

WALTER BRATTAIN

1902-1987

JOHN BARDEEN

1908-1991

WILLIAM SCHOKLEY

1910-1989

Moisés Piedade | Carlos Fernandes



Walter Brattain, John Bardeen e William Shockley são os três cientistas responsáveis pela descoberta do transistor em 1947 realizada nos *Bell Telephone Laboratories Inc., Bell Labs.*, em *Murray Hill*, Nova Jersey, NJ, EUA¹. Depois da invenção da válvula eletrônica, nomeadamente do tríodo, por Lee de Forest em 1906, as válvulas foram a única alternativa para realizar sistemas eletrônicos e dominaram as aplicações durante a primeira metade do século XX.

Com o transistor, um dispositivo de estado sólido, realizado com semicondutores², passou a ser possível realizar sistemas eletrônicos muito mais pequenos e com menor consumo de energia do que os que eram realizados com as válvulas eletrônicas. Os transistores estiveram na origem da maior revolução da indústria eletrônica que foi iniciada na segunda metade do século XX e que perdura até aos nossos dias.

1. Dos vários laboratórios dos *Bell Labs* nos EUA, na descoberta do transistor estiveram envolvidos o laboratório principal, situado em *Murray Hill*, NJ, e o laboratório de rádio, situado em *Holmdel*, NJ (a 55 km de distância).

2. O termo semicondutor, no sentido de condutor fraco, foi introduzido em 1772 por Alexandre Volta (1745-1827), numa palestra realizada na *Royal Society* em Londres.

O transistor baseia-se na condução elétrica em meios sólidos semicondutores, contrariamente às válvulas, que são dispositivos cuja condução elétrica é feita por eletrões em dispositivos encapsulados em vácuo. Do ponto de vista científico os mecanismos físicos de condução no vácuo conheceram-se primeiro do que os mecanismos de condução nos sólidos, incluindo os metais e os semicondutores. Curiosamente, quando a válvula apareceu já havia vários dispositivos realizados experimentalmente com semicondutores, nomeadamente os fotocondutores, a célula fotovoltaica e os detetores (retificadores) de cristal de galena e de silício³.

As válvulas eletrónicas potenciaram a realização de novos sistemas eletrónicos como os amplificadores, os osciladores, os moduladores, etc. e proporcionaram o desenvolvimento da tecnologia da rádio e da radiodifusão, a primeira grande aplicação industrial.

Até 1923, a maior parte dos rádios usava válvulas, mas o detetor de sinal era feito maioritariamente com detetores de cristais⁴ de galena e de silício. A partir de 1923, nos rádios novos, as válvulas foram substituindo lentamente os detetores de cristal, devido ao facto de o seu preço ter ficado mais reduzido e ao facto do detetor de cristal ser pouco prático, pois precisava de ser ajustado pelo utilizador para encontrar no cristal um bom ponto de deteção. Até mesmo Lee de Forest, o inventor da válvula eletrónica, na primeira geração do seu rádio D10⁵ usou um cristal de galena, mas na 2.^a geração (que saiu em 1924) já usou o tríodo a funcionar como detetor.

Todavia, em 1940, foi a incapacidade das válvulas eletrónicas fazerem a deteção eficiente de sinais de radar que obrigou os investigadores a recorrerem aos antigos detetores de cristal semicondutor. Daqui resultou o estudo de novas propriedades dos semicondutores que levaram à descoberta do transistor. Assim, a descoberta do transistor não teve por motivação principal a substituição da válvula eletrónica, mas esta acabou por acontecer.

3. Ver “História dos semicondutores”. https://museufaraday.ist.utl.pt/HistTecnology/Hist%c3%b3ria-dos-semicondutoresv1_2.pdf

4. Detetor de galena de J. Bose e detetor de silício de J. Pickard.

5. Ver este rádio no Museu Faraday do IST. https://museufaraday.ist.utl.pt/HistTecnology/Forest_Radio_D10.pdf

O radar e o regresso aos detetores de cristal

Depois dos trabalhos de Marconi, realizados no seu navio-laboratório *Electra*, terem demonstrado que conseguia fazer feixes de rádio muito estreitos com frequências muito elevadas e de ter mostrado à Marinha Inglesa que conseguia desenhar o mapa da costa marítima a partir do eco do sinal recebido, a Marinha encomendou-lhe o sistema de antenas apropriado para o radar e mandou construir 20 radares a válvulas. Nestes radares a função de deteção dos sinais era realizada por válvulas e tinha um desempenho pouco satisfatório.

Quando a 2.^a guerra mundial começou, o radar foi considerado uma arma estratégica de enorme importância; organizaram-se grupos de trabalho secretos na Grã-Bretanha e nos EUA para acelerar o desenvolvimento dos radares a válvulas. Em 1940, George Southworth, especialista em micro ondas e em guias de onda na divisão de rádio dos *Bell Labs de Holmdel*, também não conseguiu que os detetores a válvulas funcionassem nas frequências usadas pelo radar. Decidiu experimentar os detetores de “bigodes de gato” (*cat’s whisker*) de silício⁶, de que ele já tinha muita experiência, adquirida na primeira guerra mundial quando servia na *Army Signal Corps*. Southworth teve sucesso imediato com este tipo de detetor de cristal de silício.

Entusiasmado com a solução encontrada, George Southworth pediu ao seu colega Russel Ohl, especialista em semicondutores, para verificar o resultado alcançado e estudar cristais de materiais alternativos. Todavia, o sucesso da deteção obtida pelo cristal de silício tinha alguns problemas. A ponta metálica tinha de encontrar um ponto bom no cristal, mas com um pequeno desvio podia já não se fazer a deteção ou fazer-se a deteção mas a corrente detetada poderia até ter o sentido contrário⁷. Ohl distinguiu estas duas situações de deteção e chamou-lhes P, positiva, quando a corrente ia da ponta metálica para o cristal e N, negativa, quando a corrente era ao contrário, vinha do cristal para a ponta⁸.

Russel Ohl achou que este comportamento era provavelmente devido a impurezas existentes no cristal. Este detetor não poderia ser usado no radar,

6. Os *cat’s whiskers* já não se produziam mas G. Southworth encontrou uma unidade num anti-quário.

7. Nos rádios a inversão da corrente não coloca qualquer problema, mas no radar coloca.

8. Mais tarde verificou-se que a ponta metálica injetava portadores minoritários (eletrões) numa região P (com falta de eletrões) do semicondutor, mas logo ao lado podia haver uma região N.

não só porque a fase dos sinais é importante, como também porque os operadores do radar, em guerra, não podem andar à procura de um ponto bom no cristal.

Russel pensou em purificar o silício, com a ajuda de metalurgistas dos *Bell Labs*. Fundiram silício num tubo de ensaio de quartzo e com o arrefecimento lento (*annealing*) as impurezas deveriam flutuar ou ficar no fundo do tubo. Mas isto não aconteceu. O varão de silício obtido ficou com duas metades eletricamente diferentes. Ohl verificou que numa ponta do varão o contacto elétrico era do tipo P mas na outra era do tipo N. Ohl tentou medir a resistência do varão mas não conseguiu obter valores estáveis. Acabou por verificar que a luz influenciava muito o valor da resistência.

Ohl que trabalhava nos *Bell Labs* de Holmdel quis mostrar aos especialistas de semicondutores dos *Bell Labs* de Murray Hill o que tinha conseguido fazer. Na presença de Walter Brattain disparou a luz de uma lâmpada de flash sobre o varão de silício, ligado a um amperímetro; Brattain nem queria acreditar pois nunca tinha visto tanta energia elétrica gerada a partir da luz (cerca de 10 vezes mais do que ele conhecia).

Numa única experiência Ohl tinha conseguido fazer coisas diferentes: silício do tipo P, silício do tipo N e, na interface dos dois, fez a primeira junção PN⁹, que mostrou ser uma excelente célula fotovoltaica.

Partindo as regiões P e N em pequenos pedaços Ohl conseguiu fazer detetores de cristal para o radar, que eram muito estáveis e sem a grande dependência da posição do contacto metálico sobre o semiconductor. Depois os *Bell Labs* fizeram materiais do tipo P e N a partir de germânio, que se encontrava comercialmente disponível, já mais purificado e que fundia a temperaturas mais baixas. Os primeiros detetores de contacto metálico foram feitos em germânio, encapsulados em estruturas coaxiais de modo a poderem ser inseridos em guias de onda. Estes detetores foram comercializados por várias empresas, tendo sido muito usados na 2.^a guerra mundial. Graças a eles os radares cumpriram eficazmente a sua missão.

A experiência de Ohl abriu caminho para o primeiro transístor, que Brattain e Bardeen percorreram.

9. A experiência pode ser uma grande fonte inspiradora para novas teorias.



Figura 1: Detetor 1n21 de contacto metálico com germânio.

Na primavera de 1945, Mervin Kelly, diretor de investigação dos *Bell Labs*, viu as potencialidades dos dispositivos de estado sólido e começou os preparativos para criar um novo grupo de física do estado sólido nos *Bell Labs*¹⁰, atraindo o seu brilhante investigador William Shockley para o chefiar¹¹.

O grupo de investigação em semicondutores

William Shockley e Stanley Morgan constituíram o grupo de cientistas que iria descobrir novas aplicações dos semicondutores. Este grupo tinha tudo para dar certo, pois era constituído pelo experimentalista de materiais semicondutores Walter Brattain, o físico teórico do estado sólido William Shockley e o físico quântico John Bardeen, amigo do irmão de Brattain. Três personalidades muito diferentes que fizeram uma das maiores descobertas do século XX – o transistor. Estes três cientistas acabaram por receber o prémio Nobel em 1956 “*for research on semiconductors and the discovery of the transistor effect*”.

O primeiro trabalho que Shockley deu a Brattain e a Bardeen foi que investigassem porque é que a sua proposta teórica de transistor de efeito de campo na prática não funcionava¹². Brattain e Bardeen acabaram por seguir um caminho diferente e chegaram ao transistor de contactos metálicos com germânio.

10. História dos *Bell Labs*: <https://quello.msu.edu/wp-content/uploads/2015/08/Memories-Noll.pdf>.

11. Nesta altura Shockley trabalhava como consultor militar no departamento de defesa dos EUA.

12. A proposta de um dispositivo semelhante ao que seria o transistor de efeito de campo foi feita em 1925 por Julius Edgar Lilienfeld, mas ninguém ainda tinha conseguido realizar um dispositivo que funcionasse.

Walter Brattain



Walter Houser Brattain nasceu em 1902 em Amoy (agora Xiamen), na China, filho de pais estado-unienses, Ross Brattain e Otilie Brattain, que se tinham formado no *Whitman College*¹³. O pai foi professor no Instituto Ting-Wen, uma escola particular para jovens chineses; a mãe foi uma matemática muito talentosa. A família Brattain regressou aos EUA em 1903, um ano depois do nascimento de Walter.

Walter Brattain fez os estudos em várias escolas privadas e, em 1924, completou o bacharelato com especial ênfase na formação em matemática e física no *Whitman College*, onde já se tinham formado os seus pais.

Em 1927 e 1928, Brattain colaborou com o *National Bureau of Standards*¹⁴ onde ajudou a desenvolver padrões para caraterizar o efeito piezoelétrico, ainda na fase dos seus trabalhos de doutoramento.

Terminou o doutoramento (PhD) na universidade de Minnesota em 1929 com a tese *Efficiency of Excitation by Electron Impact and Anomalous Scattering in Mercury Vapor*, orientada pelo físico John Torrence Tate¹⁵.

Em 1930, Brattain entrou no grupo de investigação de semicondutores iniciado por William Shockley, nos *Bell Labs*, onde permaneceu até 1967.

Brattain casou em 1935 com a engenheira química Keren Guilmore, de quem teve um filho. Keren morreu em 1957 e Brattain casou nesse ano com Emma Jane Miller, de quem teve mais três filhos.

Em 1970, Brattain mudou-se para Seattle, EUA, e manteve uma colaboração com o *Wittman College*. Brattain começou a sofrer da doença de Alzheimer, tendo falecido em 1987.

13. *Whitman College* em Walla Walla, EUA, é uma instituição de ensino privado muito rigorosa e que é reconhecida por estimular a criatividade dos seus alunos.

14. *National Bureau of Standards*, NBS, fundado em 1901, que em 1988 passou a designar-se por *National Institute of Standards and Technology*, NIST.

15. John Torrence Tate foi um físico e professor da Universidade de Minnesota que foi também o editor da revista *Physical Review* de 1926 a 1950.

Carreira Científica de Brattain

Em 1929, Brattain foi admitido nos *Bell Telephone Laboratories* juntamente com o físico alemão Joseph A. Becker¹⁶ para investigarem a injeção, através de calor, de portadores de carga nos retificadores feitos com o semicondutor óxido de cobre. Através de experiências com a emissão termiônica validam experimentalmente a teoria apresentada pelo alemão Arnold Sommerfeld¹⁷ sobre a estrutura quântica da matéria. Fizeram trabalhos sobre estados de superfície e sobre o trabalho de saída de eletrões do tungsténio, Brattain descobre o efeito fotoelétrico na superfície livre de um semicondutor, o que foi considerado uma das suas maiores contribuições na física do estado sólido.

Na 2.^a guerra mundial, Brattain e Shockley trabalharam com o *National Department Defense*, EUA, e com a *Columbia University* para desenvolverem um sistema de deteção magnética de submarinos a partir da alteração do campo magnético terrestre. Deste trabalho resultou uma patente de Brattain, para um novo detetor magnético.

Nos *Bell Labs*, Shockley deu a Brattain e a Bardeen a tarefa de estudarem o transístor de efeito de campo e o seu funcionamento¹⁸. Bardeen acreditava que era o efeito de criação de eletrões superficiais que impedia o efeito de campo de penetrar no semicondutor, mas continuou os trabalhos que já vinha fazendo com Bardeen numa direção diferente – a realização de um transístor de contacto metálico.

Brattain tinha a experiência dos díodos de contacto metálico, que tanto sucesso tiveram na deteção de sinais de radar na 2.^a guerra mundial, em que uma ponta metálica injetava portadores minoritários no semicondutor. Acreditava que colocando um segundo contacto muito próximo do primeiro poderia modular a corrente entre estes dois contactos. Nos históricos apontamentos de Brattain podem ver-se cinco experiências que foram realizadas até conseguirem obter um dispositivo amplificador de sinal – o transístor de contacto metálico. Depois de várias tentativas, Brattain, no dia 16 de dezembro de 1947, sugeriu que uma finíssima lâmina de ouro, colada nos bordos de um fino prisma triangular de poliestireno, poderia ser cortada com uma lâmina, exatamente no vértice,

16. <https://physicstoday.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.3057182>

17. Arnold **Sommerfeld** foi um físico alemão com trabalhos na estrutura quântica da matéria.

18. A proposta do transístor de efeito de campo foi feita em 1925 por Julius Edgar Lilienfeld, mas ninguém ainda tinha conseguido realizar um dispositivo que funcionasse.

originando dois contactos desligados mas colocados suficientemente próximos (<50 m). Nas experiências anteriores já tinham conseguido fazer pequenos pontos de ouro sobre o germânio por galvanoplastia, usando uma pequena gota de eletrólito e aplicando -90 V ao condutor de ouro, seguido de lavagem com água destilada. E deste modo conseguiram colocar dois elétrodos de ouro, injetores de portadores minoritários, muito próximos sobre a superfície de germânio.

No dia 23 de dezembro de 1947 foi feita uma demonstração de um amplificador de áudio para sete personalidades da equipa, tendo ficado demonstrado o funcionamento do amplificador com um ganho de potência de 18 dB. No dia 24 de dezembro, H.R. Moore introduziu algumas modificações no circuito de amplificação de áudio e já com saída para auscultadores que serviu para demonstrações futuras.



Figura 2: O esquema eléctrico do novo amplificador de áudio realizado com o 1.º transístor.

William Shockley não ficou muito satisfeito por Brattain e Bardeen terem feito este transístor e não terem feito o trabalho de descobrir porque é que o seu transístor de efeito de campo não trabalhava. A descoberta foi publicada numa revista científica pela primeira vez em 1948 na *Physical Revue* (Bardeen and Brattain 1948).

Os *Bell Labs* mantiveram em segredo esta descoberta e só depois de o transístor estar patenteado apresentaram ao público o novo dispositivo em 30 de junho de 1948, fazendo questão de incluir Shockley na descoberta.



Figura 3: Transístor original, réplica de demonstração e símbolo do transístor.

Todavia, Shockley não gostou realmente de não fazer parte desta descoberta e, mais tarde, excluiu Bardeen e Brattain de novas investigações. O grupo acabou por se desfazer: Bardeen saiu em 1953, por achar que a situação de investigação no grupo de Shockley era insustentável, Brattain foi para outro grupo dos *Bell Labs* e o próprio Shockley saiu em 1953 para formar o *Shockley Semiconductor Laboratory* dentro da empresa *Beckman Instruments Inc.*

Segundo vários autores, a ligação frutífera dos dois amigos, Brattain (o experimentalista) e Bardeen (o teórico), é vista figurativamente como a ligação das mãos de Brattain com o cérebro de Bardeen.

John Bardeen

John Bardeen nasceu em 1908 em Madison, Wisconsin (EUA), filho do médico Charles Bardeen e de Althea Bardeen. Althea morreu em 1921, vítima de cancro, quando John tinha apenas 13 anos, o que teve influência na progressão dos seus estudos.

Terminou os estudos secundários em 1923 e, nesse ano, matriculou-se na *University of Wisconsin*, tendo obtido o bacharelato em Engenharia Eletrotécnica em 1928 e o mestrado em 1929. Nesta universidade, Bardeen frequentou opcionalmente todos os cursos de Matemática e de Física Avançada.



De 1930 a 1933, Bardeen empregou-se como geofísico na *Gulf Research Labs*, onde fez trabalhos de pesquisa na interpretação de efeitos de magnetismo e de gravitação.

Voltou à universidade para fazer um doutoramento em Princeton e onde estudou matemática e física avançada. Acabou o PhD em 1936 com uma tese em Física do Estado Sólido. Paralelamente com os estudos de doutoramento, entre 1935 e 1938, fez trabalho na *Society of Fellows* na Universidade de Harvard.

Casou em 1938 com Jane Maxwell. Deste casamento resultaram dois filhos, James e William.

De 1941 a 1944, durante a 2.^a guerra mundial trabalhou no *Naval Ordnance Laboratory*, onde dirigiu um grupo de investigação sobre minas magnéticas e torpedos.

Em 1945, empregou-se nos *Bell Labs*, onde esteve até 1951 e de onde saiu, depois das desavenças¹⁹ com William Shockley, assumindo uma posição na *University of Illinois Urbana-Champaign*, onde fez trabalhos de investigação sobre supercondutividade.

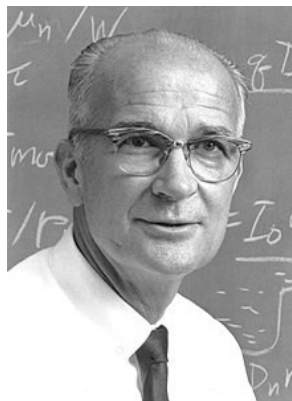
Em 1957, juntamente com o estudante de pós-doutorado Leon Cooper e o estudante de pós-graduação Bob Schrieffer, Bardeen desenvolveu a primeira teoria que explicava como metais extremamente frios podem conduzir eletricidade praticamente sem perdas. Essa teoria é conhecida como a teoria BCS (Bardeen, Cooper e Schrieffer), que lhes valeu, em 1972, o prémio Nobel, o segundo para Bardeen²⁰.

Nos anos 80, Bardeen fez muitos trabalhos de investigação que foi publicando nas principais revistas de Física, nomeadamente na *Physical Review Letters* e na *Physics Today*.

Bardeen era extremamente inteligente, muito simples e amigo dos colegas; com as suas descobertas científicas, foi considerado uma das 100 pessoas mais influentes do século.

Bardeen viveu em Urbana, onde faleceu em 1991 com 82 anos, vítima de um problema cardíaco.

William Shockley



William Bradford Shockley nasceu em Londres, GB, em fevereiro de 1910. O pai, William Hillman Shockley, era engenheiro de minas, e a sua mãe, May Bradford, estava ligada à prospeção mineira.

Com a idade de três anos, os seus pais regressaram aos EUA e foram viver para Palo Alto, Califórnia. Os pais de Shockley achavam que o ensino público era fraco e cuidaram pessoalmente da sua educação em casa até William atingir a idade de 8 anos. A mãe ensinava matemática e os pais estimularam-lhe uma

19. Bardeen depois da invenção do transistor e dos conflitos com Shockley disse: “*My difficulties stem from the invention of the transistor. Before that there was an excellent research atmosphere here.*”

20. Apenas quatro cientistas foram galardoados com dois prémios Nobel: Frederick Sanger, Linus Pauling, John Bardeen e Marie Curie, mas apenas dois, Bardeen e Sanger, mereceram dois prémios por trabalhos na sua área de investigação.

formação científica. O vizinho deles, Perley Ross, professor de Física em Stanford também estimulou Shockley para os interesses científicos. Shockley interessou-se pela Física e estudou na Academia Militar de Palo Alto, na *Los Angeles Coaching School* e terminou os estudos secundários na *Hollywood High School*, em 1927. No mesmo ano entrou na *University of California*, Los Angeles, UCLA, onde estudou um ano, prosseguindo no *California Institute of Technology*, Caltech, onde terminou o bacharelato em Física em 1932.

Em 1933, Shockley casou-se com Jean Alberta Bailey. Deste casamento, resultaram dois filhos, William e Richard, e uma filha, Alisson Lanelli. Este primeiro casamento durou até 1955, data em que Shockley se divorciou e se casou com Emmy Lanning.

Entrou no *Massachusetts Institute of Technology*, MIT, com uma bolsa de estudo e terminou o PhD em 1937 com a tese "*Calculation of Electron Wave Functions in Sodium Chloride Crystals*", trabalho que viria a ser fundamental na sua carreira científica.

Foi contratado pelos *Bell Labs* sob supervisão de Clinton J. Davisson no projecto de um tubo fotomultiplicador de electrões, mas rapidamente envolveu-se no estudo da Física de Estado Sólido. Em 1939, propôs um dispositivo tipo transistor de efeito de campo, embebendo dois fios no semiconductor óxido de cobre, mas este dispositivo nunca funcionou. Esta tentativa visava substituir os relés e válvulas nos sistemas de comutação telefónica dos *Bell Labs*.

Durante a 2.^a guerra mundial, Shockley trabalhou no desenvolvimento de radares dentro dos *Bell Labs*. De 1942 a 1944, Shockley foi diretor de investigação na *Naval Operation Research*, usando métodos científicos para resolver problemas ligados à guerra, nomeadamente, questões relacionadas com o uso de submarinos e estudos sobre bombardeamentos aéreos.

De 1944 a 1945, Shockley funcionou como consultor do gabinete da *Secretary of War*.

Em 1945, Shockley retornou aos *Bell Labs* num novo grupo para estudar semicondutores e aplicações.

Nos *Bell Labs* de Holmdel, Nova Jersey, Russel Ohl²¹, tinha muita experiência sobre os díodos de contacto metálico com germânio e silício, que foram usados

21. Russel Ohl foi um dos descobridores da junção PN e é autor da patente da célula solar https://web.archive.org/web/20120627121017/http://laimbio08.escet.urjc.es/docencia/FOTONICA/origins_p_n_junction_IEEE_spectrum_34_1997.pdf

com enorme sucesso como detetores de radar na 2.^a guerra mundial. Mas outras propriedades interessantes desta ligação com os contactos metálicos não eram bem percebidas e eram feitas de uma forma empírica.

Formou-se um grupo de investigação sob a direção de Shockley e Stanley Morgan, ficando Shockley com a missão de contratar especialistas nesta área. Contratou vários e entre eles estavam John Bardeen, Walter Brattain, Gerald Pearson e Morgan Sparks.

Shockley continuou a ideia de fazer um transistor de efeito de campo, no qual a aplicação de um campo elétrico, segundo os seus cálculos, modularia a corrente num filamento de germânio como a tensão entre a grelha e o cátodo de um tríodo modela a corrente de placa. Mas nunca conseguiu fazer um dispositivo prático que funcionasse.

John Bardeen sugeriu que a causa estaria ligada ao facto de os eletrões ficarem agarrados em estados superficiais e impedirem que o campo elétrico externo atingisse o filamento semiconductor. Este palpite levou Bardeen e Brattain a descobrir que o contacto metálico injetava portadores minoritários no semiconductor. Esta descoberta levaria ao aparecimento do transistor de contacto metálico em dezembro de 1947 sem a participação de Shockley, que chefiava este departamento de investigação. Shockley não gostou desta descoberta e reforçou a sua própria atividade de investigação.

Em 30 de janeiro de 1948, John Shive dos *Bell Labs*, descobriu que os contactos pontuais de tungsténio banhados a ouro sobre uma camada de germânio do tipo P, criado num substrato do tipo N, davam “um transistor fantástico”. Shive aproveitou essa descoberta para construir um transistor de contato com contactos de bronze, um na frente e outro no verso de uma fina cunha de germânio, provando assim que os buracos (lacunas de eletrões) se podiam difundir através do germânio em massa e não apenas ao longo da superfície. Esta descoberta constituiu a ponte de ligação entre o transistor de contato de Bardeen e Brattain e o transistor de junção de Shockley.²²

Em 1948, Shockley prosseguiu a ideia de conceber um transistor de junção monolítico, apoiando-se nos trabalhos de Walter Schottky e de Neville Mott sobre as barreiras de potencial entre metais e semicondutores, mas também nos

22. Shive é mais conhecido pela invenção do foto-transistor em 1948, onde se combina a sensibilidade à luz de um foto-díodo com o ganho de corrente de um transistor.

preocupantes avanços experimentais de Shive²³. Shockley apresentou em 1950 num artigo do *Bell Labs Journal* (Shockley July 1949) sobre o transistor de junção, dispositivo que só seria realizado em 1951.

Este foi um período de grande emoção e realização intelectual de Shockley. A sua reconhecida capacidade de abordar um problema difícil, de o separar nas componentes fundamentais e encontrar uma solução elegante, foi um fator fundamental para alcançar um nível mais básico na compreensão dos semicondutores.

Em 1950, Shockley inventou o díodo de 4 camadas PNP, (*Shockley diode*). Este dispositivo era visto como o díodo ideal com dois estados bem definidos *ON* e *OFF*, que substituiria dois transístores e várias resistências. Apesar de continuar a ter mais desenvolvimento nos *Bell Labs*, acabaria por ser *Gordon Hall* da *General Electric* a introduzir uma porta de controlo no díodo e originar um novo dispositivo – o tiristor.

Em 1953, Shockley, descontente com a gestão dos *Bell Labs*, saiu e foi para o *Caltech* como Professor Visitante, onde se tornou amigo de Arnold Orville Beckman (inventor do medidor de pH), da empresa *Beckman Instruments*.

Shockley era um aventureiro, tanto profissionalmente, como pessoalmente, praticando desportos radicais. Publicava trabalhos um pouco especulativos sem ter provas, mas quase sempre a verdade estava do seu lado. A sua enorme inteligência, capacidades técnicas e capacidade de trabalho contrastavam com a sua fraca habilidade para manter bons relacionamentos humanos. Rapidamente dividiu os seus grupos de investigação e criou mau ambiente nos laboratórios que dirigiu.

Em 1955, Shockley e Beckman fundaram a primeira empresa *start-up* do *Silicon Valley*, a *Shockley Semiconductor Laboratory* em Mountain View, Califórnia. Contrataram jovens brilhantes na área dos semicondutores e Shockley reforçou a investigação no díodo de quatro camadas, pois vaticinava que seria tão importante como o transistor e teria uma enorme aplicação, nomeadamente na comutação telefónica.

23. Shockley começou a ficar preocupado com os resultados obtidos por Shive que indicavam a mesma direcção de investigação.



Figura 4: *Shockley Semiconductor Laboratory* – a gênese do Silicon Valley, EUA.

Shockley começou a ficar hesitante entre produzir transístores ou o novo díodo de quaro camadas. Os investigadores contratados: Julius Blank, Victor Grinich, Jean Hoerni, Eugene Kleiner, Jay Last, Gordon Moore, Robert Noyce e Sheldon Roberts, pediram a Beckman que o tirasse da gestão, o que não aconteceu.

Estes investigadores saíram da empresa de Shockley e constituíram a empresa *Fairchild*²⁴, em 1957, que viria a criar a divisão *Fairchild Semiconductor*, e pela mão de Gordon Moore sairia o primeiro transístor fabricado pela *Fairchild*, em 1958, com a tecnologia *Mesa Planar*²⁵, os transístores de silício NPN 2N696²⁶ e 2N697, que diferem apenas no ganho de corrente. Jean Hoerni ficou com a tarefa de desenvolver o transístor PNP. A tecnologia de fabricação *Mesa*, que obrigava a fazer os transístores um a um, viria a ser ultrapassada pela tecnologia planar desenvolvida por Jean Hoerni ainda em 1958, e que permitia fazer centenas de transístores no mesmo plano.

Mais tarde, estes oito jovens, designados por Shockley como traidores, viriam a formar as empresas *Intel* e *AMD*.

Shockley começou a produzir o díodo de quatro camadas em 1960, mas não teve o sucesso comercial esperado. Entretanto, a empresa começou também a estudar células solares e, em 1961, Shockley foi o autor do célebre limite Shockley-Queisser, que estima o limite máximo de eficiência de uma célula solar.

24. O investidor Sherman **Fairchild** foi fundamental ao acreditar nos objetivos do grupo.

25. Esta tecnologia obriga a um processo químico de corrosão do silício à volta de cada transístor e o aspeto do transístor é o de uma estrutura vertical tipo planalto. Aqui Gordon Moore e Jean Hoerni usaram a tecnologia que já conheciam dos *Bell Labs*.

26. Os primeiros 100 transístores foram comprados pela IBM ao preço de US \$150 cada (cerca de US \$1500 atuais) para serem usados no computador do bombardeiro B-70 dos EUA.

Na opinião de Jay Last²⁷, Shockley era excepcionalmente inteligente, mas a sua insistência no desenvolvimento do díodo de quatro camadas foi um dos seus maiores erros, pois era muito mais complicado de fabricar do que o transístor de junção.

A empresa *Shockley* seria comprada pela *Clevite Transistor* em 1960 e, em 1968, pela *ITT*²⁸, mas acabaria por fechar. Ficou para sempre recordada como a primeira empresa do Silicon Valley. Também a memória de Shockley e de Gordon Moore são lembradas pela criativa escultura existente na Rua San Antonio, 391, em Mountain View, Califórnia, que consta de um circuito elétrico com um díodo de Shockley e o transístor 2N696 (figura 5).



Figura 5: O painel e a escultura no local dos *Shockley Laboratories* que relembra o início de *Silicon Valley*.

Os últimos anos da vida de Shockley

Shockley dividiu sua vida entre ciência criativa e engenharia e a sua cruzada favor da eugenia²⁹ onde investiu os últimos 15 anos da sua vida. Ele achava que

27. *Oral history of Jay Last, an interview by Craig Addison*. <https://archive.computerhistory.org/resources/access/text/2013/05/102658211-05-01-acc.pdf>

28. *ITT – International Telephone & Telegraph*.

29. Shockley era um apoiante convencido de que as sociedades podiam ser melhoradas seguindo os princípios da eugenia. A eugenia foi uma tendência sociológica criada pelo médico e explorador britânico Francis Galton (1822-1911), primo de Charles Darwin (1809-1911), que defendia a ideia da purificação das raças, hierarquizando-as e defendendo a ideia de não permitir a sua mistura pois daí resultaria necessariamente uma degradação da sociedade. Os seguidores

as sociedades deveriam ser governadas pela elite intelectual, em vez de ser por decisões da maioria, como acontece com as sociedades democráticas. Shockley pensava isto, não por razões políticas, mas sim como um raciocínio científico de pura lógica. Quando o reitor de uma universidade da África do Sul convidou Shockley para falar na sua universidade, sabendo das suas convicções, avisou Shockley para falar só sobre o transístor. Shockley, ao seu estilo, ignorou isto e falou sobre os seus pontos de vista dos méritos e deméritos relativos de vários grupos étnicos, o que desgostou muito a plateia e o reitor que o tinha convidado.

Morreu em 1989 aos 79 anos de cancro da próstata, isolado da sua família e amigos. Foi sepultado no *Alta Mesa Memorial Park* em Palo Alto, Califórnia.

O reconhecimento de Shockley

Em quarenta anos fez contribuições fundamentais para a Física do Estado Sólido e registou mais de noventa patentes pelas suas invenções. Fez contribuições notáveis para a literatura científica.

Shockley, com os seus trabalhos, inspirou uma geração de cientistas da área da Física do Estado Sólido. Quem trabalhou com ele salienta a enorme capacidade de decompor um problema complexo nas suas componentes fundamentais e encontrar soluções únicas. Teve alguns prémios e louvores.

- *Medal for Merit* (1946);
- Eleito para a *National Academy of Sciences* (1951);
- *Air Force Association Citation of Honor for Outstanding Public Service* (1951);
- *Morris Liebmann Award* (1953);
- *Oliver Buckley Solid State Physics Prize* (1953);
- *Certificate of Appreciation* do *Department of the Army* (1953);
- Prémio Nobel em Física pela invenção do transístor juntamente com Bardeen and Brattain, (1956).

O impacto do transístor

Na segunda guerra mundial os sistemas eletrónicos foram objeto de uma grande redução de peso e de dimensões à custa das válvulas eletrónicas minia-

mais fervorosos desta tendência chegaram ao limite de defender a eliminação dos indivíduos intelectualmente menos dotados ou com algumas deficiências físicas.

tura desenvolvidas pela empresa *Raytheon* chamados de *Pencil Tubes*³⁰. Mais tarde, em 1959, a empresa *Radio Corporation of America*, RCA, introduziu o *Nuvistor*³¹, que seria uma alternativa ao transístor.

Os primeiros transístores não tinham qualquer hipótese de competir com as válvulas eletrônicas devido à sua má resposta em frequências elevadas, grande fragilidade e reduzida fiabilidade. Mas a ideia dos dispositivos de estado sólido permitiu o desenvolvimento de novas tecnologias de fabricação em que os *Bell Labs* tiveram um papel fundamental, ainda com a contribuição de Shockley, mas também outras empresas como da *General Electric*, da *Philco* e da *Fairchild* constituída pelos “oito traidores” de Shockley.

Tabela 1: Tecnologia de Dispositivos Eletrônicos

Ano	Tecnologia	Fabricante
1947	<i>Pencil Tube</i>	<i>Raytheon</i> e outros
1947	<i>Point contact</i>	<i>Bell Labs</i>
1948	<i>Grown junction</i>	<i>Bell Labs</i>
1951	<i>Alloy junction</i>	<i>General Electric</i>
1953	<i>Surface barrier</i>	<i>Philco</i>
1953	<i>JFET</i>	<i>Bell Labs</i>
1954	<i>Diffused base</i>	<i>Bell Labs</i>
1954	<i>Mesa</i>	<i>Bell Labs</i>
1959	<i>Planar</i>	<i>Fairchild</i>
1959	<i>Nuvistor</i>	<i>RCA</i>
1959	<i>MOSFET</i>	<i>Bell Labs</i>

A expansão do transístor como alternativa à válvula eletrónica

O caminho do transístor de contacto não foi fácil e inicialmente não foi muito divulgado. O Jornal *New York Times* publicou uma pequena notícia no dia 1 de julho de 1948, na página 46, um dia depois dos *Bell Labs* apresentarem ao

30. Válvulas com o diâmetro de um lápis usual, mas que funcionavam em frequências muito elevadas. Outras empresas vieram a fabricar este tipo de válvulas.

31. O *Nuvistor* é uma válvula eletrónica subminiatura que, em 1959, tinha as dimensões dos transístores que estavam em produção.

mundo o novo dispositivo, denominado transístor como resultado de uma votação para o nome, que decorreu internamente. Os jornalistas do *NY Times* passaram ao lado da enorme importância da descoberta que estava a ser apresentada. O primeiro artigo publicado que descrevia este tipo de transístor foi publicado pela revista *Electronics* em setembro de 1948³².

Entretanto os *Bell Labs* venderam 20 patentes do transístor a 25 000 dólares cada. O primeiro transístor de contacto comercial foi o CK703 produzido pela empresa *Raytheon*, ainda em 1948.

Os transístores de contacto tinham de ser ajustados à mão e os amplificadores realizados com eles eram muito ruidosos. Em 1954 foram rapidamente ultrapassados pelo novo transístor de junção, introduzido por Shockley em 1949. Os *Bell Labs* foram melhorando o processo de produção e, em 1952, o processo M-1752 foi adquirido pela *Western Electric*, que produziu os primeiros transístores comerciais de junção 2N27, 2N28 e 2N29.

As primeiras aplicações comerciais foram na área da comutação telefónica, protótipos de computadores em 1952, aparelhos de ajuda auditiva em 1953 e rádios portáteis em 1954. Em 1953 produziu-se 1 milhão de transístores, em 1955 venderam-se 3,5 milhões e em 1957 foram produzidos 27 milhões.

Nos *Bell Labs*, durante 1949, desenvolveram-se muitos testes com transístores, mas a primeira aplicação funcional parece ter sido uma matriz de comutação (4x10), concebida por Walter Mac Williams, que usava 40 transístores de contacto pontual (num cristal de germânio). Este circuito fazia parte de um computador, simulador de guerra, e foi baseado na primeira geração de transístores (designados por tipo A) desenvolvidos nos *Bell Labs*.

Na Europa, nos anos 1948 e 1949, apareceram várias aplicações de transístores feitos com a tecnologia alternativa³³ à dos *Bell Labs*, desenvolvida pelos investigadores Herbert Matare e Heinrich Welker.

Em 1951 os *Bell Labs* começaram a construir o primeiro computador transistorizado do mundo. O computador foi contratado pela Força Aérea dos EUA, para ser usado em sistemas de radar. O computador tinha o nome TRADIC (*TRAnsistor Digital Computer* ou *TRAnsistorized Airborne Digital Computer*) foi terminado em 1954. Usava 700 transístores de contacto e 10000 díodos semicondutores.

32. Pode ler aqui esse artigo: <https://museufaraday.ist.utl.pt/HistTechnology/TransistorElectronics1948.pdf>

33. Os investigadores envolvidos não tiveram capacidade económica para concorrer com os *Bell Labs*.

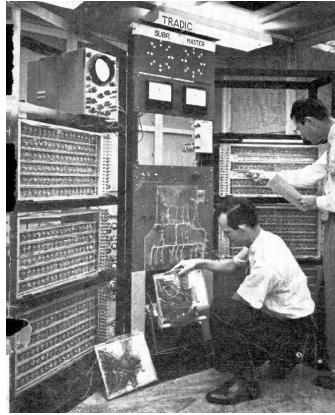


Figura 6: Computador TRADIC (Bell Labs, 1954).

Em 1948, na Universidade de Manchester (Grã-Bretanha), tinha sido construído o computador Manchester I, a válvulas, mas em 1953 construíram o Manchester TC³⁴, que usava 92 transístores de contacto e 550 díodos para substituir algumas funções realizadas por válvulas no Manchester I. A ideia era verificar a robustez dos novos transístores face às válvulas.

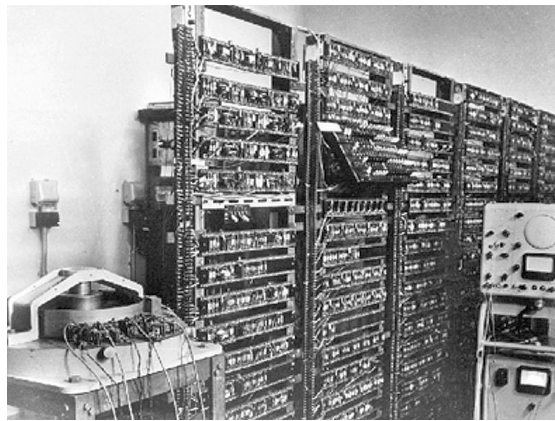


Figura 7: Computador Manchester TC (1953).

Em 1956 o projeto do Manchester TC foi adaptado para realizar o computador Metrovic 950, agora a usar os novos transístores de junção que eram mais fiáveis³⁵.

34. Manchester TC: TC significa *Transistor Computer*.

35. A empresa eléctrica *Metropolitan Vickers* construiu 6 ou 7 destes computadores para uso interno.

As aplicações de baixo consumo

Nesta época os computadores, por serem protótipos, não eram uma alternativa interessante para o escoamento dos transístores que estavam a ser produzidos. O facto de os transístores serem pequenos facilitava o seu uso em aparelhos que idealmente deveriam ser muito pequenos, como os aparelhos de ajuda ao combate da surdez (aparelhos auditivos). O primeiro aparelho auditivo a ser comercializado foi o modelo *Sonotone 1010*, mas o primeiro a ser desenvolvido foi o *Maico “O”* em 1952/53. Todavia, a empresa *Maico* teve problemas com os testes do aparelho, que fizeram com que só aparecesse no mercado em 1953, tendo sido ultrapassado por um modelo híbrido (válvulas e um transístor), o *Sonotone 1010*.



Figura 8: Aparelhos de ajuda auditiva Zenith (Museu Faraday do IST): modelo Royal (válvulas CK549D), de 1951, e modelo Royal T (transístores CK718), de 1953.

No fim dos anos 40, a empresa *Raytheon* desenvolveu válvulas sub-miniatura específicas para a miniaturização dos aparelhos de surdez, nomeadamente as válvulas tipo pêntodo CK 549D³⁶. Depois da invenção do transístor de junção pelos *Bell Labs* em 1951, a *Raytheon* começou o processo industrial de fabricação destes transístores e, em dezembro de 1952, apresentou o transístor CK718, o primeiro transístor de junção produzido e comercializado. Em 1952, a *Raytheon* produziu 2000 destes transístores de baixa frequência e estabeleceu contratos com empresas que fabricavam aparelhos de ajuda auditiva e substituíam as pequenas válvulas, ocupando um pouco menos de espaço mas reduzindo o consumo de energia destes aparelhos.

36. Estas válvulas também tiveram impacto em sistemas de controlo remoto de pequenas aeronaves. Requeriam 1,5 V e 15 mA para os filamentos e 22,5 V para a alimentação da placa do pêntodo.

As aplicações de radiofrequência

As primeiras aplicações dos transístores³⁷ em radiofrequência, com algum sucesso comercial, foram feitas com os transístores tipo “*Surface Barrier*” desenvolvidos pela *Philco* e que permitiram realizar o primeiro autorrádio transistorizado em 1955 e o primeiro televisor portátil, o *Philco Safari 2000*, em 1959. Mas o primeiro grande sucesso comercial de um aparelho realizado com transístores *Mesa* foi o rádio de bolso que recebia a onda média, *Regency TR1*³⁸, desenvolvido pela *Texas Instruments, TI*, em 1954³⁹ e que foi produzido pela *start-up* *Regency*, depois de a *RCA* ter rejeitado a ideia de o produzir por achar que o mercado dos rádios de bolso não era interessante.

O *Regency TR1* foi vendido por US \$49.95 (cerca \$400 atuais) e teve muito sucesso junto da juventude estado-unidense, na altura em que o género de música *Rock and Roll* estava em grande força⁴⁰, o que levou Brattain a afirmar estar contente com o sucesso do TR1 mas que era pena que fosse por causa do *Rock and Roll*.

Mas com o desenvolvimento da tecnologia Planar e a descoberta do MOSFET em 1959 estava aberto o caminho para o desenvolvimento de circuitos integrados contendo milhões de transístores na mesma pastilha de semicondutor.

Todos os endereços da web foram verificados em agosto de 2022.

Bibliografia

- BARDEEN, J., and W. Brattain. 1948. “The Transistor, a Semiconductor Triode.” *Phys. Rev* 74 (230).
- SCHOKLEY, W. July 1949. “The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors.” *The Bell System Technical Journal* 28 (3).

37. <https://museufaraday.ist.utl.pt/HistTechnology/Transistor70.pdf>

38. Pode ver quer o TV *Philco Safari* quer o rádio *Regency TR1* no Museu Faraday do IST.

39. Este rádio foi um enorme desafio para a TI: https://museufaraday.ist.utl.pt/HistTechnology/Regency_TR1_Birthandhistory.pdf

40. http://www.regencytr1.com/index.htm#history_detectives http://www.regencytr1.com/TRivia_CORNER.html

