

## História da Eletricidade

Versão 1.0 (Nov. 2000)  
Mauricio Massazumi Oka

A primeira observação da **eletrificação** de objetos por atrito perdeu-se na antiguidade. Os filósofos **gregos**, como por exemplo, Thales, de Mileto, no ano **600 a.c.**, já sabiam que ao esfregar uma peça de âmbar com um pedaço de lã ou pele, eram capazes de conferir ao âmbar a propriedade de atrair pequenos pedaços de palha. A palavra elétron, aliás deriva da palavra âmbar (elektron), em grego. Esta constatação originou a ciência da eletricidade.

Os **gregos** sabiam também que algumas "pedras", as **magnetitas** (lodestones) que eram encontradas em Magnesia, uma localidade da Ásia Menor, podiam atrair exclusivamente o ferro, e isto mesmo sem serem esfregadas. O estudo desta propriedade origina a ciência do magnetismo. No **século 11, árabes e chineses** usavam a magnetita flutuando sobre a água para se orientarem ao navegar pelos mares. Eram as **bússolas**. O primeiro estudo sistemático dos ímãs foi feito em **1269** por Pierre de Maricourt. Ele usou uma agulha magnetizada para traçar o que chamava de "**linhas de força**" ao redor de uma esfera de magnetita e descobriu que estas linhas convergem em duas regiões, em lados opostos da esfera, como as linhas longitudinais da Terra. Por analogia, ele chamou as regiões onde as linhas de força convergem de pólos. Em **1600**, William Gilbert estendeu estes trabalhos e sugeriu que a própria **Terra** comporta-se como um gigantesco **ímã**. Por volta de **1753**, observações de que **relâmpagos** eram capazes de conferir **propriedades magnéticas** a peças de ferro sugeriam uma convergência entre a eletricidade e o magnetismo, mas demorou ainda algum tempo até que a relação entre as duas ciências se tornasse clara.

Em **1600**, William Gilbert, médico da rainha Elizabeth I, foi o primeiro a distinguir claramente entre fenômenos elétricos e magnéticos. Foi ele quem cunhou a palavra eletricidade, derivando-a de "elektron" que significa âmbar em grego. Gilbert mostrou que o efeito elétrico não é exclusivo do âmbar, mas que muitas **outras substâncias podem ser carregadas eletricamente** ao serem esfregadas.

Em **1729** Stephen Gray observou que era capaz de transferir a carga elétrica de um bastão de vidro para uma bola de marfim pendurada por um barbante. Porém a transferência de carga não ocorria se a bola era pendurada por um fio metálico. Daí concluiu que o metal "levava embora" o fluido (carga). Gray concluiu que a maior parte das substâncias podem ser classificadas de **condutoras** ou **isolantes**. Os condutores, como por exemplo os metais e soluções iônicas, permitem o fluxo livre do fluido, enquanto que os isolantes, como por exemplo a madeira, borracha, seda e vidro, não permitem o fluxo do fluido.

Quando um bastão de vidro é friccionado por seda, ambos ficam carregados. Imagine a seguinte experiência. Duas bolas de isopor são suspensas por fios e colocadas próximas uma da outra. Ao tocar ambas as bolas com o bastão de vidro, ou ambas com seda, as bolas se repelem. Tocando uma das bolas com o vidro e a outra com seda elas se atraem. Baseado neste tipo de evidência, Charles du Faye, em **1733**, propôs que existem **dois tipos de cargas**, que são observáveis como "fluxos elétricos", e que as cargas iguais se repelem enquanto que as cargas diferentes se atraem. O tipo da carga do vidro foi chamado de "**vítreo**" e o tipo da carga da seda ou do âmbar de "**resinoso**". du Fay acreditava que estas cargas eram separadas pelo ato da fricção.

Por volta de **1750** Benjamin Franklin propôs que **um único tipo de fluido** flui de um corpo para o outro pela fricção, designando de **positivamente carregado** o corpo que acumulou fluido e **negativamente carregado** o corpo que perdeu fluido. Franklin realizou também a seguinte experiência: colocou duas pessoas, A e B, sobre um pedestal coberto de graxa para evitar a perda de carga. Depois de carregar um deles com o bastão de vidro e o outro com o pano de seda, observou que um terceiro indivíduo, C, aproximando-se de qualquer um deles causava o aparecimento de uma faísca. Contudo se A e B se tocavam, não havia faísca. Franklin concluiu que as cargas armazenadas no bastão de vidro e na seda eram de mesma amplitude mas de sinais opostos e propôs ainda que a carga nunca é criada ou destruída, mas simplesmente transferida de um corpo para o outro. Hoje chamamos a esta propriedade de **Conservação da Carga**.

Em **1753**, John Canton descobriu que é possível carregar um objeto metálico isolado eletricamente mesmo sem tocá-lo fisicamente com outro objeto carregado. Imagine por exemplo duas bolas metálicas sobre pedestais isolantes, em contato entre si. Aproxima-se um bastão de vidro positivamente carregado de uma das bolas. Nesta situação, separa-se as duas bolas e afasta-se o bastão de vidro. Canton observou que a bola próxima ao bastão de vidro ficou carregada negativamente, enquanto que a outra ficou carregada positivamente, e que a quantidade de carga armazenada era a mesma nas duas bolas. Este fenômeno é chamado de **indução**.

Durante todo o século XVIII uma série de experiências foram realizadas, mas as observações eram meramente qualitativas. O primeiro passo importante na quantificação das forças elétricas foi dado pelo químico Joseph Priestley, descobridor do oxigênio, em **1766**. Poucos anos antes, Benjamin Franklin havia realizado a seguinte experiência. Era conhecido que um copo metálico carregado era capaz de atrair um pequeno corpo descarregado e que este corpo neutro se carregava prontamente em contato com a superfície externa do copo. Contudo, ao suspender uma pequena esfera de

cortiça no interior de um copo metálico tapado carregado, constatou que não atuava nenhuma força sobre a cortiça. E ainda, colocando o corpúsculo em contato com a superfície interna do copo, ele não se carregava. A pedido de Franklin, Priestley confirmou tal resultado. A única força conhecida à época era a força da gravidade, proporcional a  $1/r^2$ . Sabia-se também que a força no centro de uma distribuição de massa na forma de uma calota esférica seria nula. Por analogia Priestley propôs que a força elétrica deveria ser **proporcional a  $1/r^2$** . Contudo, o trabalho definitivo sobre as forças elétricas é creditada a Charles Auguste Coulomb. Em **1785** Coulomb realizou o seguinte experimento. Ele carregou com uma quantidade de carga  $Q$  uma pequena bola de seiva vegetal ("pith") recoberta de ouro. Tocando-a com uma outra bola idêntica, sabia que cada uma delas ficaria com metade da carga ( $Q/2$ ). Repetindo esse processo Coulomb foi capaz de obter várias quantidades de carga. Para medir a força entre as bolas ele valeu-se de uma balança de torção. Manteve uma das bolas fixas e a outra, num arranjo de halteres com um contrapeso, foi suspensa por um fio de seda ligado a um dinamômetro. Coulomb descobriu que, mantendo as cargas constantes, a força é proporcional a  $1/r^2$ , enquanto que mantendo a distância fixa, a força é proporcional ao produto das cargas. Ou seja,

$$F = kqQ/r^2$$

onde  $k$  é uma constante que vale:

$$k = 9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$$

Durante o século XVIII os conceitos de diferença de potencial e corrente elétrica foram sendo desenvolvidos aos poucos. Contudo, um estudo mais sistemático da correlação entre estas duas grandezas era dificultado por uma série de razões. Uma das razões era a inexistência de uma fonte de corrente contínua. Até 1800, a única forma para produzir uma corrente elétrica era descarregar uma **garrafa de Leyden** ("Leyden jar") através de um condutor. Naturalmente isto produzia apenas uma corrente transitória. Não se sabia também se o condutor era apenas um caminho através do qual passa o "fluido" elétrico ou se exercia algum outro papel ativo. Além disso não existiam instrumentos de medidas de grandezas elétricas. Os investigadores precisavam usar seu corpo, língua e olhos como detetores.

Vamos falar um pouco mais sobre a garrafa de Leyden. Nos primórdios dos estudos da eletricidade não existiam meios para armazenar a eletricidade por períodos prolongados. Mesmo mantendo um corpo carregado sobre bases muito bem isoladas as cargas tendiam a desaparecer rapidamente. A perda do "fluido elétrico" (carga) era atribuída a alguma forma de evaporação, de modo que procurava-se uma forma de "**condensar**" a carga. Em **1745**, E. G. von Kleist, um clérigo alemão, imaginou que **guardando a água carregada numa garrafa** seria possível reduzir a perda de carga. Ele colocou água numa garrafa de vidro, tampou-a com uma rolha e espetou um prego através da tampa, que entrava em contato com a água. Segurando a garrafa com uma das mãos, conectou o prego a uma máquina de carregar "fluido elétrico" por um certo tempo, antes de desconectá-lo. Sendo um amador von Kleist cometeu o erro de não colocar a garrafa sobre uma superfície isolante. Quando tocou no prego com a outra mão recebeu um tremendo choque. Mais tarde ele descobriu que a **garrafa pode manter-se carregada por longos períodos**, desde que não seja mexido.

Outras pessoas tentaram reproduzir o experimento, sem sucesso, pois procediam da forma usual, isolando a garrafa enquanto a carregavam. Três meses depois, em **1746**, Pieter van Musschenbroek, um professor na **Universidade de Leiden**, percebeu que era **necessário segurar a garrafa tanto durante a carga quanto durante a descarga**. Durante o carregamento, o condutor interno carregado (a água) induz uma carga oposta no outro condutor (a mão), que fica conectado ao terra por meio de um condutor (o corpo). O choque é sentido quando as cargas passam de uma mão para a outra. O processo de descarga é muito mais rápido que o de carga. Outros, logo perceberam que a água poderia ser substituída por bolinhas de chumbo. Mais tarde, as bolinhas de chumbo e a mão foram substituídas por folhas de metal cobrindo as superfícies interna e externa da garrafa de vidro. Depois, Benjamin Franklin substituiu a garrafa de vidro por uma placa plana de vidro. Finalmente, o mais simples destes dispositivos passou a ser duas placas metálicas paralelas separadas por ar. Surgiu assim o "condensador", hoje mais conhecido como capacitor.

Em **1780** Luigi Galvani, fisiologista italiano, descobriu a "eletricidade animal" e realizava experiências sobre os efeitos da descarga elétrica através de tecidos animais, usando geradores eletrostáticos. Ele havia dissecado um sapo e ocorreu de estar tocando num nervo com um bisturi quando um gerador nas proximidades produziu uma descarga elétrica. Isto fez com que os músculos do sapo se contraíssem, mesmo sem haver contato elétrico entre o gerador e o bisturi, ou seja, por indução, um fenômeno que era desconhecido a Galvani. Ao invés de ater-se à indução, no entanto, Galvani resolveu usar esta descoberta para outro fim. Ele observou que as pernas de um sapo pendurado por um nervo se contraíam quando ocorria um relâmpago e decidiu tentar medir a eletricidade existente com tempo bom e seco (fair-weather field), que era sabido existir. Ele prendeu a espinha do sapo num gancho de latão e pendurou o sapo numa grade de ferro. Quando nada ocorria por um bom tempo ele se impacientou e, enquanto remexia no arranjo, inadvertidamente tocou o gancho na grade, quando começou a observar uma série de contrações dos músculos do sapo. O mesmo efeito foi observado quando o sapo foi colocado sobre uma mesa de ferro e o gancho foi colocado em contato com a mesa. Mais tarde ele descobriu que outros pares de metais, como por exemplo Cu e Zn, eram também capazes de causar estas contrações. Ele publicou os resultados em **1791** e chamou o fenômeno de "**eletricidade animal**".

Alessandro Volta, da Universidade de Pavia, repetiu os experimentos e inicialmente aceitou a idéia da "eletricidade animal". Ele observou que quando duas tiras de metal – como por exemplo, prata e zinco – eram unidas e as outras extremidades eram colocadas em contato com a língua, uma sensação definida de "gosto" era produzida. Volta, de fato, usou o gosto para classificar as propriedades elétricas dos metais. Em **1796** ele descobriu que placas de Cu e Zn ficam carregadas pelo mero contato dos dois metais. Ele finalmente concluiu que o efeito dependia do uso de diferentes metais e que o tecido animal funcionava apenas como um meio condutor entre os dois. Numa tentativa de amplificar o efeito, empilhou vários discos de Zn e Cu, mas não observou nenhum aumento do efeito. A capacidade de enguias elétricas produzir choques elétricos era conhecida desde a época dos gregos. Volta sabia também que os órgãos elétricos destes animais possuíam uma estrutura laminar (de várias camadas) intercaladas por fluido. Ele se valeu dessa evidência e separou os pares de discos de Zn e Cu com papel enopado por solução salina ou ácida. Com este arranjo ele pôde produzir várias centelhas e incandescer fios metálicos. Em **1799** ele anunciou o invento da "**pilha voltaica**", que pela primeira vez permitiu gerar uma corrente contínua, o que foi de importância fundamental para o estudo futuro do eletromagnetismo.

A primeira distinção entre condutor e isolante havia sido feita por Stephen Gray, em 1729, conforme já foi descrito. Um avanço importante na determinação da condutividade foi dada por Henry Cavendish, em **1772**. Ele usou seu próprio corpo como um detector do choques produzido pela descarga de uma garrafa de Leydan. Por exemplo, ele descarregou a garrafa através de tubos preenchidos com água potável ou com água do mar e ajustou o comprimento dos tubos até que a sensação de choque fosse a mesma nos dois casos, concluindo que a água do mar é **720 vezes mais condutora** que a água potável. Ele tentou também segurar com as mãos fios metálicos por onde passava uma descarga elétrica para comparar o quanto cada metal conduzia. Em **1827** Georg Simon Ohm conseguiu demonstrar que a diferença de potencial através de um dispositivo é diretamente proporcional à corrente através dele. É o que conhecemos hoje como a **lei de Ohm**. Dispositivos que seguem a lei de Ohm são conhecidos de ôhmicos e aqueles que não seguem, de não-ôhmicos.

As ciências da eletricidade e magnetismo desenvolveram-se isoladamente, até que em **1820** Hans Christian Oersted encontrou uma **conexão entre os dois fenômenos**. Enquanto preparava uma aula, Oersted observou que uma corrente elétrica passando por um condutor era capaz de causar a deflexão na agulha da bússola. Surgia assim a ciência do eletromagnetismo. Mais tarde Oersted descobriu também que um ímã é capaz de gerar uma **força sobre um fio conduzindo corrente**. Michael Faraday realizou uma série de estudos experimentais e sobre estes dados trabalhou James Clerk Maxwell, que deu a forma matemática do eletromagnetismo, as leis de Maxwell. A grande descoberta de Maxwell em eletromagnetismo é a previsão de que a luz é uma onda eletromagnética e que sua velocidade pode ser determinada por medidas puramente elétricas e magnéticas. Em **1888**, no artigo intitulado "On Electromagnetic Waves in Air and Their Reflection", **H. Herz** prova experimentalmente as previsões de Maxwell.

Em **1879** Edwin H. Hall, sob orientação do professor Henry Roland, da Universidade Johns Hopkins, efetuou a medida do que conhecemos hoje como efeito Hall, usando um condutor de cobre, e descobriu que a **corrente elétrica num metal é devido ao fluxo de um fluido que possui carga negativa**. Provou ainda que, ao contrário do que Oersted sugerira, um **campo magnético exerce a força sobre o fluido** no condutor e não sobre o conduto.

**Por volta de 1860** foi descoberto que uma grande diferença de potencial através de um ambiente contendo gás rarefeito (0,01 atm) causava fluorescência do gás. O aparato para estes estudos era contido em tubos de vidro. Quando a pressão era ainda mais baixa ( $10^{-3}$  mm de Hg) o tubo como um todo ficava escuro mas observavam-se feixes luminoso de cor azulada emanando do eletrodo negativo (catodo). Onde os "**raios catódicos**" invisíveis atingiam a superfície do tubo de vidro observava-se a fluorescência do vidro, que brilhava numa cor esverdeada ou azulada. Descobriu-se que o "raio catódico" caminhava em linha reta, pois plaquetas de mica posicionadas no caminho do feixe, produzia uma sombra na parede de vidro. Nos idos de 1880 conhecia-se uma série de fatos: (1) o raio era defletido por um campo magnético como se fossem cargas negativa; (2) o raio era emitido perpendicularmente à placa do catodo, ao contrário da luz que era emitido para todas as direções; (3) o raio carregava momento (uma vez que era capaz de girar pequenas hélices) e energia (uma vez que era capaz de aquecer um corpo). No início não se sabia se o "raio catódico" era uma onda eletromagnética ou um fluxo de partículas carregadas. Heinrich Hertz tentou defletir o raio por meio de campos elétricos, aplicando uma tensão, inicialmente de 22 V, entre duas placas planas paralelas, sem resultados. Ao atingir 500 V houve geração de uma descarga entre as placas e os estudos foram interrompidos. P. Lenard, assistente de Hertz, descobriu que o raio era capaz de atravessar finas folhas de metal (2  $\mu$ m) e percorrer distâncias de até 1 cm no ar. Como as folhas metálicas não permitiam a passagem do gás de hidrogênio, o menor dos átomos, ficava provado que o "raio catódico" não era um feixe de átomos. Se os raios fossem feixes de partículas carregadas deveria haver geração de campo magnético, mas Hertz não foi capaz de medir tal campo. Desse modo, a maioria dos cientistas alemães acreditavam que o "raio catódico" deveria ser algum tipo de campo.

Em **1895**, J. Perrin, na França, foi capaz de coletar os raios num cilindro e mostrar que eles carregavam cargas negativa. Com um campo magnético defletindo o raio, foi capaz de evitar a coleta de carga, mostrando que o "raio catódico" era constituído de partículas.

O aparato para estudar o "raio catódico" era o tubo de raio catódico (CRT -- Cathode Ray Tube). Em **1897** J. J. Thomson, em Cambridge, realizou uma série de experimentos utilizando o CRT para estudar o elétron, que à época ele chamava de "**corpúsculo**". O CRT consistia de um catodo, onde o raio era gerado, e um anodo que possuía um pequeno orifício, para onde o raio era acelerado por meio de uma diferença de potencial aplicada entre os dois eletrodos. O conjunto era montado dentro de uma câmara de vidro mantida a baixa pressão. Na linha da trajetória do raio, o aparato permitia aplicar um campo magnético conhecido e existia ainda um par de placas paralelas, onde se aplicavam tensões que geravam um campo elétrico defletor. Thomson conseguiu provar, de início, que o raio podia ser defletido pelo campo elétrico. Isto foi possível porque Thomson trabalhava com níveis de vácuo melhores que os usados por Hertz. Baseado nisso, Thomson realizou a seguinte seqüência de medidas: i) observar o ponto em que o feixe de cargas atinge a tela do CRT quando nem o campo elétrico nem o campo magnético são aplicados; ii) observar o ponto em que o feixe de cargas atinge a tela do CRT quando o campo magnético é aplicado; iii) determinar a intensidade do campo elétrico necessário para compensar o campo magnético, fazendo com que a posição observada em (ii) volte para a posição de (i). Para marcar as posições, a tela de vidro do CRT era coberto por um material fosforescente, como por exemplo, o ZnS. Thomson sabia, pelo conhecimento do seletor de velocidade, que a velocidade da partícula era  $v = E/B$ . A velocidade de suas partículas era de  $3 \times 10^7$  m/s. Com isso Thomson foi capaz de determinar a relação q/m como sendo de  $10^{11}$  C/kg. Thomson utilizou vários gases no interior do tubo, mas obtinha sempre o mesmo valor de q/m para o "corpúsculo", concluindo que observava sempre a mesma partícula. Supondo ainda que este "corpúsculo" tivesse a mesma carga do íon  $H^+$ , concluiu que o "corpúsculo" deveria ter uma massa pelo menos 1000 vezes menor que o menor dos átomos, isto numa época em que muitos cientistas ainda relutavam em aceitar a idéia do átomo. Assim, o **elétron** foi a primeira partícula subatômica descoberta pelo homem e marca o início da eletrônica tal qual a conhecemos hoje.

Durante os séculos XVII e XVIII acreditava-se que tanto a matéria quanto a carga elétrica fossem contínuas. Em 14 de dezembro de **1900**, Max Planck apresentou o seu artigo "Sobre a teoria da lei da distribuição de energia do espectro normal" sobre a **radiação térmica** em que sugere pela primeira vez que esta radiação não seria um fluxo contínuo de energia, mas sim um **fluxo de pacotes de energia**. Este trabalho é considerado hoje a origem da física quântica clássica.

Em **1909** R. Andrew Millikan demonstrou que a **carga elétrica é também quantizada** e o valor de uma carga é aproximadamente de:

$$e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Em **1900** Drude sugeriu que num **metal a condução** de corrente é feita por uma **nuvem de elétrons** e desenvolveu toda uma teoria de condução térmica e elétrica, aplicando a teoria cinética dos gases. A teoria cinética dos gases supõe que as moléculas de gases são esferas sólidas idênticas que se movem em linha reta até colidir com uma outra molécula do gás. Drude supôs adicionalmente que as cargas positivas pertenciam a partículas muito mais pesadas que o elétron, que eram consideradas imóveis.

No modelo de Drude supunha-se que os elétrons possuíam uma distribuição de velocidade eletrônica dada pela distribuição de Maxwell Boltzmann. Pouco tempo depois de Pauli apresentar o seu princípio da exclusão, isto é, que dois elétrons não podem assumir exatamente a mesma energia, Sommerfeld aplicou a mesma idéia ao modelo de Drude. Isto implicava em **aplicar a distribuição de Fermi-Dirac**, o que ajudou a corrigir uma série de falhas do modelo de Drude. O modelo de Sommerfeld ainda deixava de explicar muitas observações experimentais. As razões para as falhas eram algumas hipóteses que eram assumidas no modelo. Hoje sabe-se que as principais fontes dos erros de predição eram as seguintes hipóteses: i) aproximação de elétron livre; ii) aproximação de elétrons independentes; iii) aproximação de tempo de relaxação nula.

Neste meio tempo, o modelo do átomo foi também sendo desenvolvido:

1. Em **1904** Thomson apresentou o modelo de um átomo como sendo uma espécie de "**pudim de passas**", uma distribuição contínua de carga positiva contendo elétrons de carga negativa.
2. Em **1911** Ernest Rutherford apresenta o modelo de um átomo contendo um **núcleo de carga positiva circundada por elétrons**.
3. Em **1913** Niels Bohr propõe que as "**órbitas**" dos elétrons são **quantizadas** e que os raios atômicos são múltiplos de  $2\pi h$ , onde  $h$  é a constante de Planck. Com isso explica os espectros atômicos.
4. Em **1925** Erwin Schrödinger desenvolve a **equação de Schrödinger** e o conceito da função de onda.
5. Resolve a equação de Schrödinger no caso de um **elétron confinado num potencial eletrostático** de um próton e consegue determinar os mesmos níveis de energia previstos pelo modelo de Bohr para o **átomo de hidrogênio**.

Simultaneamente adquiria-se também uma série de conhecimentos a respeito da radiação eletromagnética, como a sua dualidade onda partícula (fóton), da quantização dos fótons, bem como das diferentes formas como a radiação eletromagnética e a matéria interagem. Um destes conhecimentos era o espectro atômico que era explicado pelo modelo atômico de Bohr.

Por outro lado, em **1913** W. H. Bragg e W. L. Bragg se valiam do raio X para estudar a cristalografia dos sólidos, isto é, o arranjo dos átomos num sólido. Foi descoberto que alguns sólidos, como por exemplo os cristais iônicos, formavam **redes periódicas** tridimensionais. Como os íons de uma rede cristalina perfeita são arrançados como uma rede periódica regular, passou-se a considerar um **potencial periódico** e o comportamento de um elétron em tal potencial. Este estudo (**Teorema de Bloch**) leva à conclusão de que num potencial periódico os elétrons podem apresentar energias apenas dentro de certas faixas de energia, ou seja, prevê que existem bandas de energia permitidas (como as bandas de valência e de condução), com **bandas de energia proibida** entre elas. O estudo da condutividade de um elétron num potencial periódico foi também feito supondo que o elétron não é uma partícula, mas sim, um pacote de onda com o nível de elétron livre. Esta aproximação é chamada de **modelo semi-clássico**, cujo resultado mais expressivo é a previsão da existência das **lacunas**.

## História do Semicondutor

Os primeiros estudos sistemáticos das **propriedades retificadoras de um sistema metal-semicondutor** é atribuído a F. Braun, que em **1874** percebeu a dependência entre a resistência e a polaridade da tensão aplicada, bem como da condição da superfície. A medida DC da resistência em certos cristais diferia em até 30% dependendo do sentido da polarização do cristal

Outro caminho levou também à descoberta do semicondutor, o que começa em 1888, quando H. Hertz verifica a existência de ondas sem fio ("wireless waves"). Jagadish Chandra Bose, cientista indiano, efetuou experiências com onda curta de 60 GHz (milimétrica), com o objetivo de medir as propriedades ópticas destas ondas. Bose inventou o primeiro **detetor com diodo com contato em ponto estado-sólido** (provavelmente inventado entre 1899 e 1900, e patenteado em **1904** nos EUA). Estudos subsequentes levaram à estrutura "ferro-mercúrio-ferro", que tornou-se famoso quando foi usado por Marconi para receber a primeira transmissão transatlântica, em 1901.

O retificador de contato de ponto teve aplicação prática em várias formas, começando em 1904. Em **1931**, A. H. Wilson formulou a **teoria de transporte em semicondutores baseado na teoria de bandas dos sólidos**. Esta teoria foi então aplicada para os contatos metal-semicondutor. Em **1938**, Schottky sugeriu que uma barreira de potencial poderia ser criada devido a cargas espaciais estáveis no semicondutor, sem a necessidade de existir uma camada química. O modelo que se originou desta idéia é conhecido como a **Barreira Schottky**. Em 1938 Mott apresentou também um modelo teórico para contatos metal-semicondutor depletado (swept-out), que é conhecido como a barreira Mott.

A **estrutura MIS** (Metal Insulator Semiconductor) foi inicialmente proposto como um capacitor variável por tensão, em **1959**, por J. L. Moll e por W. G. Pfann e C. G. B. Garret. Suas características foram estudadas por D. R. Frankl (1961) e por R. Lindner (1962). O diodo MIS foi empregado inicialmente para estudar a superfície do óxido de silício crescido termicamente, onde destacamos estudos de L. M. Terman e outro de K. Lehovc e A. Slobodskoy.

O princípio de acoplamento de cargas foi apresentado pela primeira vez em 1970 por W. S. Boyle e G. E. Smith. Ainda em **1970**, G. F. Amelio, M. F. Tompsett e G. E. Smith demonstraram o primeiro dispositivo de acoplamento de carga (**CCD**).

O princípio do **FET** (Field Effect Transistor -- Transistor de Efeito de Campo) havia sido proposto por J. E. Lilienfeld (**1930**) e O. Heil (1935). Posteriormente a estrutura foi estudada por W. Shockley e G. L. Pearson (1948). Em **1960** D. Kahng e M. M. Atalla propuseram e fabricaram o primeiro **MOSFET usando óxido de silício** crescido termicamente.

A **teoria** básica relação entre tensão e corrente de uma **junção pn** foi desenvolvida por W. Shockley (**1949**). A teoria foi estendida posteriormente por C. T. Sah, R. N. Noyce e W. Shockley (1957) e por J. L. Moll (1958).

Alguns dos marcos no desenvolvimento da tecnologia são:

1. **junção de liga** (R. N. Hall e W. C. Dunlap (**1950**))
2. técnica de **junção crescida** (G. K. Teal, M. Sparks e E. Buehler (**1951**))
3. **purificação por zona** (W. H. Pfann (**1952**))
4. **difusão** (M. Tanenbaum e D. E. Thomas (**1956**))
5. **crescimento epitaxial** (H. C. Theuerer, J. J. Kleimack, H. H. Loar e H. Christenson (**1960**))
6. **tecnologia planar** (J. A. Hoerni (**1960**))
7. **beam-lead** (M. P. Lepselter (**1966**))
8. **implantação iônica** (W. Shockley (**1954**))
9. **litografia e corrosão a seco** (E. F. Labuda e J. T. Clemens (??))

O **transistor (transfer resistor)** foi inventado por um time de pesquisadores da Bell Labs em **1947**. Antes de 1947 os semicondutores eram usados apenas como termistores, fotodiodos e retificadores. Em **1948**, John Bardeen e Walter Brattain anunciaram o desenvolvimento do **transistor de contato de ponto**. Em **1949** William Shockley publicava o

clássico artigo sobre **diodos e transistores de junção**.

**Referências:**

1. Harris Benso, "University physics", John Wiley, 1991, New York;
2. David Halliday e Robert Resnick, "Fundamentals of Physics", Third Edition, John Wiley, 1988, New York;
3. Allen Mottershead, "Introduction to electricity and electronics, 2nd. Edition, John Wiley, 1986, New York;
4. S. M. Sze, "Physics of semiconductor devices"; 2nd Edition, John Wiley, 1981, New York;
5. Robert Eisberg e Robert Resnick, "Física quântica", Editora Campus, 1979, Rio de Janeiro;
6. Neil W. Ashcroft e N. David Mermin, "Solid state physics", Sounders College, 1976, Fort Worth.