



# CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo  
[www.bassalo.com.br](http://www.bassalo.com.br)



## Efeitos: Túnel e Josephson, e o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 1973 .

O PNF de 1973 foi atribuído aos físicos, o japonês Leo Esaki (n.1925) pela descoberta do **tunelamento** em semicondutores; o norueguês-norte-americano Ivar Giaever (n.1929) pela descoberta do **tunelamento** na junção de condutores e supercondutores; e o inglês Brian David Josephson (n.1940) pela descoberta do **tunelamento** em junção de supercondutores.

A ideia de **tunelamento** foi considerada em Física graças aos trabalhos de diversos físicos, trabalhos esses todos realizados em 1928. O físico norte-americano Julius Robert Oppenheimer (1904-1967), nos artigos (*Physical Review* **31**, p. 66; *Proceedings of the National Academy of Sciences (US)* **14**, p. 363) atribuía que a auto-ionização de estados excitados do átomo de hidrogênio (H) devia-se a um processo de **tunelamento**. Com efeito, a barreira de potencial coulombiana que prende o elétron atômico poderia ser distorcida por um forte campo elétrico de modo que esse elétron “veria” aquela barreira finita e tunelaria através dela. Por sua vez, os físicos, o inglês Sir Ralph Howard Fowler (1899-1944) e o alemão Lothar Wolfgang Nordheim (1899-1985) (*Proceedings of the Royal Society of London* **A119**, p. 173), e também Nordheim (*Zeitschrift für Physik* **46**, p. 833), explicaram que a emissão de elétrons por metais frios sob a ação de fortes campos elétricos, decorria do **tunelamento** desses elétrons devido ao abaixamento da barreira de potencial (esta representada pela superfície metálica), provocado por aqueles campos. Por fim, os físicos, o inglês Ronald Wilfrid Gurney (1898-1953) e o norte-americano Edward Uhler Condon (1902-1974) (*Nature* **122**, p. 439) e, independentemente, o russo-norte-americano George Antonovich Gamow (1904-1968) (*Physikalische Zeitschrift* **51**, p. 204) utilizaram a ideia de transmissão de partículas por uma barreira – posteriormente denominada **efeito túnel** (ET) –, para explicar o decaimento radioativo (vide verbete nesta série). Note que esse efeito significa a capacidade de uma partícula vencer uma barreira de potencial com uma energia menor do que a altura dessa barreira.

O interesse de Esaki pelo **tunelamento de elétrons** em semicondutores (vide verbete nesta série) ocorreu na ocasião em que trabalhou em sua Tese de Mestrado, defendida na *Universidade de Tóquio*, em 1947. Mais tarde, em 1956, quando dirigia um grupo de pesquisa na *Sony Corporation*, começou a estudar com mais detalhes o ET em um diodo de junção p-n de germânio (Ge), efeito esse conhecido como **diodo Zener**. Este tipo de diodo foi desenvolvido no começo da década de 1950 e deriva da teoria formulada pelo físico norte-americano Clarence M. Zener (1905-1993), em 1934 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A145**, p. 523), sobre o colapso (“breakdown”) dos dielétricos sólidos, segundo o qual um campo elétrico forte excita elétrons diretamente da banda de valência (vide verbete nesta série) para a banda de condução, por meio de um processo do tipo **tunelamento**. Desse modo, usando uma junção bastante estreita (cerca de 100 Å), e dopada com alta dose de impureza, Esaki observou que esse diodo apresentava uma polaridade oposta à de um diodo normal e, portanto, havia uma região de **resistência negativa**. É oportuno esclarecer que essa resistência é “dinâmica”; porém, nessa mesma região a resistência “estática” é positiva. Essa descoberta ficou conhecida como **diodo Esaki**, e foi anunciada em 1958 (*Physical Review* **109**, p. 603). É interessante registrar que Esaki só obteve seu Doutorado, em 1959, também na *Universidade de Tóquio*. Note que Esaki e o físico japonês Y. Miyahara, em 1960 (*Solid State Electronics* **1**, p. 13) observaram também aquele tipo de polaridade em um diodo de silício (Si).

Depois de trabalhar com o **tunelamento** em semicondutores homogêneos, Esaki passou a se interessar pelo **tunelamento** de junções de metal-óxido-semicondutor, do tipo, por exemplo: alumínio-óxido de alumínio-germânio-telúrio ( $A\ell-A\ell_2O_3-Ge-Te$ ) e alumínio-óxido de alumínio-estanho-telúrio ( $A\ell-A\ell_2O_3-Sn-Te$ ). Assim, em 1966, Esaki, e P. J. Stiles (*Physical Review Letters* **16**, p. 1108), Esaki (*Journal of the Physical Society of Japan: Supplement* **21**, p. 589) e, em 1967, Esaki, Leroy L. Chang e Stiles (*Journal of Applied Physics* **38**, p. 4440), demonstraram haver naquelas junções também uma região de **resistência negativa**, porém de origem diferente da região do **diodo Esaki**.

Na sequência de seu trabalho de pesquisa em **tunelamento**, Esaki e colaboradores do *Thomas J. Watson Research Center*, da *International Business Machines (IBM)*, em Yorktown Heights, em Nova York,

passaram a estudar esse tipo de processo físico em estruturas periódicas formadas de semicondutores monocristalinos, as famosas **super-redes**. Desse modo, as primeiras pesquisas sobre o transporte de elétrons nessas estruturas foram realizadas por Esaki e Raphael Tsu, na IBM, em 1970 (*IBM Journal of Research and Development* **14**, p. 61), na **super-rede** envolvendo gálio-alumínio-arsênio, do tipo:  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ . O **tunelamento** em estruturas periódicas foi também estudado no *A. F. Ioffe Physico-Technical Institute*, em Leningrado, pelos físicos russos Zhores I. Alferov (n.1930; PNF, 2000), Y. V. Zhilyaev e Y. V. Shmartsev, em 1971 (*Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov* **5**, p. 196), na **super-rede** gálio-fósforo-alumínio e gálio-arsênio em uma estrutura periódica do tipo:  $\text{GaP}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{GaAs}$ . É interessante destacar que o estudo das **super-redes** levou o grupo de Esaki à descoberta do **tunelamento** nelas é à invenção subsequente do conhecido **diódo túnel ressonante**, uma variante do **diódo Esaki**. Para um estudo mais detalhado do trabalho de Esaki com as **heteroestruturas quânticas** (HeSQ) (conforme Alferov as denominou), ver: Leo Esaki, **Nobel Lecture** (12 de dezembro de 1973).

Giaever, formado em Engenharia Mecânica no *Norwegian Institute of Technology*, em 1952, só começou a se interessar pela Física, em 1958, quando passou a fazer parte do grupo de pesquisas da *General Electric Research and Development Center*, em Schenectady, Nova York, empresa em que trabalhava, desde 1954, quando emigrou para o Canadá. Naquele centro de pesquisas, ao conhecer o trabalho de Esaki, Giaever procurou fazer um “casamento” do **tunelamento** com a supercondutividade (ver verbete nesta série). Assim, começou a medir as características de corrente-voltagem em uma junção de alumínio-chumbo ( $\text{Al-Pb}$ ), uma vez que o  $\text{Al}$  se torna supercondutor em torno de 1,2 K e o  $\text{Pb}$ , em torno de 7,2 K. Portanto, próximo de 4,0 K um desses elementos químicos poderia tornar-se um supercondutor. Assim, ao medir o *gap* [intervalo de energia, da ordem de  $kT_C$  (sendo  $k$  a **constante de Planck** e  $T_C$  é a temperatura em que o material se torna supercondutor) entre o estado fundamental e o primeiro estado excitado de um material supercondutor, medido pela primeira vez, por B. B. Goodman, em 1953 (*Proceedings of the Physics Society of London* **A66**, p. 217)] do  $\text{Pb}$ , no estado supercondutor, Giaever descobriu que a relação linear ôhmica corrente-voltagem [*lei de Ohm* (1825)] só permanecia linear em torno da energia daquele *gap*. Essa descoberta do **efeito de tunelamento em uma junção condutor-supercondutor** foi anunciada por Giaever, em 1960 (*Physical Review Letters* **5**, p. 147; 464), e confirmada por ele e K. Mergele, em 1961 (*Physical Review* **122**, p. 1101) e, independentemente, pelo físico norte-americano John Bardeen (1908-1991; PNF, 1957; 1972), também, em 1961 (*Physical Review Letters* **6**, p. 57). É interessante destacar que, como Esaki, Giaever fez sua descoberta enquanto trabalhava em sua Tese de Doutorado, defendida em 1964, no *Rensselaer Polytechnic Institute*. Maiores detalhes do trabalho de Giaever ver sua **Nobel Lecture** (12 de dezembro de 1973).

Finalizando este verbete, vejamos o trabalho de Josephson. Em 1962, quando realizava seu Doutorado na *Universidade de Cambridge*, na Inglaterra, com junções de supercondutores, ele verificou que, além do **tunelamento** de elétrons observado por Giaever, havia, também, um **tunelamento de pares de Cooper**. Conforme vimos em verbete desta série, em 1956 (*Physical Review* **104**, p.1189), o físico norte-americano Leon Neil Cooper (n.1930; PNF, 1972) mostrou que um elétron passando nas proximidades de um íon positivo de um cristal supercondutor interage com esse íon, havendo, portanto, a vibração da rede cristalina e a conseqüente emissão de um **fônon**. Desse modo, se um segundo elétron passar, subsequentemente, pelo mesmo íon, ele absorverá esse **fônon**, então os dois elétrons trocarão seus momentos lineares, e caminharão juntos no menor estado de energia possível, constituindo desde então aquele famoso **par**. A observação de Josephson levou-o a prever duas novas classes de fenômenos físicos quando uma fina película isolante era colocada entre dois supercondutores. O primeiro desses fenômenos refere-se à passagem de uma **supercorrente** através da junção e na ausência de voltagem: esse é o **efeito Josephson DC** [DC – *direct current* (corrente contínua)]. O segundo relaciona-se com o aparecimento de correntes oscilatórias de radio-frequência, quando uma voltagem AC é aplicada através da junção: esse é o **efeito Josephson AC** [AC – *alternating current* (corrente alternada)]. Essas previsões foram anunciadas por Josephson, ainda em 1962 (*Physics Letters* **1** p. 251). Registre-se que essas previsões de Josephson foram experimentalmente confirmadas, em 1963, pelos físicos norte-americanos Philip Warren Anderson (n.1923; PNF, 1977) e John M. Rowell (**efeito Josephson DC**) (*Physical Review Letters* **10**, p. 230), e S. Shapiro (**efeito Josephson AC**) (*Physical Review Letters* **11**, p. 80). Logo depois, em 1964 (*Physical Review Letters* **12**, p. 159; 274), os também físicos norte-americanos Robert C. Jaklevic, John Lambe, A. H. Silver e J. E. Mercereau mostraram que existem efeitos quânticos de interferência e de difração envolvendo supercondutores; tais efeitos foram importantes no desenvolvimento posterior dos famosos SQUID (“Superconducting Quantum Interferences Devices”). Outras informações sobre as pesquisas de Josephson, ver sua **Nobel Lecture** (12 de dezembro de 1973).



**ANTERIOR**

**SEGUINTE**