
Diodo túnel: um dispositivo quântico

Tunnel diode: a quantum device

Rodrigo Negreiros dos SantosORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6387-857X>

Universidade Federal do Tocantins, Brasil

E-mail: negreirosr@mail.uft.edu.br**Maxwell Diógenes Bandeira de Melo**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5519-8614>

Universidade Federal do Tocantins, Brasil

E-mail: maxwellmelo@uft.edu.br**Sérgio Ricardo Gobira Lacerda**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7782-8912>

Universidade Federal do Tocantins, Brasil

E-mail: gobira@uft.edu.br

RESUMO

Dentre os muitos dispositivos eletrônicos de estado sólido existentes, o diodo túnel é fisicamente singular. Constituído de uma simples junção $p-n$ em meio a duas regiões de semicondutor altamente dopadas, esse dispositivo explora a capacidade de partículas carregadas transpassarem barreiras de potencial ainda que estas não tenham energia suficiente para fazê-lo. Sua operação depende fundamentalmente desse processo, fenômeno denominado tunelamento quântico, e constitui uma aplicação primorosa da teoria quântica na engenharia elétrica. O presente artigo faz uma revisão da descrição teórica do fenômeno do tunelamento quântico e estuda alguns fatores que viabilizam, ou não, a ocorrência do tunelamento. Consequentemente, registra algumas informações essenciais sobre a aplicação do fenômeno na construção desse dispositivo eletrônico.

Palavras-chave: Mecânica quântica; Engenharia Elétrica; Tunelamento quântico; Diodo túnel.

ABSTRACT

Among the many existing solid-state electronic devices, the tunnel diode is physically unique. Comprised of a simple $p-n$ junction between two highly doped semiconductor regions, this device exploits the ability of charged particles to pass through potential barriers even when they do not have sufficient energy to do so. Its operation fundamentally depends on this process, a phenomenon called quantum tunneling, and constitutes an exquisite application of quantum theory in electrical engineering. This article provides a theoretical overview of the quantum tunneling phenomenon and examines some factors that enable or hinder tunneling. As a result, it records some essential information about the application of the phenomenon in the construction of this electronic device.

Keywords: Quantum Mechanics; Electrical Engineering; Quantum Tunneling; Tunnel Diode.

INTRODUÇÃO

Ao final do século XIX e início do século XX, a busca por explicações plausíveis para determinados fenômenos físicos observados evidenciou a inépcia das leis postuladas pela física clássica, quando aplicadas a fenômenos microscópicos. A crescente necessidade por novas teorias tornou-se a principal motivação no trabalho de grandes gênios da época, pais dos fundamentos que regem o que hoje conhecemos por mecânica quântica.

Já em 1923, ainda em sua gênese, a teoria quântica ganharia uma de suas hipóteses mais fundamentais. Em sua tese de doutorado, Louis de Broglie atribui o comportamento onda-partícula já conhecido da radiação à matéria: partículas podem apresentar caráter ondulatório. Posteriormente, coube a Schrödinger consolidar essa idéia na forma de sua célebre equação, na qual uma partícula é devidamente representada como uma solução desta equação. Por serem não nulas e contínuas mesmo em regiões classicamente proibidas¹, as soluções da equação de Schrödinger implicam na possibilidade de penetração dessas regiões, ou até mesmo o tunelamento de uma região permitida a outra, através de uma região proibida (ESAKI, 1973).

A consequência dessas previsões logo encontraria forma no desenvolvimento de um dispositivo eletrônico único: o diodo túnel. Este artigo se propõe a explorar em detalhes o fenômeno do tunelamento quântico nesses dispositivos, destacando suas bases teóricas e analisando os parâmetros que influenciam negativa ou positivamente seu funcionamento.

Esse trabalho está organizado da seguinte forma: inicialmente será realizada uma revisão histórica a respeito do tema, discorrendo sobre o desenvolvimento da mecânica quântica e das teorias nas quais fundamentam-se o artigo. Posteriormente haverá a aplicação dessas teorias, discorrendo sobre o funcionamento do diodo túnel e consolidando o objetivo principal do trabalho. Por fim, serão apresentadas as conclusões a respeito do tema proposto.

¹ Regiões onde a partícula, classicamente, não poderia ser encontrada.

UMA REVISÃO HISTÓRICA

Uma Breve História da Mecânica Quântica

A física quântica, assim como a teoria da relatividade, caracteriza uma generalização da física clássica, estendendo-a para as regiões de pequenas dimensões (EISBERG; RESNICK, 1988). Em um artigo apresentado à Sociedade Alemã de Física em 1900, Max Planck apresentou resultados sobre seu estudo da distribuição de energia do espectro normal, o estopim de uma revolução na física teórica. Introduzindo sua constante h , Planck define o conceito mais fundamental da teoria quântica: a quantização da energia.

Já em 1905, Albert Einstein utilizaria o conceito inovador de Planck como base para o desenvolvimento de outra ideia revolucionária. A capacidade da luz em “arrancar” elétrons de uma superfície metálica era fato comum para a época, entretanto, coube a Einstein observar que os elétrons eram ejetados sempre a uma mesma velocidade, independente da quantidade de luz incidida no metal. De acordo com Sergio (2016), Einstein foi o responsável por compreender que esse comportamento só poderia ser possível caso a luz fosse entendida como uma partícula, responsável por transportar um *quantum* de energia $h\nu$. Mais tarde, esse mesmo *quantum* seria denominado fóton, e representaria a natureza quantizada e dual da luz.

Posteriormente, de Broglie atribuiria, também, uma natureza dual (onda-partícula) a matéria, onde relaciona conceitos corpusculares, como energia e momento (p), a conceitos de caráter ondulatório, como comprimento de onda (λ) e frequência, todos interligados pela constante de Planck na chamada relação de de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

Associado a essa dualidade, a observação de fenômenos microscópicos sugeria um caráter puramente probabilístico para a mecânica quântica, deixando de lado o determinismo observado em teorias clássicas. Afinal, como determinar a posição exata de uma onda? A resposta a essa questão fora apresentada por Werner Heisenberg, em seu célebre princípio da incerteza. Uma distribuição em comprimentos de onda, de acordo com a relação de de Broglie, será correspondente a uma distribuição do momento, de forma que quanto mais precisa for a determinação da posição da partícula, menos preciso será seu momento (GRIFFITHS, 2011).

Entretanto, a abordagem ondulatória da matéria só seria realmente consolidada nos trabalhos de Erwin Schrödinger, o qual introduz sua equação e demonstra que uma partícula qualquer, de massa m , tem seu estado quântico descrito por uma função de onda $\Psi(x, t)$. É importante lembrar que a problemática será satisfatoriamente abordada por uma análise unidimensional da mecânica quântica, já que o objetivo proposto pelo trabalho se resume ao movimento de cargas em circuitos.

A Equação de Schrödinger Independente do Tempo

Em sua forma mais geral, a equação de Schrödinger para o caso unidimensional é definida por:

$$\frac{-\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} + V(x, t) \Psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t}.$$

As soluções $\Psi(x, t)$ da equação de onda devem ser interpretadas como o movimento de uma partícula de massa m sob influência de forças devidamente descritas pela função energia potencial $V(x, t)$ (EISBERG; RESNICK, 1988). Durante sua concepção, Schrödinger garante as condições de linearidade e continuidade para as soluções de sua equação, fato essencial nas futuras aplicações.

O estudo do tunelamento levará em conta os muitos casos onde a energia não apresenta variação com o tempo, ou seja, são descritas por um potencial $V(x)$. Nesses casos, aplicando um simples método de separação de variáveis, obtemos a forma atemporal da equação de Schrödinger, definida na forma:

$$\frac{-\hbar}{2m} \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + V(x) \psi(x) = E \psi(x),$$

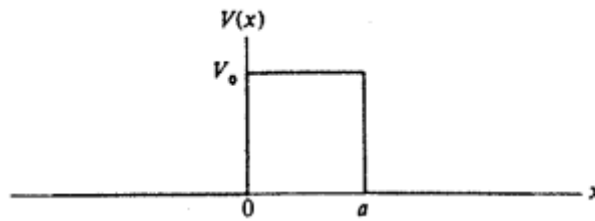
em que E é a energia total da partícula. Observe que a função $\psi(x)$ é uma solução independente do tempo, e somente determina a dependência espacial das soluções $\Psi(x, t)$ da equação original, onde

$$\Psi(x, t) = \psi(x) e^{\frac{-iEt}{\hbar}}.$$

Barreiras de Potencial: O Tunelamento Quântico e o Coeficiente de Transmissão

Nessa seção discutiremos as soluções da equação de Schrödinger para o caso de uma barreira retangular de potencial, conforme ilustrado na figura abaixo.

Figura 1 - A barreira retangular.



Fonte: Eisberg; Resnick (1988, p. 259).

A função potencial para esse caso será:

$$V(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < 0, \\ V_0, & \text{se } 0 \leq x \leq a, \\ 0, & \text{se } x > a. \end{cases}$$

Suponha que uma partícula de massa m , viajando no sentido crescente de x , incida na barreira de potencial com uma energia $E < V_0$. A barreira divide o espaço em três regiões distintas. Para cada uma dessas regiões, portanto, haverá uma solução da equação de Schrödinger da forma:

$$\begin{aligned} \psi_I(x) &= Ie^{ikx} + Re^{-ikx}, \quad x < 0 \text{ e } k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}, \\ \psi_{II}(x) &= Ae^{qx} + Be^{-qx}, \quad 0 \leq x \leq a \text{ e } q = \sqrt{\frac{2mV_0}{\hbar^2} \left(1 - \frac{E}{V_0}\right)}, \\ \psi_{III}(x) &= Te^{ikx}, \quad x > 0 \text{ e } k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}. \end{aligned}$$

As soluções da equação de Schrödinger, bem como suas derivadas, devem ser contínuas. A onda de matéria incidida I pode existir no outro lado da barreira, na forma transmitida T , ou ser refletida na forma de onda R . Para o estudo do tunelamento, a razão

$$t = \frac{|T|^2}{|I|^2}$$

será de extrema utilidade, uma vez que o módulo ao quadro de I representará a probabilidade por unidade de comprimento que a partícula incidida “transporta” na direção da barreira, sendo análogo a T , este representando a probabilidade que a partícula transmitida “transporta” ao infinito (SERGIO, 2016). Dessa forma, a razão acima expõe a probabilidade de a partícula transpor a barreira, sendo denominada coeficiente de transmissão e definida como:

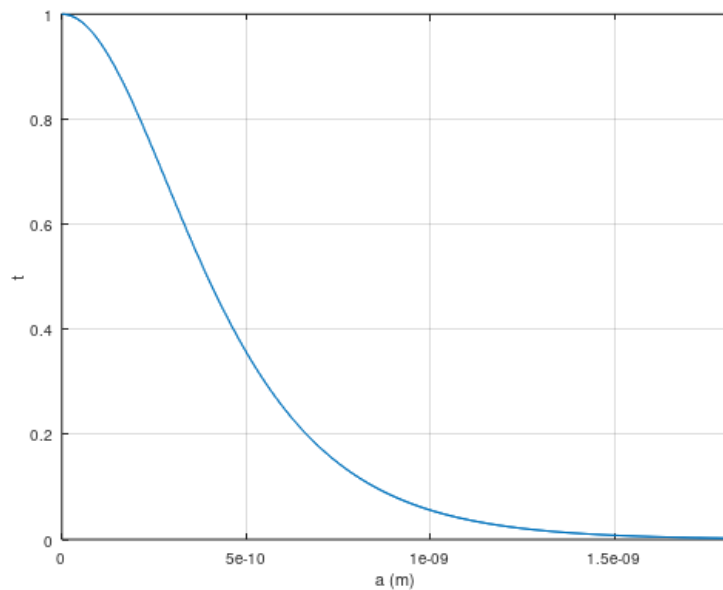
$$t = \frac{|T|^2}{|I|^2} = \left[1 + \frac{\sinh^2(qa)}{4 \frac{E}{V_0} \left(1 - \frac{E}{V_0} \right)} \right]^{-1}.$$

Uma Análise dos Fatores que Influenciam a Probabilidade de Tunelamento

A partir do coeficiente de transmissão, podemos agora estudar seu comportamento de acordo com a variação de determinados parâmetros. Como exemplo, utilizaremos um elétron de massa m_e viajando no sentido positivo do eixo x . Havendo, na origem do sistema uma barreira de potencial de comprimento a e altura $V_0 = 0,2 \text{ eV}$, qual será a probabilidade de tunelamento da partícula? Considerando que a energia total do elétron seja sempre menor que a do potencial, podemos variar o comprimento da barreira para diferentes níveis de energia, e conseqüentemente, para diferentes valores de E/V_0 .

Inicialmente, para $E = 0,05 \text{ eV} = 25\% V_0$:

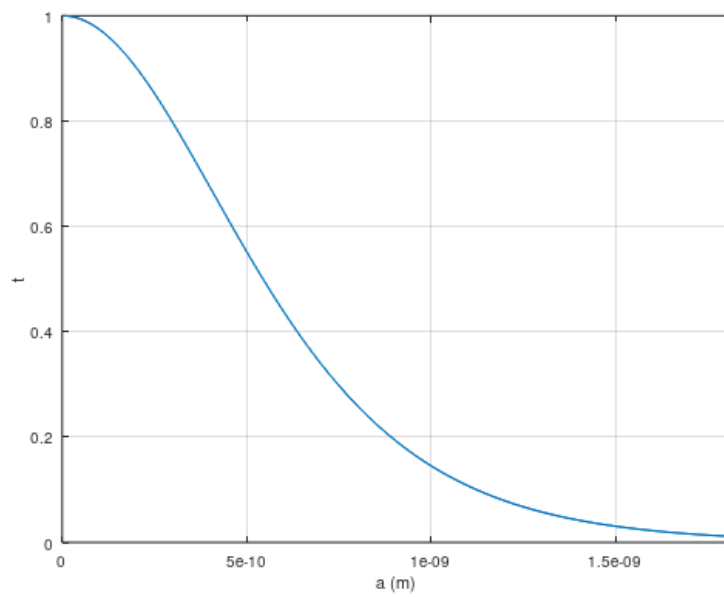
Figura 2 - Variação de t em função de a para 25% de V_0 .



Fonte: Autor, 2023.

Observe que uma probabilidade de tunelamento razoável só é observada para comprimentos inferiores a 5 ångström. Aumentando o nível de energia para $E = 0.1 \text{ eV} = 50\% V_0$, obtemos:

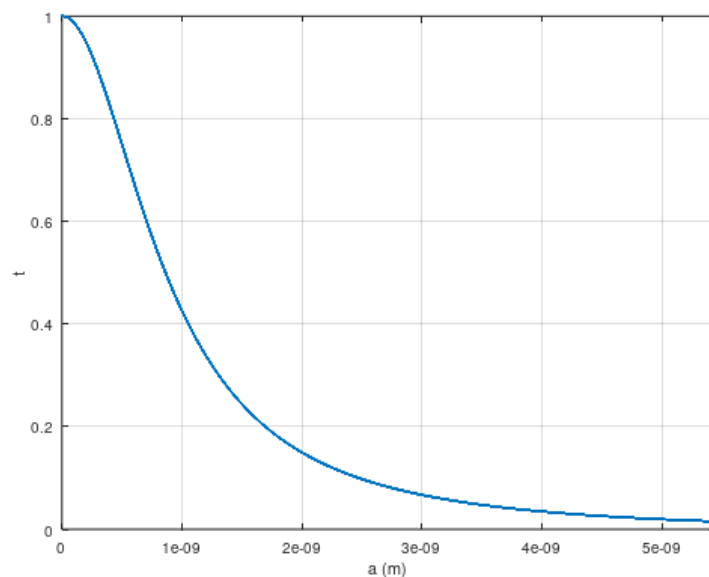
Figura 3 - Variação de t em função de a para 50% de V_0 .



Fonte: Autor, 2023.

A análise gráfica torna evidente que o acréscimo no nível de energia da partícula favorece a ocorrência do tunelamento. Isso pode ser verificado mais claramente para uma situação extrema, onde $E = 0.198 \text{ eV} = 99\% V_0$.

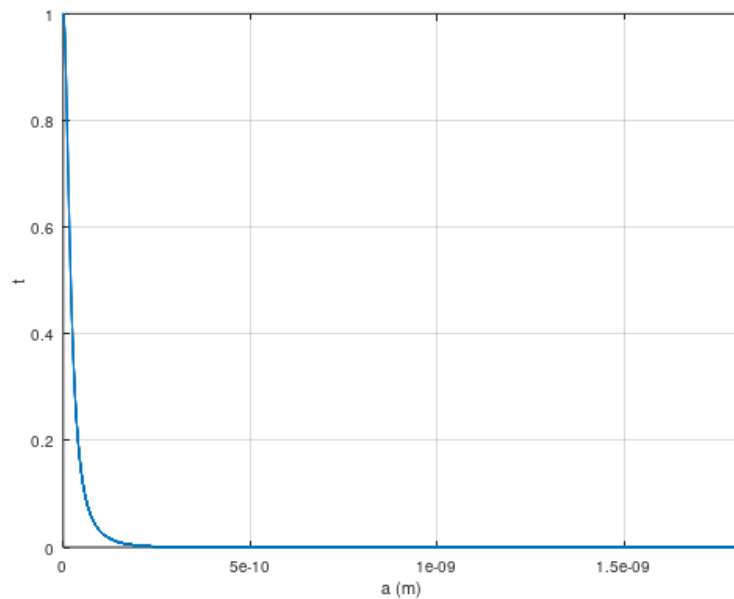
Figura 4 - Variação de t em função de a para 99% de V_0 .



Fonte: Autor, 2023.

Agora uma probabilidade de tunelamento apreciável já pode ser observada para comprimentos de 10 ångström. O que nos leva a concluir que um dos principais fatores para que haja uma probabilidade considerável de tunelamento seja o comprimento da barreira, assim como o nível de energia da partícula. Entretanto, estes não são os únicos. Considere agora um próton sob as mesmas condições do exemplo anterior, com $E = 99\% V_0$. Sabe-se que a massa de um próton é cerca de 10.000 vezes maior que a de um elétron e , como consequência, notamos o efeito mostrado na Figura 5:

Figura 5 – A variação de t para um próton com 99% de V_0 .



Fonte: Autor, 2023.

Isso demonstra como uma alteração na massa é capaz de alterar radicalmente o comportamento da curva. Mas o que isso nos diz? De fato, ao buscar exemplos de tunelamento na natureza, na sua imensa maioria, iremos observar esse comportamento atribuído a elétrons. Podemos agora inferir que um dos principais motivos para tal é determinado justamente pela massa desprezível do elétron, característica fundamental para a aplicação desse fenômeno no funcionamento de dispositivos eletrônicos como o diodo túnel.

Não obstante, os parâmetros analisados nesse tópico nos permitem definir outra propriedade que pode ser atribuída a uma barreira de potencial: a opacidade (opc). Esta nada mais é do que a relação

$$opc = \frac{2mV_0a^2}{\hbar^2},$$

e representa o quão transponível será a barreira, sendo inversamente proporcional ao coeficiente de transmissão.

O DIODO TÚNEL

Semicondutores

Semicondutores são cristais de elementos com condutividade intermediária, encontram-se entre um bom condutor e um isolante. Os mais frequentemente utilizados são o silício (Si), germânio (Ge) e arseneto de gálio (GaAs), visto que suas estruturas atômicas permitem mais facilmente o processo de dopagem². Segundo Sedra et. al. (2020), materiais do tipo *n* apresentam impurezas responsáveis por aumentar o número de portadores livres (elétrons livres) do semicondutor, conseqüentemente elevando sua condutividade. Essas impurezas são átomos pentavalentes³, como o fósforo. Já materiais do tipo *p* apresentam lacunas em suas estruturas como consequência da adição de elementos trivalentes⁴, como o boro. Dessa forma, “a lacuna resultante aceitará prontamente um elétron livre” (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Diodos de Junção *p-n*

Uma das principais revoluções tecnológicas da humanidade aconteceu quando, em dezembro de 1947, introduziu-se o primeiro transistor. A partir disso os dispositivos de estado sólido (semicondutores) são a base dos circuitos integrados. Dentre eles, o mais simples, temos o diodo. A função mais fundamental de um diodo consiste em conduzir corrente em um sentido definido (polarização direta), agindo como um circuito aberto caso haja uma tentativa de se estabelecer corrente no sentido contrário (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013). A partir desse princípio básico, o diodo permite uma variada gama de aplicações na engenharia, com destaque na construção de retificadores⁵. Em sua forma

² Adição de determinadas impurezas na estrutura pura do semicondutor, alterando significativamente as propriedades elétricas do material.

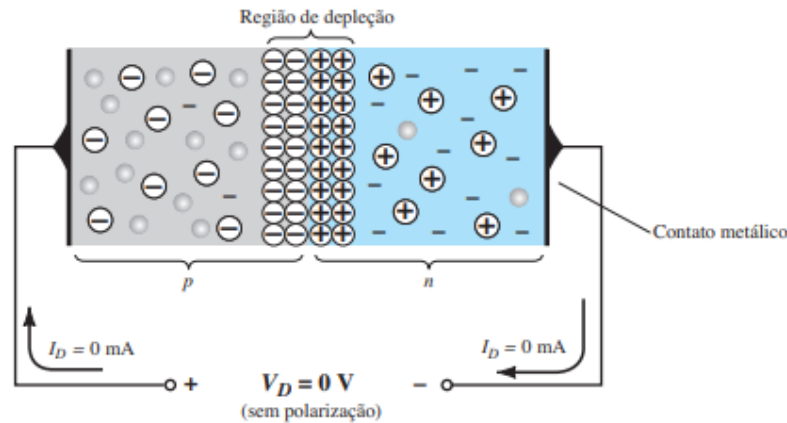
³ Átomo com cinco elétrons em sua camada de valência.

⁴ Átomo com três elétrons em sua camada de valência.

⁵ Dispositivos reponsáveis pela conversão de sinais CC em CA.

estrutural mais simplista, é composto por uma junção de semicondutores do tipo $p-n$, como ilustrado abaixo:

Figura 6 - Ilustração de uma junção $p-n$.



Fonte: BOYLESTAD; NASHELSKY (2013, p. 10).

Assim que realizada a junção, haverá um processo de recombinação que levará os elétrons livres do material tipo n a se combinarem com as lacunas presentes no material tipo p , e conseqüentemente, um esgotamento de portadores livres na região próxima a junção. Devido a isso, uma região de depleção surgirá em ambos os lados da junção, com uma concentração de carga positiva na região n e negativa em p , estas responsáveis pela geração de um campo elétrico e, portanto, uma diferença de potencial (MALVINO; BATES, 2016). Esse campo irá se opor a transição de portadores para o lado p e a região de depleção agirá como uma barreira de potencial a ser superada, limitando o processo de difusão. A condução de corrente no diodo acontece quando aplicamos tensão em seus terminais, de forma que este fique diretamente polarizado. Por exemplo, diodos de silício entram em condução quando submetidos a um nível de tensão de aproximadamente $0,7\text{ V}$.

Uma Análise da Polarização Direta

Apresentado em 1958 por Leo Esaki, o diodo túnel é um dispositivo ativo e de simples composição. Possui dois terminais e é aplicável em uma variedade de funções como amplificação, conversão de frequência, comutação, etc. Suas propriedades elétricas derivam-se da propagação de ondas de elétrons através da região de depleção de uma junção $p-n$, que em geral possui uma espessura inferior a 100 \AA (HALL, 1960). Segundo

Boylestad e Nashelsky (2013), a fabricação desse diodo envolve uma intensa dopagem dos semicondutores que o constituem, chegando a ser mais de mil vezes maior do que é realizado em diodos convencionais. Ainda de acordo com os autores, esse processo de alta dopagem produziria uma região de depleção muitíssimo reduzida.

Na fase inicial de seus estudos sobre estruturas eletrônicas de junção *p-n*, Esaki procura desenvolver junções de germânio altamente dopadas, com espessura da ordem de 200 Å. Como resultado, o autor obtém um diodo de propriedades condutivas maiores na direção de polarização reversa do que na direta. Segundo o autor, “nessa junção a possibilidade de avalanche⁶ foi completamente excluída, já que a quebra ocorre muito abaixo da tensão de limiar para a produção de pares elétron-lacuna.” (ESAKI, 1973, p. 120). Esaki conclui que o fluxo majoritário de corrente na direção reversa devia-se ao tunelamento dos portadores nessa mesma direção, e que qualquer fluxo de corrente na direção direta, mesmo para baixos níveis de tensão terminal, seria também consequência do tunelamento dos portadores. Ademais, ao resfriar o componente, Esaki observa, pela primeira vez, a aparição de uma resistência negativa na direção de polarização direta, característica singular dos diodos túnel. Ao estreitar ainda mais a largura da barreira (região de depleção) por meio do aumento na dopagem, o autor passa a observar o fenômeno de resistência negativa em todas as temperaturas.

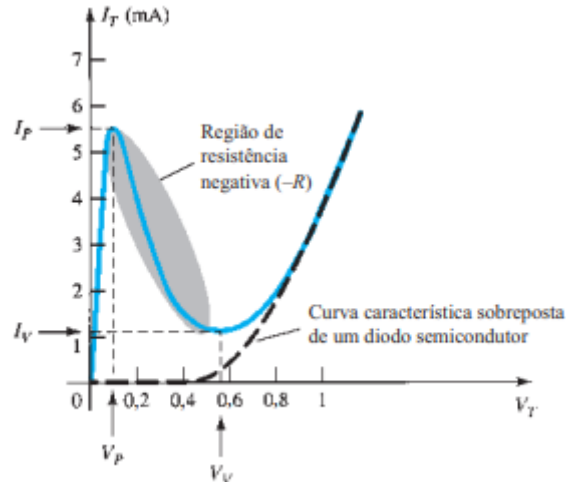
A origem da região de resistência negativa deve ser considerada, já que algumas das propriedades úteis dos diodos túnel dependem dela (HALL, 1960). Como discutido na seção sobre diodos, a junção de materiais dos tipos *p* e *n* dão início a um processo de recombinação. A concentração oposta de cargas resultante configura um dipolo, que por sua vez, produz um campo elétrico interno responsável por uma variação súbita do potencial (barreira). Ao aplicarmos uma tensão externa direta, nos terminais do diodo, haverá uma tentativa de se estabelecer um fluxo de elétrons de um lado da junção ao outro. Entretanto, de acordo com a Fig. 6, o sentido do campo elétrico interno fará oposição a esse fluxo, impedindo que o mesmo aconteça.

Segundo Hall (1960), caso essas regiões de depleção forem finas o suficiente, é possível que elétrons atravessem a barreira de potencial da junção por meio do tunelamento quântico. E ainda, define duas condições necessárias para que haja um valor de corrente considerável: a junção deve ser estreita o suficiente para que a probabilidade

⁶ Corrente reversa obtida ao submeter o dispositivo a uma tensão superior à tensão de pico reversa.

de tunelamento seja apreciável e, em segundo, a existência de lacunas de um lado da junção para as quais os elétrons possam tunelar, conservando sua energia.

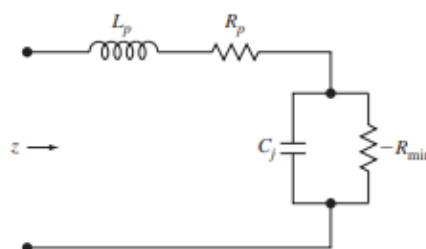
Figura 7 - Curva característica do diodo túnel para polarização direta.



Fonte: BOYLESTAD; NASHELSKY (2013, p. 698).

O gráfico acima ilustra o comportamento da corrente no diodo em função da tensão terminal aplicada. No intervalo de 0 a V_p (tensão de pico), a corrente presente no dispositivo se dá inteiramente pelo processo de tunelamento, até que esta atinja um valor de pico I_p . Ao atingir esse valor, a disponibilidade de lacunas compatíveis ao nível de energia proporcionado aos elétrons pelo aumento da tensão começa a cair, e a corrente por tunelamento decresce com o aumento da tensão, resultando no efeito de resistência negativa observado. Quando os limites inferiores I_V e V_V são atingidos, a corrente de difusão, presente em diodos de junção p-n convencionais, passa a ser dominante e o diodo túnel se comportará como um diodo comum (linha tracejada). Outra característica relevante de um diodo túnel encontra-se na análise do seu circuito equivalente:

Figura 8 - Circuito equivalente do diodo túnel.



Fonte: NEAMEN (2012, p. 672)

O parâmetro C_j representa a capacitância da junção, enquanto L_p e R_j representam indutâncias e resistências intrínseca dos condutores ou parasitas (NEAMEN, 2012). A região de resistência negativa é aqui representada por $-R_{min}$. A impedância total do circuito pode ser obtida⁷:

$$z = R_p + j\omega L_p + z_{eq} = \left[R_p - \frac{R_{min}}{1 + \omega^2 R_{min}^2 C_j^2} \right] + j\omega \left[L_p - \frac{\omega R_{min}^2 C_j}{1 + \omega^2 R_{min}^2 C_j^2} \right].$$

Observe que a parcela real da impedância, correspondente as características resistivas do circuito, pode ser matematicamente anulada caso

$$R_p = \frac{R_{min}}{1 + \omega^2 R_{min}^2 C_j^2}.$$

Sendo $\omega = 2\pi f$, pode-se encontrar uma frequência f_r para qual a resistência se anule, determinada com uma simples manipulação algébrica da expressão anterior. Isso nos resulta:

$$f_r = \frac{1}{2\pi R_{min} C_j} \sqrt{\frac{R_{min}}{R_p} - 1}.$$

De acordo com Neamen (2012), para valores de frequência superiores a f_r a parcela resistiva da impedância assumirá valores positivos, conseqüentemente, veremos a perda da característica mais diferencial do diodo túnel: sua resistência negativa. A frequência de operação f_o do dispositivo deve, portanto, se manter em valores menores que f_r . A frequência f_r é denominada “frequência de corte resistiva máxima.” (NEAMEN, 2012, p. 672). Ainda assim, o diodo túnel é um dispositivo que opera em frequências muito altas, muitas vezes em valores próximos a frequências de micro-ondas. Germânio e arseneto de gálio são os materiais semicondutores de uso recorrente na construção do dispositivo.

Segundo Boylestad e Nashelsky (2013), apesar de ter sido observado uma diminuição no uso desses dispositivos nos sistemas modernos de alta frequência, algumas características do diodo, como sua simplicidade estrutural, consumo de potência reduzido e confiabilidade são responsáveis por garantir sua utilização até hoje.

⁷ A letra j presente na equação é o termo utilizado na engenharia elétrica para a unidade imaginária $i = \sqrt{-1}$.

CONCLUSÃO

O diodo túnel é uma conquista memorável da física quântica aplicada à eletrônica de alta velocidade. Seu funcionamento e características singulares, quando analisados, demonstram a capacidade de previsão da teoria quântica. Assim como previsto pelo coeficiente de opacidade, vimos, a partir da análise gráfica realizada, como o aumento na largura da barreira e , em um caso mais extremo, a variação da massa atenuam a probabilidade de tunelamento. Em todos os níveis de energia exemplificados, valores razoáveis para o coeficiente de transmissão foram obtidos com uma largura próxima a 5 \AA , e conforme o aumento da razão E/V_0 , essa largura pôde ser maior, com valores na faixa de 10 \AA . Já a alteração na massa evidenciou a inviabilidade de partículas como o próton, com massa não desprezível, de realizar o tunelamento. Isso vai de acordo com o fato de que, na natureza, o fenômeno de tunelamento é frequentemente observado em elétrons, já que este possui uma massa ínfima quando comparada a do próton.

Em contrapartida, o aumento no nível de energia das partículas – assim como a diminuição do potencial V_0 – atua para beneficiar essa probabilidade. Porém, em certas situações, isso só ocorrerá até determinado ponto. Como vimos, para casos de polarização direta, o aumento do potencial, e conseqüentemente da energia dos portadores, acaba por inviabilizar o tunelamento quando este atinge um valor limiar, aqui definido por V_p . Tal fato não configura um aspecto negativo do dispositivo, já que por conseqüência disso o diodo manifestará sua característica mais exótica: a região de resistência negativa. Sua aplicação na eletrônica se beneficiará dessa característica, e algumas aplicações a utilizarão para reduzir o efeito restivo intrínseco de qualquer material condutor. Para que isso ocorra, o diodo deve, portanto, operar abaixo de sua frequência de corte resistiva máxima. O fenômeno de resistência negativa nesses diodos é muito bem aplicável na construção de instrumentos como osciladores, geradores de pulso e amplificadores. Não obstante, tecnologias emergentes como a computação quântica abrem espaço para a exploração de novas aplicações do dispositivo.

REFERÊNCIAS

- BOYLESTAD, Robert L; NASHELSKY, Louis. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. 11. ed. São Paulo: Pearson, 2013.
- EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. Física Quântica. São Paulo: Elsevier, 1979 – 24ª reimpressão.
- ESAKI, Leo. Long journey into tunneling. New York: Nobel Prize Lecture, p. 116-133, 1973.
- GRIFFITHS, David J. Mecânica quântica. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2011.
- HALL, R. N. Tunnel diodes. IRE Transactions on Electron Devices, v. 7, n. 1, 1960.
- MALVINO, Albert P.; BATES, David J. Electronic principles. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2016.
- NEAMEN, Donald. Semiconductor physics and devices: basic principles. 4. ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 2012.
- SEDRA, ADEL S. et al. Microelectronic circuits. 8. ed. New York: Oxford University Press, 2020.
- SERGIO, Cássio G. Confinamento e espalhamento por potenciais retangulares. 1. ed. Editora Letras e Versos, 2016.