

Apresentação

Tamás Szmercsányi

Professor do Departamento de Política Científica e Tecnológica de UNICAMP

O texto escolhido para a seção IDÉIAS FUNDADORAS deste número da RBI merece ser destacado por pelo menos três motivos, além e à parte de suas qualidades intrínsecas, identificadas e caracterizadas a seguir. O primeiro tem a ver com a importância do autor e os méritos de seus trabalhos; o segundo diz respeito ao economista homenageado por ele em seu artigo; e o terceiro refere-se ao fato do mesmo ter sido traduzido e poder ser lido diretamente em português.

Este último aspecto constitui uma decorrência da coleção “Clássicos da Inovação”, em boa hora lançada pela Editora da UNICAMP com apoio da FINEP, incluindo a recém-publicada coletânea de artigos de Nathan Rosenberg, *Por Dentro da Caixa Preta: Tecnologia e Economia (Inside the Black-Box: Technology and Economics)*, na qual o texto em pauta figura como capítulo sete. Já o segundo vincula-se à circunstância desse artigo ter sido elaborado em homenagem a Simon Kuznets (1901-1985), Prêmio Nobel de Economia em 1971 e autor de vasta e diversificada obra, inclusive de alguns trabalhos sobre inovação. Nesta apresentação, contudo, iremos concentrar-nos fundamentalmente no primeiro aspecto, assim como na análise do ensaio aqui reproduzido.

Nathan Rosenberg, nascido em 1927, é professor de Economia da Universidade de Stanford, na Califórnia (EUA). Vem atuando no campo da historiografia econômica da ciência e da tecnologia desde a década de 1960, em

cujo final editou a publicação na Grã-Bretanha do importante relatório *The American System of Manufactures*, elaborado por uma missão de observadores empresariais britânicos que haviam ido aos EUA em meados do século XIX para verificar in loco as razões do então já evidente grande progresso técnico da indústria norte-americana. Vários anos antes, num artigo pioneiro intitulado “Technological Change in the Machine Tool Industry, 1840-1910”, publicado em dezembro de 1963 no *Journal of Economic History*, Rosenberg tinha chamado a atenção não apenas para a relevância econômica daquele relatório, mas também para o significado da situação nele retratado face à trajetória tecnológica subsequente do setor industrial de seu país até o advento das modernas linhas de montagem e da produção em massa de nossos dias. Sob este aspecto, o artigo em questão antecedeu em mais de duas décadas o famoso livro de David Hounshell sobre o mesmo assunto, *From the American System to Mass Production, 1800-1932: the Development of Manufacturing Technology in the United States*, publicado em 1984.

Ao contrário desse último autor e de outros historiadores da ciência e da tecnologia, Nathan Rosenberg tem preferido divulgar seus estudos e pesquisas por meio de artigos em periódicos especializados, já tendo elaborado muito mais que uma centena deles. Os melhores todavia acabaram sendo reunidos em coletâneas que se tornaram internacionalmente famosas, tais como *Technology and American Economic Growth* (1972) e *Perspectives on Technology* (1976), ambas anteriores a *Por Dentro da Caixa Preta*, cuja primeira edição em inglês data de 1983, a qual foi seguida por *Exploring the Black Box: Technology, Economics and History*, de 1994. Além disso ele publicou mais duas outras coletâneas em co-autoria com David Mowery: *Technology and the Pursuit of Economic Growth* (1989) e *Paths of Innovation: Technological Change in 20th Century America* (1998), sendo que esta última foi igualmente traduzida para o português dentro da coleção “Clássicos da Inovação”. Todos os escritos de Rosenberg aliam a um intenso rigor analítico uma ampla familiaridade com áreas tão diversas como História Econômica, História de Empresas, História do Pensamento Econômico e História da Ciência e da Tecnologia, principalmente no que se refere a esta última.

Uma boa maneira de começar a discutir o artigo aqui apresentado talvez seja a de reproduzir a opinião do próprio autor a respeito dele, procedimento

esse que aqui adotamos, transcrevendo o trecho do Prefácio de *Por Dentro da Caixa Preta* que a ele se refere:

O capítulo... “Quão exógena é a ciência” volta-se explicitamente para a natureza das interações ciência-tecnologia nas indústrias de alta tecnologia. São examinadas algumas das maneiras como estas indústrias vêm se apoiando nas crescentes reservas de técnicas e conhecimento científico. Contudo, o capítulo também considera um conjunto de questões bem mais amplas a respeito da institucionalização das ciências e da maneira como a agenda das ciências é formulada nas sociedades industriais avançadas. Assim, uma importante tese do capítulo é que, longe de constituírem forças exógenas à arena econômica, o conteúdo e o direcionamento dos empreendimentos científicos são fortemente moldados por considerações tecnológicas, as quais, por sua vez, estão profundamente incrustadas na estrutura das sociedades industriais. (op. cit., p.11)

Nessas considerações a respeito de seu artigo, Rosenberg se mostra bastante sucinto e muito moderado, para não dizer modesto. Seu ensaio, na verdade, postula que as relações entre o progresso científico, o progresso técnico e o desenvolvimento econômico, além de amplas e profundas, são mais antigas do que geralmente se supõe. Outra proposição que ele defende é a da precedência lógica e cronológica da tecnologia em relação à ciência, com a primeira também constituindo uma forma de conhecimento, teórico e prático, e não uma simples aplicação da segunda. Trata-se, além do mais, de uma forma de conhecimento geradora de progresso econômico – algo que não pode ser diretamente atribuído ao conhecimento científico *per se*. Com isto, obviamente, não se quer dizer que este último seja destituído de importância do ponto de vista econômico, em particular nos dias atuais, mas apenas que as tecnologias de base científica são relativamente recentes em termos históricos, somente começando a manifestar-se de forma sistemática a partir da Segunda Revolução Industrial, durante as décadas finais do século XIX. Além disso, pode-se afirmar, como faz o próprio Rosenberg no início da parte III do seu artigo, que, atualmente, é o desenvolvimento tecnológico que vem pautando a programação das pesquisas científicas nos países economicamente mais avançados.

O caráter cumulativo e interativo tanto dos progressos da ciência como do desenvolvimento tecnológico é outra idéia-força que aparece neste artigo, assim como em muitos dos demais trabalhos do autor. Ela se aplica não só às relações entre ciência e tecnologia, mas também aos vínculos destas com o sistema produtivo e a sua rentabilidade financeira. Dentro dessa perspectiva, o progresso técnico e as inovações tecnológicas são fundamentais tanto pelas alternativas que criam como pelos problemas que provocam: ambos são conducentes a mudanças e estas passaram a fazer parte da realidade cotidiana do capitalismo contemporâneo. A percepção desta institucionalização das mudanças pode constituir uma das principais razões da enfática adesão de Nathan Rosenberg ao princípio da endogenia da ciência em relação ao desenvolvimento econômico e, conseqüentemente, à necessidade por ele constantemente realçada dos economistas começarem a estudar a sua natureza e funcionamento de uma forma sistemática e abrangente.

7 QUÃO EXÓGENA É A CIÊNCIA?*

I

Começarei recordando a visão de Kuznets de que o traço distintivo das modernas sociedades industrializadas é seu sucesso na aplicação do conhecimento sistemático à esfera econômica, conhecimento esse derivado da pesquisa científica.¹ Essa visão tem um aspecto desconcertante, ao menos para um economista, na medida em que parece fazer da característica central do moderno crescimento econômico um fenômeno exógeno. Se é realmente assim que o mundo funciona, então nós deveríamos reconhecê-lo graciosamente e aceitar o fato de que os principais determinantes de um fenômeno econômico central se encontram fora do campo de análise do economista. Hoje em dia, os economistas têm muitas razões para ser

* Este artigo foi apresentado numa conferência da Universidade de Harvard em abril de 1981, em comemoração ao octogésimo aniversário do nascimento de Simon Kuznets. Baseia-se, em parte, em pesquisas realizadas nos Bell Laboratories, em Murray Hill, New Jersey. Sua formulação atual beneficiou-se dos incisivos comentários de Moses Abramowitz.

¹ Ver, por exemplo, Simon Kuznets, *Modern Economic Growth* (Yale University Press, New Haven, Conn., 1966), cap. 1.

humildes, e talvez uma razão a mais não seria marginalmente penosa demais.

Por outro lado, talvez não precisemos ser assim tão humildes. Se não insistirmos em formular uma definição excessivamente restritiva do objeto de nossa disciplina, talvez seja possível identificar algumas cadeias causais significativas estendendo-se da vida econômica até a ciência, e também da ciência para a vida econômica. É isso, de fato, que me proponho a fazer aqui. Minha argumentação envolve, em primeiro lugar, a admissão da tecnologia na arena das variáveis econômicas. Os economistas têm tido muito mais sucesso em lidar com as *conseqüências* da mudança tecnológica do que com seus determinantes. Contudo, os extensos trabalhos de Schmookler, Griliches, Mansfield e outros proporcionam suficiente respaldo para admitir-se a tecnologia na arena dos fenômenos a respeito dos quais os economistas têm coisas inteligentes – e talvez até mesmo úteis – para dizer.

O tema central que desejo desenvolver é o de que as preocupações tecnológicas moldam, de várias maneiras, a empresa científica. Acredito que podemos aprender muito a respeito das atividades dos cientistas – mesmo daqueles engajados em pesquisa básica – iniciando nossa investigação pelos domínios da tecnologia.

Naturalmente, é bastante fácil dizer que a ciência não é inteiramente exógena. A questão difícil, aqui, é tentar especificar as ligações entre a economia e a ciência. Conseguiremos ir além do nível dos meros lugares-comuns? Penso que sim, em parte porque a pesquisa se tornou, no século XX, extremamente dispendiosa. A disposição da sociedade de fornecer apoio financeiro pode ter sido menos importante durante o século XIX, quando as necessidades da pesquisa costumavam ser bem modestas – uma pipa, um pouco de linha, uma jarra, uma tempestade de raios e muita sorte. Importa muito mais atualmente, agora que a “pequena ciência” foi substituída pela “grande ciência,” e que o requisito básico para a realização de uma pesquisa pode ser o acesso a um acelerador linear no valor de dezenas de milhões de dólares.

POR DENTRO DA CAIXA-PRETA

Este artigo constitui, então, uma espécie de reconhecimento preliminar, o início de uma tentativa de desenvolver uma estrutura conceitual que melhore nosso entendimento das conexões entre a ciência e o desempenho econômico. Em vista da óbvia e instigante importância desse assunto, ofereço apenas um pedido simbólico de desculpas pelo fato de que este artigo é, na melhor das hipóteses, apenas o pequeno primeiro passo de uma longa jornada do intelecto. Meu argumento será que a tecnologia influencia a atividade científica de maneiras numerosas e difusas. Tentarei identificar algumas das categorias de influência mais importantes e tornar mais preciso nosso entendimento dos mecanismos causais em ação.

Naturalmente, há muito que foi reconhecida a influência de certas preocupações tecnológicas no crescimento do conhecimento científico. A demonstração, por Torricelli, do peso do ar atmosférico, um avanço científico de importância fundamental, foi fruto de suas tentativas de projetar uma bomba melhorada.² O grande feito de Sadi Carnot, ao criar a ciência da termodinâmica, foi resultado da tentativa, quase meio século depois da grande inovação de Watt, de entender o que determina a eficiência das máquinas a vapor.³ A descoberta, por Joule, da lei de conservação da energia brotou de seu interesse em fontes alternativas para geração de energia na cervejaria de seu pai.⁴ O desenvolvimento, por Pasteur, da ciência da bacteriologia emergiu de suas tentativas de lidar com problemas de fermentação e putrefação na indústria vinícola francesa. Em todos esses casos, um conhecimento científico de grande generalidade originou-se de um problema particular num contexto limitado. Uma enumeração como essa, contudo, proporciona apenas um sentido muito limitado da natureza e do grau da interação entre a ciência e a tecnologia. Na verdade, esse sentido é completamente suprimido na formulação prevalecente em nossa épo-

2 I. B. Cohen, *Science: Servant of Man* (Little, Brown and Co., Boston, 1948), p.68-71. Essa descoberta científica, por seu turno, levou imediatamente a um novo instrumento científico, o barômetro.

3 D. S. L. Cardwell, *From Watt to Clausius* (Cornell University Press, Ithaca, New York, 1971).

4 J. G. Crowther, *Men of Science* (W. W. Norton and Co., New York, 1936), cap. 3.

ca, na qual é comum olhar para a causalidade como atuando exclusivamente no sentido da ciência para a tecnologia, e pensar a tecnologia como se fosse redutível à simples aplicação de conhecimentos científicos preexistentes. Devido a isso, parece que vale bem a pena examinar a interação ciência–tecnologia com maior cuidado.

II

Deixem-me agora ser mais específico. Uma das conseqüências mais enganosas de se pensar a tecnologia como mera *aplicação* do conhecimento científico preexistente é que uma tal perspectiva obscurece um ponto extremamente elementar: a tecnologia é, ela própria, um corpo de conhecimentos a respeito de certas classes de eventos e atividades. Não constitui meramente uma aplicação de conhecimentos trazidos de uma outra esfera. Trata-se de um conhecimento de técnicas, métodos e projetos que funcionam, e que funcionam de maneiras determinadas e com conseqüências determinadas, mesmo quando não se possa explicar exatamente por quê. Ela é, portanto, se preferirmos colocar dessa forma, não um tipo fundamental de conhecimento, mas sim uma forma de conhecimento que gerou durante milhares de anos uma certa taxa de progresso econômico. Com efeito, se a raça humana tivesse sido confinada a tecnologias compreendidas em termos científicos, ela já teria saído de cena há muito tempo.

O conhecimento tecnológico foi por muito tempo adquirido e acumulado de modo empírico e rudimentar, sem qualquer embasamento científico. Naturalmente, o conhecimento científico poderia ter acelerado enormemente a aquisição de tal conhecimento, mas, historicamente, vastas quantidades de conhecimento tecnológico foram reunidas e exploradas dessa forma, e essa tendência continua na atualidade. Enquanto existiram incentivos suficientemente poderosos, acumulou-se conhecimento – lenta e dolorosamente – a respeito de uma ampla gama de atividades produtivas. Mesmo hoje em dia,

POR DENTRO DA CAIXA-PRETA

muitas atividades produtivas são realizadas sem um conhecimento científico profundo de por que as coisas funcionam como funcionam. Fazemos funcionar altos-fornos, mesmo sem entender muito bem seu processo de combustão, e voamos cotidianamente em aviões cujos projetos otimizados são obtidos por meio de processos de tentativa-e-erro *ad hoc*, pois não existem teorias sobre turbulência e compressibilidade adequadas para uma determinação prévia das configurações ótimas. Ainda são necessários longos testes e modificações baseadas nos resultados desses testes. Essa é uma das principais razões para os enormes custos de desenvolvimento das modernas aeronaves.

Assim, a situação normal no passado, e em grau considerável também no presente, tem sido a de que o conhecimento tecnológico *precede* o conhecimento científico. Dados os incentivos econômicos subjacentes à inovação tecnológica, não deveria surpreender o fato de que os melhoramentos tecnológicos apenas baseados no conhecimento tecnológico ocorrem *anteriormente* ao entendimento científico. O sucesso comercial requer algo que funcione, sujeito a vários critérios impostos pelo fabricante e pelo usuário. Os engenheiros de projeto de produtos estão envolvidos em complicados processos de otimização, mas processos nos quais o sucesso pode ser conseguido sem o conhecimento científico dos fenômenos envolvidos. A *falta* de entendimento científico não precisa ser, e felizmente com frequência não é, um obstáculo insuperável. Assim, é de se esperar que o conhecimento tecnológico aproveitável seja provavelmente atingido antes de um nível mais profundo de entendimento científico. E assim tem sido, pelo menos nos casos em que estejam atuando incentivos econômicos suficientemente poderosos.

Em vista disso, a tecnologia tem servido como um imenso repositório de conhecimentos empíricos a serem analisados e avaliados pelo cientista. Ainda está longe de ser incomum que os engenheiros, em muitos ramos, resolvam problemas para os quais não há uma explicação científica, e que a solução da engenharia *dê origem* a pesquisas científicas subseqüentes que em algum momento forneçam uma

explicação.⁵ Essa seqüência, naturalmente, tem sido menos comum em setores *fundados* na pesquisa científica – por exemplo, naqueles baseados na eletricidade. Mas, mesmo nesses casos, a experiência prática com a nova tecnologia freqüentemente antecedeu o conhecimento científico – ao proporcionar uma inesperada observação ou experiências que dão origem a pesquisas fundamentais. Por exemplo, nos primeiros tempos do rádio, foi reservada aos amadores a faixa de sinais de ondas curtas – menos de 200 metros – exatamente porque as autoridades pensavam que quase nada podia ser feito com tais ondas. O resultado foi que os engenhosos amadores, que não *sabiam* que nada podia ser feito, rapidamente demonstraram que era possível realizar transmissões com eficiência na faixa de ondas curtas. Determinar com precisão por que esse desempenho excedia tanto as expectativas levou a descobertas importantes sobre a natureza da ionosfera.⁶ No final dos anos 1940, engenheiros que procuravam a causa de curtos-circuitos em equipamentos eletrônicos descobriram que eram causados por um crescimento filamentososo – os chamados cristais *whisker* (costeleta). A descoberta de que esses cristais eram ao mesmo tempo fortes e flexíveis levou a extensas pesquisas das condições determinantes de seu crescimento e de suas propriedades físicas. Essas pesquisas acabaram por levar a um entendimento da ciência fundamental do crescimento de cristais, a qual, por sua vez, foi de grande valor para a indústria eletrônica.⁷

No que se refere aos metais, a ciência da metalurgia só começou realmente a se desenvolver na segunda metade do século XIX. Seu objetivo era explicar o comportamento dos metais que já eram produzidos por meio das tecnologias Bessemer e pós-Bessemer. Um campo de pesquisa científica particularmente fecundo consistiu em

⁵ Para alguns exemplos interessantes, ver R. R. Whyte (ed.), *Engineering Progress through Trouble* (The Institution of Mechanical Engineers, London, 1975).

⁶ Cohen, *Science*, cap. 16.

⁷ "Mechanism of Crystal Growth Discovered," *Bell Laboratories Record*, April 1964, p.142.

POR DENTRO DA CAIXA-PRETA

tentar explicar as propriedades específicas do aço produzido por certas tecnologias ou explorar certos insumos particulares. Fenômenos como a deterioração com o tempo, ou a fragilidade de metais produzidos com algum combustível particular, intrigavam o pessoal com treinamento científico. Apesar disso, novas ligas continuaram a ser desenvolvidas, mesmo durante o século XX, segundo métodos de tentativa-e-erro.

Uma nova liga superior de alumínio, o duralumínio, foi desenvolvida mais ou menos acidentalmente e usada durante anos antes que alguém realmente entendesse o fenômeno do “enrijecimento pela idade”. Isso veio mais tarde, e somente com a introdução de instrumentação, inclusive as técnicas de difração de raios X e o microscópio eletrônico.

Wilm descobriu o enrijecimento pela idade, um achado de enorme significação para a metalurgia, como resultado de aparentes inconsistências em medidas de dureza envolvendo alguns espécimes de ligas de alumínio. Naquela época era impossível vincular o endurecimento pela idade a mudanças estruturais que pudessem ser observadas sob um microscópio, e não surgiu qualquer explicação satisfatória para o fenômeno.⁸ Apesar disso, o duralumínio foi extensamente utilizado na indústria aeronáutica (inclusive na construção de zepelins) durante a Primeira Guerra Mundial. Durante os anos entre as duas guerras, ligas enrijecidas pela idade e por precipitação⁹ foram empregadas em número crescente de aplicações comerciais, e o óbvio valor comercial de ligas diferentes e superiores deu um podero-

⁸ “Embora deva ser considerado um pesquisador aplicado bem-sucedido e um experimentador metódico, mesmo pelos padrões modernos, Wilm não expressou qualquer curiosidade profunda com relação às razões para o endurecimento e preferiu deixar para outros até mesmo a especulação a respeito de sua natureza.” H. Y. Hunsicker e H. C. Stumpf, “History of Precipitation Hardening”, in Cyril Stanley Smith (ed.), *The Sorby Centennial Symposium on the History of Metallurgy* (Gordon and Breach Scientific Publishers, New York, 1965), p.279.

⁹ Uma liga que envelhece à temperatura ambiente é considerada uma liga enrijecida pela idade, enquanto uma liga que requer precipitação a uma temperatura superior é classificada como uma liga que endurece por precipitação. W. Alexander e A. Street, *Metals in the Service of Man* (Penguin Books, Harmondsworth, 1954), p.176.

so impulso à pesquisa básica que estabeleceria a ligação entre as características de desempenho das ligas e suas estruturas atômicas e cristalinas subjacentes. Contudo foram os metalurgistas práticos que tornaram disponível para os engenheiros um rol de novos metais de muito maior resistência, com relações resistência/peso, combinações de resistência e condutividade e propriedades magnéticas superiores, muitos anos antes que seu desempenho pudesse ser explicado em um nível mais profundo. Na verdade, a determinação de explicar as características de desempenho descobertas pelos metalurgistas e já incorporadas a numerosas práticas industriais constituiu um grande incentivo para a pesquisa fundamental. “Desses estudos nasceram melhor percepção dos mecanismos de deformação e fortalecimento, apoio adicional para as teorias magnética e de deslocamentos e a verificação da existência e importância dos buracos em redes.”¹⁰

Eu sugiro que, mesmo que se adentre muito o século XX, a metalurgia pode ser caracterizada como um ramo no qual o tecnologista normalmente “chegou lá antes”, desenvolvendo poderosas novas tecnologias *antes* de ter uma orientação sistematizada por parte da ciência. Os cientistas foram contemplados pelos tecnólogos com certas propriedades ou características de desempenho que demandavam uma explicação científica. Tais avanços tecnológicos, como o desenvolvimento do aço rápido por Taylor e White (1898) e o desenvolvimento, nos anos 1920, do carbureto de tungstênio sinterizado, são exemplos clássicos de melhoramentos tecnológicos que precederam e deram origem à pesquisa científica em metalurgia. Na verdade, Frederick Taylor havia-se preocupado com questões de organização e administração de lojas, e não estava familiarizado nem mesmo com o conhecimento metalúrgico rudimentar disponível para os tecnólogos de sua própria época.¹¹

¹⁰ Smith, *Sorby Centennial*, p.309. Ver também Hugh O’Neill, “The Development and Use of Hardness Tests in Metallographic Research”, op. cit.

¹¹ Ver, por exemplo, Melvin Kranzberg e Cyril Stanley Smith, “Materials in History and Society”, Part 1 in Morris Cohen (ed.), *Materials Science and Engineering* (Elsevier, Amsterdam, s.d.).

POR DENTRO DA CAIXA-PRETA

No refino de petróleo, de forma semelhante, os melhoramentos do processo envolveram o uso de técnicas de destilação fracionada que já haviam sido desenvolvidas – nesse caso, em outros ramos. Os métodos de craqueamento foram introduzidos por pessoal com extensa experiência prática, mas nenhum treinamento formal em química. Quando Berthelot, o químico francês, “publicou em 1867 suas pesquisas básicas sobre a ação do calor em vários hidrocarbonetos, ele proporcionou meramente uma base para a interpretação do que estava acontecendo na prática na indústria do petróleo”.¹²

Essa seqüência, na qual o conhecimento tecnológico precede o conhecimento científico, não foi de forma alguma eliminada no século XX. Boa parte dos trabalhos de cientistas envolve, atualmente, a sistematização e reestruturação dos conhecimentos e de soluções e métodos práticos, utilizáveis, previamente acumulados pelos tecnólogos. A tecnologia moldou a ciência de maneiras importantes, porque adquiriu primeiro algumas formas de conhecimento e forneceu dados que, por sua vez, se tornaram os *explicanda* dos cientistas, que tentaram interpretá-los ou codificá-los em nível mais profundo.

Um processo muito similar parece ter ocorrido com uma das mais notáveis realizações do século XX – o transistor. Já existia uma ampla experiência empírica com materiais semicondutores antes que Mervin Kelly, o vice-presidente executivo dos Bell Labs, decidisse apoiar o projeto de pesquisa que levou, em 1947, à descoberta do efeito transistor. Sabemos agora que o comportamento peculiar dos semicondutores é uma função da presença de elétrons (condutores) móveis, o que, por sua vez, depende de coisas como impurezas, luz, calor ou estímulos elétricos. Contudo, muito antes que esses fenômenos fossem entendidos, fazia-se um uso extensivo de semicondutores como retificadores de óxido de cobre e de silício, os quais haviam sido descobertos por meios puramente empíricos. Na verdade,

¹² Kendall Birr, “Science in American Industry”, in D. Van Tassel e Michael G. Hall (eds.), *Science and Society in the U. S.* (Dorsey Press, Homewood, III, 1966), p.60-1.

a evidência dessas tecnologias que já funcionavam teve um papel crítico na decisão de empreender a pesquisa em estado sólido que culminou na descoberta do efeito transistor.¹³

III

Até aqui, afirmei que a acumulação de conhecimentos tecnológicos forneceu uma base de observações que em algum momento se tornou objeto de interesse por parte da ciência. Deixem-me agora acrescentar uma dimensão diferente a essa interação. Ao considerar o impacto da tecnologia sobre a ciência, um tema central de minha interpretação é que o progresso tecnológico desempenha um papel muito importante na formulação da agenda subsequente da ciência. A trajetória natural de certos melhoramentos tecnológicos identifica e define os limites de novos melhoramentos, o que, por seu turno, orienta o foco da pesquisa científica subsequente. No setor aeronáutico, por exemplo, os melhoramentos do desempenho levavam continuamente a tecnologia a *limites* de desempenho que só poderiam ser ultrapassados através de um melhor entendimento de certos aspectos do mundo físico. A introdução do turbojato teve um profundo impacto na ciência, assim como sobre a indústria aeronáutica, ao alargar progressivamente os limites do entendimento científico e ao identificar áreas que exigiam mais pesquisas antes que pudessem ocorrer novos melhoramentos tecnológicos. Assim, o turbojato levou primeiramente à criação de uma nova aerodinâmica supersônica,

13 J. A. Morton, *Organizing for Innovation* (McGraw-Hill Book Company, New York, 1971), p.46-8. O fenômeno da retificação era particularmente intrigante por causa da grande discrepância entre as predições teóricas e a quantidade de retificação que podia ser observada ou conseguida experimentalmente. Ver G. L. Pearson e W. H. Brattain, "History of Semiconductor Research", *Bell Telephone System Technical Publications*, Monograph 2538 (Murray Hill, New Jersey, 1955), p.4-7. Também se havia adquirido uma grande quantidade de experiências, valiosas e relevantes, em decorrência das pesquisas sobre as frequências de microondas que haviam sido estimuladas pelo interesse no radar, durante a Segunda Guerra Mundial.

POR DENTRO DA CAIXA-PRETA

apenas para dar lugar à aerotermodinâmica, à medida que turbojatos cada vez mais poderosos levavam as aeronaves a velocidades em que a geração de calor sobre a superfície da aeronave se tornava um fator importante para o comportamento do fluxo de ar. Eventualmente, as aeronaves movidas por turbojatos atingiriam velocidades em que se tornariam preponderantes as considerações magnetotermodinâmicas: as temperaturas se tornariam tão grandes que o ar se dissociaria em íons submoleculares carregados.¹⁴

Os melhoramentos tecnológicos fazem mais do que gerar a necessidade de tipos específicos de novos conhecimentos. O avanço do conhecimento frequentemente só se dá por meio da experiência real com uma nova tecnologia em seu ambiente operacional. Embora os testes em túnel de vento tenham sido uma fonte inestimável de informações sobre o desempenho de um novo tipo de aeronave, sempre houve uma apreciável margem de erro entre esses testes e o desempenho real. Isso se deve em parte a uma teoria científica inadequada para relacionar as condições dos testes experimentais com as situações da vida real e em parte a informações inadequadas ou à falta de habilidade para conduzir experimentos válidos. Assim, uma das preocupações a respeito dos primeiros vôos de naves espaciais era que a reentrada de um veículo com asas na atmosfera terrestre envolvia considerações aerodinâmicas que não eram inteiramente compreendidas.

Sugiro que uma das características centrais dos setores de alta tecnologia é precisamente esse padrão: o progresso tecnológico identifica, por meios razoavelmente não-ambíguos, as direções de novas pesquisas científicas que apresentem um alto retorno potencial. Esse padrão pode assumir formas variadas. No caso do motor a jato, funcionando a velocidades cada vez mais altas, a tecnologia apontava pa-

14 Edward W. Constant II, *The Origins of the Turbojet Revolution* (Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1980), p.240; e Theodore von Karman, *Aerodynamics* (Cornell University Press, Ithaca, New York, 1954). O crescimento do sistema ferroviário teve um papel muito semelhante durante o século XIX, especialmente em conexão com a fadiga metálica e a resistência dos materiais.

ra fenômenos naturais específicos num ambiente particular. No setor da telefonia, a transmissão a longas distâncias e a introdução de novos modos de transmissão deram origem a muitas pesquisas básicas. A fim de melhorar a transmissão pelo rádio, era essencial entender com maior clareza como a radiação eletromagnética interage com vários tipos de condições atmosféricas. Com efeito, alguns dos projetos de pesquisa científica mais básicos do século XX brotaram diretamente das tentativas de melhorar a qualidade da transmissão do som pelo telefone. O trabalho com várias formas de interferência, distorção ou atenuação de sinais eletromagnéticos que transmitem sons ampliou profundamente nosso entendimento do universo.

Dois avanços científicos fundamentais, realizados cinquenta anos atrás por Jansky e mais recentemente por Penzias & Wilson, ocorreram como resultado de tentativas de melhorar a transmissão telefônica. Isso implicava trabalhar com fontes de ruído. Também vale a pena notar que, em ambos os casos, o avanço científico envolveu o uso de equipamentos extremamente sensíveis que haviam sido desenvolvidos nos Bell Labs para projetos de pesquisa em nível mais aplicado. Jansky estava usando uma antena que podia ser girada e que havia sido projetada por Harald Friis para tratar de problemas ligados a sinais fracos de rádio. Penzias e Wilson estavam usando uma antena amplificadora extremamente sensível, que havia sido construída para os projetos dos satélites de comunicação Echo e Telstar.¹⁵

Jansky havia sido convidado a trabalhar com os problemas de estática do rádio após a criação do serviço de radiotelefonia ultramarina no final dos anos 1920. Em 1932, ele publicou um artigo identificando três fontes de ruído: tempestades locais, tempestades mais distantes e uma terceira fonte, que Jansky identificou como “um chiado estáti-

¹⁵ Numa entrevista após receber o Prêmio Nobel, Wilson disse que foi a disponibilidade daquela antena que o havia primeiramente motivado a trabalhar na Bell Labs. “O que me atraiu originalmente para os Bell Labs foi a disponibilidade do refletor – construído para o Projeto Echo – e o *maser* de onda móvel, que formavam um radiotelescópio sem igual.” Steve Aaronson, “The Light of Creation – an interview with Arno A. Penzias and Robert C. Wilson”, *Bell Laboratories Record*, January 1979, p.13.

POR DENTRO DA CAIXA-PRETA

co estacionário, cuja origem não é conhecida”. Foi esse *ruído estelar*, como foi chamado, que marcou o nascimento da radioastronomia.

A experiência de Jansky põe em evidência uma das razões pelas quais é tão difícil distinguir entre pesquisa básica e pesquisa aplicada. Progressos fundamentais freqüentemente ocorrem enquanto se está trabalhando com problemas práticos ou aplicados. Tentar traçar essa linha de separação com base nos motivos da pessoa que realiza a pesquisa – se existe uma preocupação com a obtenção de informação útil (aplicada) em oposição a uma busca puramente desinteressada de novo conhecimento (básica) – representa, na minha opinião, uma busca sem perspectiva de sucesso. Quaisquer que sejam as intenções *ex ante* ao empreender a pesquisa, o tipo de conhecimento realmente adquirido é altamente imprevisível. Historicamente, alguns dos avanços científicos mais fundamentais vieram de pessoas que, como Jansky, pensavam estar realizando pesquisa aplicada.

O apoio dos Bell Labs à pesquisa básica em astrofísica está relacionado aos problemas e possibilidades da transmissão de microondas, especialmente o uso de satélites de comunicação para esse fim.¹⁶ Penzias & Wilson observaram pela primeira vez a radiação cósmica de fundo, que é agora considerada uma confirmação da teoria do *big bang* da formação do universo, enquanto tentavam identificar e medir as fontes de ruído em seu sistema receptor e na atmosfera. Eles descobriram que “a radiação está distribuída isotropicamente no espaço, e seu espectro é o de um corpo negro a uma temperatura de 3 graus Kelvin”.¹⁷ Embora Penzias & Wilson não soubessem disso naquele momento, as características dessa radiação de fundo eram exa-

¹⁶ A freqüências muito altas, a chuva e outras condições atmosféricas tornam-se fontes importantes de interferência na transmissão. Essa forma de perda de sinal tem sido uma preocupação constante no desenvolvimento da comunicação por satélite. Ela levou a uma grande quantidade de pesquisa em ambos os níveis, da tecnologia e da pesquisa básica – por exemplo, o estudo dos fenômenos de polarização. Ver Neil F. Dinn, “Preparing for Future Satellite Systems”, *Bell Laboratories Record*, October 1977, p.236-42.

¹⁷ *Impact*, preparado por membros do corpo técnico, Bell Telephone Laboratories, e a Western Electric Company Patent Licensing Division, M. D. Fagen (ed.) (Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey, 1972), p.87.

tamente o que havia sido previsto anteriormente por cosmólogos que apoiavam a teoria do *big bang*.

Notemos que, no setor de telefonia, as metas práticas relacionadas com a transmissão do som levaram a pesquisas básicas altamente criativas. Mas notemos também que o trato com os problemas da comunicação conduziu igualmente a *tipos* muito diferentes de pesquisa básica. O resultado da pesquisa pode ser um novo conceito ou uma ferramenta intelectual, ou então uma nova estrutura conceitual que pode ser aplicável a uma vasta gama de fenômenos em disciplinas muito diferentes. Assim, embora a teoria da informação de Shannon¹⁸ tivesse importantes implicações para o projeto de novos equipamentos e novos sistemas no setor de telefonia, ela também tinha grande aplicabilidade em outras áreas. Shannon ofereceu uma generalização para o cálculo da máxima capacidade, em um sistema de comunicações, de transmitir informações livres de erros – um feito intelectual de evidente relevância para o setor de telefonia, no qual uma compreensão precisa da capacidade de um canal é um fator central no projeto de engenharia. Como tem sido freqüentemente o caso, porém, um avanço numa área teve impacto em lugares remotos. Isso porque a idéia central de Shannon, de que é possível dar uma expressão quantitativa ao conteúdo da informação, tinha inúmeras modificações. A teoria da informação é na realidade uma nova forma de pensar a respeito de uma série de problemas que ocorrem em muitos lugares, e influenciou poderosamente projetos tanto de equipamentos como de *software*. O resultado da pesquisa, nesse caso, foi uma família de modelos matemáticos de grande generalidade, com aplicações tanto nas ciências do comportamento como nas ciências físicas e na engenharia.¹⁹

¹⁸ Claude Shannon, "A Mathematical Theory of Communication", *Bell System Technical Journal*, July 1948.

¹⁹ Este ponto, a respeito da transferência de técnicas, conceitos e ferramentas e métodos de pesquisa de uma disciplina científica para outra, é um assunto extremamente relevante, o qual, até onde sei, não tem sido estudado de forma muito sistemática. A capacidade de transferir *hardware* ou *software* de uma disciplina para outra tem sido uma força poderosa no crescimento da pesquisa em campos específicos.

POR DENTRO DA CAIXA-PRETA

Eu sugiro que há em certos setores – por exemplo, o de sistemas de telefonia – uma lógica interna coercitiva, que impele o empreendimento da pesquisa em direções específicas. Consideremos algumas das necessidades materiais do sistema. Para o desenvolvimento do transistor foi necessário alcançar padrões de pureza sem precedentes para materiais com fins industriais. Como a ação do transistor dependia da introdução de uns poucos átomos estranhos no cristal semicondutor, foi preciso atingir padrões de pureza notavelmente altos nos semicondutores. Introduzir um único átomo estranho para cada 100 milhões de átomos de germânio significava que o sistema de telefonia tinha de alcançar níveis de pureza que pressupunham uma boa dose de pesquisa de materiais.

O crescimento do sistema de telefonia também significava que os equipamentos e componentes tinham de trabalhar sob condições ambientais extremas, desde cabos transatlânticos até satélites geossíncronos. Esses extremos ambientais têm uma importante consequência particular: severas penalidades econômicas no caso de *não se conseguir* estabelecer padrões bem altos de confiabilidade. Há razões constrangedoras para se atingirem padrões altos que não estão presentes, por exemplo, no setor de produtos eletrônicos de consumo, para não mencionar a fabricação de tijolos. Uma falha num cabo submarino colocado no fundo do oceano envolve imensos custos de reparo e substituição, além de uma prolongada perda de receitas. De forma semelhante, os satélites de comunicações *tinham* de ser nota-

Como observou Harvey Brooks: “A biologia molecular foi tornada possível em parte pela aplicação das ferramentas e técnicas experimentais da física e foi parcialmente criada por físicos convertidos em biólogos. A onda de interesse pelas ciências da terra – geofísica da litosfera, física atmosférica e oceanografia física – foi parcialmente gerada pela aplicação de técnicas e conceitos da física a esses campos, os quais tornaram possível formular e responder classes de questões científicas que poucos anos atrás estavam completamente além do escopo das observações. Todas essas ciências passaram de um modo e estilo puramente observacionais e descritivos para um modo no qual os experimentos de laboratório e os modelos matemáticos testáveis são técnicas importantes” (“Physics and the Polity”, *Science*, 26 April 1968, p.398). As razões para essas transferências, o tempo em que ocorrem e as circunstâncias que conduzem a elas não são muito bem compreendidos. Contudo tais transferências parecem ser um importante determinante da direção do progresso científico no século XX, e vale a pena mencionar que, em uma época anterior, as ciências físicas foram as grandes beneficiárias de desenvolvimentos na instrumentação da biologia e da medicina – especialmente a tecnologia de raios X e as microscopias óptica e eletrônica.

velmente fortes e confiáveis simplesmente para sobreviverem ao fato de serem lançados e colocados em órbita. Eles tinham de sobreviver a extremos de choques, vibrações, variações de temperatura, radiações, e assim por diante.²⁰ Assim, os altos padrões de confiabilidade não constituem, nesse setor, uma consideração marginal, mas a essência de um desempenho econômico bem-sucedido. Essa consideração teve muito a ver com a alta prioridade dada à pesquisa de materiais nos Bell Labs ao longo das últimas décadas. Ela também tem sido fundamental para as pesquisas em outras direções. Um dos principais problemas com as válvulas era sua falta de confiabilidade. A decisão de empreender um programa de pesquisa básica em física do estado sólido, que culminou no desenvolvimento do transistor, foi fortemente influenciada por essa e por outras fontes de insatisfação.²¹ Mas o transistor, ainda que em algum momento se tenha tornado altamente confiável, também padecia de problemas de confiabilidade em seus primeiros anos. No início dos anos 1950, à medida que o transistor experimentava uma ampliação de sua gama de aplicações, foram emergindo sérios defeitos de confiabilidade. Esses defeitos estavam ligados a certos fenômenos de superfícies. Em consequência disso, empreenderam-se importantes pesquisas na ciência básica dos estados de superfície. Essas pesquisas acabaram por resolver os problemas de confiabilidade e geraram uma grande quantidade de novos conhecimentos fundamentais a respeito da física das superfícies.

Mas muito antes – durante os anos 1920 –, a insatisfação com as válvulas havia sido responsável por um belo exemplar de pesquisa fundamental. C.J. Davisson havia estado ocupado com o desempenho das válvulas e com as possibilidades de melhorá-las – uma vida mais longa, capacidades estendidas, maiores economias de projeto, e assim por diante. Ele ficou impressionado com os padrões de emissão dos

²⁰ Ver Morton, *Organizing for Innovation*, p.24-5.

²¹ Idem, op. cit., p.46-8, e J. A. Morton, entrevista não publicada realizada em Murray Hill, New Jersey, 29 de novembro de 1962, p.21-5.

POR DENTRO DA CAIXA-PRETA

cristais de níquel, observados enquanto realizava pesquisas sobre a “emissão secundária” de elétrons em tubos termiônicos. Davisson demonstrou experimentalmente a natureza ondulatória da matéria bombardeando um cristal de níquel com um feixe de elétrons e estudando a maneira como sofriam difração. Davisson repartiu o Prêmio Nobel de 1937, por sua cabal demonstração da natureza ondulatória da matéria.²²

IV

Há outras fortes razões pelas quais as relações entre a ciência e a tecnologia não podem ser adequadamente descritas quando se visualiza a pesquisa científica aparecendo em primeiro lugar e levando em algum momento a aplicações na tecnologia. Muitos dos aspectos de um material não são explorados cientificamente até que o material tenha estado em uso durante um longo tempo. Isso porque muitos dos problemas vinculados ao uso de um material levam tempo para vir à tona. Uma preocupação central da pesquisa de materiais tem sido a melhoria do desempenho pela eliminação de problemas que com frequência somente emergem após um uso prolongado. Muitos materiais estão sujeitos a uma depressão e mais que conhecida laidinha de degradação, fratura, contaminação, envelhecimento, corrosão, fragilidade sob tensões complexas, e uma plethora de dificuldades de manutenção correlatas. Assim, foi realizada nos Bell Labs uma grande quantidade de pesquisas sobre o polietileno, antes da difusão de seu uso para revestimento de cabos e isolamento de fios. Apesar de tudo, toda uma nova geração de problemas emergiu *depois* que ele havia sido instalado. Muitas pesquisas adicionais, em parte estimuladas por essas dificuldades durante o uso, levaram a um entendimento

²² Prescott Mabon, *Mission Communications* (Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey, 1975), p.97.

muito mais profundo de seu padrão de solidificação ou morfologia. Dessa segunda geração de pesquisas emergiu um conhecimento muito mais profundo de como essa morfologia determina importantes propriedades mecânicas, elétricas e químicas.²³ A fragilidade do polietileno mostrou ser influenciada por seu peso molecular e sua cristalinidade, e, portanto, seu peso molecular foi aumentado. A perturbadora tendência do polietileno a oxidar-se rapidamente foi contra-atacada pelo desenvolvimento e uso de compostos antioxidantes, e assim por diante.

O crescimento dos conhecimentos é muito mais cumulativo e interativo do que se percebe, especialmente quando o conhecimento é pensado como algo que acontece de um só golpe, de uma vez por todas, com o novo conhecimento científico supostamente conduzindo a um período de aplicações tecnológicas. Na verdade, as contínuas experiências com um material em um novo ambiente, sujeito a novas tensões, levantam problemas não tratados anteriormente, ou nem sequer previstos.

Os setores de alta tecnologia, ao forçarem os limites do desempenho técnico, estão continuamente identificando novos problemas que podem ser tratados pela ciência. Ao mesmo tempo, os esperados melhoramentos do desempenho ou a redução de custos prometem grandes recompensas financeiras. A questão intrigante é, naturalmen-

23 "An Interview with Dr. Bruce Hannay", *Bell Laboratories Record*, February 1969, p.45-52. Como observou W. O. Baker, "o aspecto da ciência dos polímeros que permitiu sua expansão tão dramática no interior das telecomunicações [...] durante as últimas duas décadas tem sido a notável transferência de informações entre o comportamento da entidade química (isto é, a molécula individual comum de polímero) e sua corporificação física, como na forma de fluido viscoelástico, ou em sólidos, e ultimamente no próprio cristal, cada vez mais adaptado. É aqui que a ciência dos polímeros foi favorecida tanto intelectual como materialmente, pois no caso de muitas classes da matéria, o acoplamento entre as propriedades macroscópicas (resistência ao cisalhamento, resiliência, atrito, natureza elétrica, e assim por diante) e a unidade estrutural básica, o átomo ou molécula, é muito mais fraco. Os metais são o clássico extremo oposto, no qual as propriedades de sólidos e líquidos são quase que inteiramente dominadas pelo agregado, embora, naturalmente, a estrutura eletrônica total do átomo individual tenha significação central. Mas, além disso, as unidades moleculares individuais nos próprios polímeros atuam em uma tal escala de tempo de relaxação elétrica e mecânica que uma ampla gama de conformações e de respostas temporais pode ser obtida em sua aplicação. Esses fatores se refletem no crescimento das quantidades de polímeros usadas durante a década passada pelo Bell Telephone System". "The Use of Polymer Science in Telecommunications", *Annals of the New York Academy of Sciences*, p.620.

POR DENTRO DA CAIXA-PRETA

te, por que esse mecanismo parece funcionar tão melhor em alguns setores – ou empresas – do que em outros.

V

Estive argumentando até aqui que a agenda da pesquisa científica está estreitamente ligada às necessidades tecnológicas induzidas pela produção. Também tenho indicado as trajetórias específicas dessa influência, que podem ajudar-nos a compreender as mudanças de direção da pesquisa científica. No caso do setor de telefonia, problemas específicos e direções para a pesquisa foram sugeridos pela expansão da rede, a transmissão através de distâncias cada vez maiores e os problemas associados de interferência e distorção, a necessidade de estabelecer padrões muito altos de confiabilidade, e assim por diante. O crescimento do sistema de telefonia levou-o a encontrar algumas outras restrições elementares, entre as quais uma das mais básicas é a capacidade dos canais. Historicamente, uma das mais importantes e engenhosas linhas de pesquisa envolveu o aumento da capacidade de carregar mensagens dos canais já existentes. Em algum momento, contudo, a necessidade de desenvolver a capacidade de novos canais tornou-se inevitável. Assim, houve um movimento dos cabos comuns para os cabos coaxiais, para sistemas de rádio na faixa de microondas, para os satélites, e para as fibras de vidro e transmissão de ondas de luz. No caso da comunicação por ondas de luz, sua atratividade e a decisão de tentar desenvolvê-la como um novo modo de transmissão foram influenciadas por uma outra restrição cada vez mais constrangedora: o espaço físico. O absoluto congestionamento do limitado espaço dos condutos nas áreas metropolitanas deu grande impulso à pesquisa com fibras de vidro, que ofereciam a perspectiva de fazer caber uma capacidade de canais muito maior no espaço existente.

O desenvolvimento das fibras ópticas é particularmente interessante porque ilustra várias das interações dinâmicas com as quais

estou preocupado. Embora sua atratividade como um novo modo de transmissão fosse aumentada pelas restrições de espaço e pelo congestionamento, sua factibilidade radicava-se em um outro conjunto de avanços tecnológicos dos anos 1950. Foi o desenvolvimento da tecnologia do laser que tornou possível o uso das fibras ópticas para transmissão. Essa possibilidade, por sua vez, apontava na direção do campo da óptica, no qual se poderia esperar que os avanços do conhecimento tivessem um grande retorno potencial. Em consequência disso, a óptica, como campo de pesquisa científica, teve em anos recentes uma grande ressurgência. Ela foi convertida – por mudanças nas expectativas, baseadas em inovações tecnológicas passadas e previstas – de um campo intelectual relativamente calmo a um florescente campo de pesquisa científica. As causas não eram internas ao campo da óptica, mas estavam baseadas em uma avaliação radicalmente modificada das novas possibilidades tecnológicas – as quais, por sua vez, tinham suas raízes no anterior avanço tecnológico constituído pelo laser.

O relacionamento que estou sugerindo aqui – com mudanças no domínio da tecnologia dando origem a pesquisas fundamentais – não é absolutamente exclusivo da óptica. A física do estado sólido, atualmente a maior subárea da física, atraía somente uns poucos físicos antes do advento do transistor. De fato, o tema sequer era ensinado na maioria das universidades. A formação em física do estado sólido que Shockley recebeu no MIT, nos anos 1930, provavelmente não estava a seu alcance, naquela época, em nenhuma outra universidade dos Estados Unidos, com exceção de Princeton. Essa situação foi, naturalmente, transformada pela invenção do transistor, em 1948. O transistor mostrou o alto potencial de retorno da pesquisa em física do estado sólido e levou a uma enorme concentração de recursos nesse campo. É importante notar que a rápida mobilização de recursos na pesquisa nessa área teve lugar tanto nas universidades como nas empresas privadas. Assim, a tecnologia do transistor não estava sendo edificada sobre um vasto esforço *anterior* de pesquisa. Esse em-

POR DENTRO DA CAIXA-PRETA

preendimento tinha sido, na verdade, extremamente modesto. Foi o salto inicial do transistor que *subseqüentemente* deu origem a um comprometimento em larga escala de recursos científicos. J. A. Morton, que chefiava o grupo de desenvolvimento fundamental formado nos Bell Labs após a invenção do transistor, relatou que era impossível contratar pessoal com conhecimento de física do estado sólido no final dos anos 1940, “porque a física do estado sólido não fazia parte do currículo das universidades”.²⁴ Como resultado, Morton convenceu Shockley a ministrar para o pessoal da Bell Labs, durante o horário de trabalho, um curso chamado “Solid State Physics of Semiconductors”.^{*} O famoso livro de Shockley, *Electrons and Holes in Semiconductors*,^{**} era uma compilação dos materiais usados naquele curso. Shockley ministrou até mesmo um curso de seis dias na Bell Labs, em junho de 1952, para professores de umas trinta universidades, como parte de uma tentativa de encorajar a criação de cursos de física de transistores. Claramente, o principal fluxo do conhecimento científico, nessa época, estava ocorrendo da indústria para a universidade.²⁵

Assim, mesmo quando um avanço tecnológico é precedido por alguma pesquisa básica, é o estabelecimento de uma vinculação palpável entre a tecnologia e aquele campo específico da ciência que se torna responsável pela grande intensificação da pesquisa nesse campo. Uma história semelhante ocorreu na física nuclear após a realização da fissão em 1938 e os assustadores desenvolvimentos na tecnologia nuclear durante a Segunda Guerra Mundial. Em qualquer momento no tempo, é provável que a alocação de recursos científicos seja dominada por uma prévia evidência de retornos tecnológicos. Essa probabilidade foi extremamente aumentada no século XX

²⁴ Morton, entrevista não publicada, p.11.

^{*} Física do Estado Sólido de Semicondutores. (N.T.)

^{**} Elétrons e Buracos em Semicondutores. (N.T.)

²⁵ Mesmo muitos anos mais tarde, em centros de atividades com semicondutores como o Silicon Valley, está longe de ser incomum que os cursos de estado sólido sejam dados por “professores em tempo parcial da indústria local”. Ernest Braun e Stuart MacDonald, *Revolution in Miniature* (Cambridge University Press, Cambridge, 1978), p.126-7.

pela escalada dos custos da pesquisa e a conseqüente necessidade de estabelecer mecanismos para financiar essa pesquisa nos setores público e privado. Mas, até mesmo no final do século XIX, antes do grande aumento do custo das pesquisas, a direção da pesquisa científica era fortemente influenciada por realizações tecnológicas que prometiam altos retornos financeiros. O florescimento da pesquisa em química orgânica no último terço do século XIX foi em grande medida uma conseqüência da bem-sucedida síntese, realizada por Perkin, da malveína, o primeiro corante de anilina sintética. A rápida expansão da pesquisa básica sobre o comportamento de grandes moléculas foi uma conseqüência “do desenvolvimento, por Leo Baekland em 1909, de combinações com fenol-formaldeído que podem ser moldadas em qualquer formato e endurecidas, por meio de ligações transversais entre moléculas, mediante o aquecimento sob pressão”.²⁶

VI

Por que o avanço tecnológico é tão importante para o direcionamento da pesquisa científica? Principalmente pela óbvia, mas atrativa sugestão de altos retornos potenciais – financeiros ou sociais – dessa pesquisa. É importante perceber que um grande avanço tecnológico em realidade assinala o *início* de uma série de novos desenvolvimentos de grande importância, não a sua culminância. Aqui, mais uma vez, estamos malservidos pela visão estereotipada da prioridade temporal da pesquisa básica, dessa pesquisa conduzindo a ou *culminando* em um avanço tecnológico. No sentido mais significativo possível, o desenvolvimento do transistor, ou a explosão do primeiro artefato nuclear, ou o primeiro vôo de um aparelho mais pesado que o ar, constituem realmente o anúncio de um novo conjunto de possibilidades muito mais do que sua realização. De fato, é tentador *definir*

²⁶ Kranzberg e Smith, “Materials in History and Science”, p.25.

POR DENTRO DA CAIXA-PRETA

uma inovação principal como aquela que proporciona uma estrutura inteiramente nova para os melhoramentos tecnológicos. Essa estrutura vai freqüentemente moldar, durante décadas, a pesquisa subsequente – exatamente como agora nos encontramos por mais de trinta anos dentro da revolução do transistor, e somente as mais falidas imaginações poderiam sugerir que estamos perto de exaurir suas possibilidades tecnológicas. O sucesso comercial no interior dessa nova estrutura requer numerosas invenções complementares e o desenvolvimento de tecnologias auxiliares, e essas exigências também proporcionam numerosos pontos de interesse para a pesquisa científica. Assim, uma grande quantidade de pesquisas científicas tende a ser empreendida com a intenção consciente de proporcionar ao conhecimento acréscimos percebidos como essenciais para a exploração da nova tecnologia.²⁷

Uma outra razão pela qual os avanços do conhecimento científico ocorrem normalmente depois de substanciais melhoramentos tecnológicos tem a ver com as mudanças na estrutura dos incentivos econômicos. Um material de preço alto tem boa probabilidade, *ceteris paribus*, de gerar um pequeno número de aplicações industriais, e despertará, portanto, apenas um interesse limitado – pelo menos na ausência de alguma vantagem atraente em seu desempenho. Por outro lado, à medida que um material se torna mais barato em consequência de melhoramentos tecnológicos, ele passa a ser mais amplamente usado, e seu preço mais baixo faz com que passe a ser considerado mais seriamente para outros novos usos potenciais. Assim, as grandes inovações na produção de aço, durante os anos 1850 e seguintes, geraram poderosos incentivos para a realização de extensas pesquisas sobre isso. O baixo preço do aço pós-Bessemer tornou possível empregar o metal com uma grande variedade de propósitos es-

27 Como observou Harvey Brooks em uma discussão sobre o campo da física nos anos seguintes à Segunda Guerra Mundial: "A ciência básica era motivada pela necessidade de gerar tecnologia auxiliar para alimentar o desenvolvimento e a exploração de uma invenção inicial, e não o contrário". *Science*, 26 Abril 1968, p.399.

truturais que não eram, anteriormente, economicamente viáveis. Mas, então, tornou-se extremamente importante entender coisas como a notória variabilidade do metal, assim como suas características precisas de desempenho quando submetido a uma vasta gama de novas trações, tensões e pressões em aplicações inteiramente novas. Assim, a viabilidade de empregar aço em larga escala, *após* as inovações que levaram a seu preço mais baixo e a sua maior oferta, ensejou numerosos testes e pesquisas por parte de novas classes de usuários, assim como por parte dos próprios fabricantes de aço. A possibilidade de fabricar trilhos e outros equipamentos ferroviários com aço levou à criação de um dos primeiros laboratórios de pesquisa da indústria norte-americana – o laboratório da Pennsylvania Railroad, estabelecido em 1879 em Altoona. Aqui, novamente, existem críticas linhas de causação estendendo-se dos domínios da economia e da tecnologia de volta para os canais da pesquisa científica.²⁸

Finalmente, e em estreita relação com isso, os avanços tecnológicos servem para validar a possibilidade de certas classes de fenômenos e, portanto, também para elevar a probabilidade de realizar pesquisas de valor científico, bem como tecnológico, em algum ponto particular do mapa da ciência. É apropriado recordar aqui a categórica negativa do grande Rutherford sobre a possibilidade de liberar a energia do núcleo do átomo no início dos anos 1930, bem como a negativa de Lord Rayleigh sobre a possibilidade do vôo do mais-pesado-que-o-ar, seis ou sete anos antes que os irmãos Wright se lançassem ao ar – ainda que por pouco tempo – em Kitty Hawk. As façanhas da tecnologia exprimem de forma poderosamente dramática as conseqüências cientificamente interessantes e também os benefícios puramente financeiros que podem derivar da pesquisa em áreas específicas, freqüentemente através da demonstração empírica da falsidade da sabedoria científica tradicional.

²⁸ Para detalhes sobre o trabalho realizado no laboratório da Pennsylvania Railroad em Altoona, ver *The Life and Life Work of Charles Benjamin Dudley, Ph.D.* (American Society for Testing Materials, Philadelphia, 1911).

VII

Existe um outro modo fundamental pelo qual a tecnologia molda os empreendimentos científicos, e que aqui posso apenas mencionar, pois constitui, por si só, um assunto extremamente vasto. Refiro-me ao desenvolvimento das técnicas de observação, de testes e medidas – em resumo, de instrumentação. Os aperfeiçoamentos da instrumentação, por meio de seus efeitos diferenciais sobre as possibilidades de observação e medida em subáreas específicas da ciência, têm sido há muito tempo um importante determinante do progresso científico. A documentação completa dessa afirmação seria equivalente a uma detalhada discussão da história da ciência ao longo dos últimos quatrocentos anos, e esse assunto está muito além de minha competência. Assim, deixem-me apenas fazer algumas poucas observações.

Seria fácil mostrar, com base na longa história do microscópio (e, mais tarde, do microscópio eletrônico), do telescópio (e, mais tarde, do radiotelescópio), e das histórias recentes da cristalografia com raio X, a ultracentrífuga, o ciclotron, as várias espectroscopias, a cromatografia e o computador, como as possibilidades da instrumentação repartiram de forma seletiva as oportunidades, de maneiras que afetaram universalmente os ritmos do progresso científico. Contudo, levar a discussão somente até esse nível constituiria uma espécie um tanto rudimentar de determinismo tecnológico. Eu sugeriria, em primeiro lugar, que as relações entre a tecnologia e a ciência são muito mais interativas (e dialéticas) do que um determinismo assim implicaria. Isso porque a decisão de investir com firmeza no aperfeiçoamento de uma classe específica de instrumentos será com frequência o reflexo, *inter alia*, de uma determinação de fazer avançar um campo particular da ciência, bem como de uma expectativa de que a instrumentação relevante esteja amadurecida para esse aperfeiçoamento. Além do mais, as tecnologias de instrumentação diferem enormemente quanto à extensão de seu impacto *científico*. O acelerador linear e a ultracentrífuga são relevantes, cada um, para uma porção mais es-

treita do espectro da ciência do que, digamos, o computador. O computador, em contraste, é um instrumento de pesquisa de uso geral. Ele teve um impacto difuso sobre um grande número de disciplinas, incluindo as ciências sociais da mesma forma que as ciências físicas. Assim, instrumentos distintos podem diferir enormemente em seus impactos sobre os campos da ciência. Portanto, qualquer tentativa de estabelecer ligações muito fortes entre progressos em subáreas específicas da ciência e uma área de instrumentação associada está fadada ao insucesso.

Finalmente, não pode ser excessivamente enfatizado que os melhoramentos das capacidades de observação tiveram, por si sós, significado limitado, até que fossem desenvolvidos conceitos e formuladas hipóteses que atribuíssem um significado potencial às observações. Afinal de contas, o microscópio havia existido por mais de duzentos anos, e muitas gerações de observadores curiosos haviam olhado para as estranhas pequenas bactérias antes que Pasteur finalmente formulasse uma teoria de germes para as doenças, em meados do século XIX. Depois disso, o microscópio tornou-se muito mais significativo para o progresso científico do que jamais havia sido no passado.

VIII

Em conclusão, deixem-me oferecer uma reafirmação dos temas que estive tentando desenvolver. A ciência vem sendo moldada, direcionada e constringida por poderosos estímulos econômicos. Esses estímulos têm suas raízes em dois fatos: o primeiro, que a pesquisa científica é uma atividade dispendiosa; o segundo, que ela pode ser direcionada de maneiras que podem gerar grandes retribuições econômicas. As sociedades industrializadas criaram um vasto domínio tecnológico muito estreitamente moldado por necessidades e incentivos econômicos. Esse domínio tecnológico, por seu turno, proporciona numerosos meios pelos quais a vida cotidiana se tornou extre-

POR DENTRO DA CAIXA-PRETA

mamente ligada à ciência. Esse domínio define as direções que prometem grandes retornos financeiros e fornece muitos problemas e observações empíricas que estimulam o pensamento científico criativo. Essas afirmações são apoiadas pela crescente institucionalização da pesquisa em laboratórios industriais privados. É lícito admitir que as decisões de recorrer à ciência estão sujeitas, em tais firmas de fins lucrativos, a um cálculo de seus custos e benefícios privados.

Se essas coisas são assim, os economistas podem ser culpados de excesso de humildade por tratar a ciência como uma força exógena que não pode ser submetida à análise econômica. Os fatores que discutimos aumentaram as formas e a extensão com que o progresso científico está sendo modelado por considerações tecnológicas e, portanto, econômicas. Acredito que o processo de industrialização inevitavelmente transforma a ciência numa atividade cada vez mais endógena, ao aumentar sua dependência com relação à tecnologia. As considerações tecnológicas, segundo argumentei, constituem um importante determinante da alocação de recursos científicos. Sugiro, assim, que um modelo promissor para a compreensão dos avanços científicos será um modelo que combine a “lógica” do progresso científico com alguma consideração dos custos e recompensas que derivam da vida cotidiana e que estão ligados à ciência por intermédio da tecnologia.