down* (sobre spin, vide verbete nesta série). Por fim, é interessante ressaltar que, segundo o modelo de Sommerfeld-Nordheim-Fowler, a *emissão termiônica* se dá por dois efeitos: efeito térmico, devido ao aumento de temperatura; e efeito de campo, devido à ação de um campo elétrico na superfície do metal. Neste último caso, o campo elétrico diminui a barreira de potencial ( $e\phi$ ) e o elétron “salta” ou “penetra” na mesma, conforme proposta apresentada inicialmente por J. E. Lilienfeld, em 1922 (*Physikalische Zeitschrift* 23, p. 306) e pelo físico suíço-alemão Walter Hermann Schottky (1886-1976), em 1923 (*Zeitschrift für Physik* 14, p. 63). [Para maiores detalhes sobre o efeito Edison, ver: Sir Owen Willans Richardson, Nobel Lecture (12 de dezembro de 1929); Whittaker (1953), op. cit.; Charles Kittel, *Introduction to Solid State Physics* (John Wiley & Sons, Inc., 1971); José Maria Filardo Bassalo, *Crônicas da Física*, Tomo 4 (EDUFPA, 1994).]

---



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)