



**CBPF - CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS**  
**Rio de Janeiro**

**Ciência e Sociedade**

**CBPF-CS-013/11**

**setembro 2011**

**DIÁLOGO CIÊNCIA - TECNOLOGIA**

Alfredo Marques



## DIÁLOGO CIÊNCIA – TECNOLOGIA\*

Alfredo Marques

### **Apresentação**

Sob a pressão da escassez das fontes de água e de alimento, das necessidades de defesa e de abrigo, a organização tribal da vida primitiva se impôs à de misantropo errante, predador e presa de outros viventes, que caracterizou o ser humano dos primeiros tempos. A criação de uma linguagem para comunicação, sua materialização em símbolos escritos, a produção de armas, o fogo, a montagem de calendários a partir de regularidades astronômicas, a organização de plantio e colheita em consonância com o ciclo aluvial de fertilidade dos rios, enfim, toda uma série de notáveis feitos, são formas primitivas de ciência e de tecnologia. Diligente na descrição de feitos notáveis como a edificação de templos, monumentos, silos para armazenagem de alimentos etc., pressupondo sólidos conhecimentos na técnica da construção, de seus materiais, etc. a arqueologia remete a alguns milênios antes da era cristã a data dos remanescentes desses feitos. As ruínas dos Jardins Suspensos da Babilônia, do Farol de Alexandria e tantos outros que resistiram à fúria destruidora do tempo, são espetaculares testemunhos ainda vivos da competência tecnológica da ancestralidade. Não há informação sobre eventuais diferenciações na criação e aplicação de conhecimentos, quer a partir dos meios usados quer das peculiaridades de seus praticantes: ciência e tecnologia aparecem como um só bloco de atividades e comportamentos, na leitura possível dos feitos arqueológicos.

Assim, ciência e tecnologia são instituições enraizadas na existência humana desde eras mais remotas. As informações disponíveis indicam, mesmo nas épocas mais recuadas, a presença de uma forma rudimentar de sociedade, contratante e beneficiária dos frutos dessas atividades. Não obstante o vínculo social, ciência e tecnologia sempre dispuseram de mecanismos autônomos de desenvolvimento que obedecem a uma lógica própria; entretanto, o intercâmbio entre elas aparece alterado, não raro, aqui e ali, pela ação de influências externas. Uma apreciação satisfatória das relações ciência-tecnologia só pode ser feita na perspectiva histórica, buscando em diferentes momentos os elementos que as condicionaram, as formas que assumiram, suas influências mútuas e o aproveitamento social de seus produtos. Trata-se obviamente de uma tarefa cujo porte não cabe neste artigo, tanto pela complexidade quanto pelas limitações do autor.

Os métodos de atuação de cientistas e tecnólogos mudaram muito ao longo dos séculos, acompanhando a acumulação de conhecimentos bem como o aprimoramento das formas de sustentação financeira de suas vidas e de suporte a seus laboratórios. Pode-se dizer que apenas ao longo do século XIX, quando os meios de sustentação atingiram formas mais avançadas, emancipadas das variantes autocráticas de controle, as regras do diálogo ciência-tecnologia se tornaram mais despersonalizadas. *J.D. Bernal* valeu-se dessa circunstância para fazer uma análise minuciosa do tema, o melhor, talvez, que se pode dizer desse período<sup>1</sup>. No texto, seleciona alguns tópicos de maior impacto da ciência e tecnologia

---

\* A aparecer no volume *Ciência e Tecnologia: Um Diálogo Permanente* da Academia Paraense de Ciências, São Paulo Maluhy.

<sup>1</sup> *J. D. Bernal – Ciencia y industria en el siglo XIX*, Martinez Roca, Barcelona 1973, traduzido do original da editora Rutledge and Keagan, Londres, 1973.

daquele século – Calor e Energia; Fermentos e Micróbios; a Era do Aço; Luz e Força Elétrica – e analisa cuidadosa e detalhadamente as várias formas que tomou o diálogo ciência-tecnologia, os fatores que estimularam e os que obstaram seu desenvolvimento, terminando com um capítulo conclusivo que, pela riqueza de considerações, não cabe aqui sintetizar.

O texto aqui apresentado pretende tratar apenas de alguns episódios mais recentes, tentando o mesmo método, mas obviamente sem a riqueza do que se poderia esperar de uma atualização do texto de *Bernal*. Apesar de incompletos e eventualmente afetados pelo viés dos poucos casos selecionados os eventos aqui discutidos podem ser úteis para esclarecer o diálogo ciência-tecnologia dos tempos atuais. A intercorrência de fatores exteriores aos processos da ciência e da tecnologia é abordada sempre que o crédito sobre sua influência pareça inquestionável.

Aqui, apenas para colocar limites na linguagem, se entenderá como diálogo ciência-tecnologia o intercâmbio de ideias e procedimentos, entre pessoas e organizações, destinado à criação de conhecimentos e produtos de ciência básica e aplicada (habitualmente englobados no termo ‘tecnologia’) e sua transformação para distribuição como bem social. As organizações diretamente ligadas ao diálogo são as unidades de pesquisas científicas e tecnológicas nas empresas ou no governo, universidades e institutos especializados; a interface com o meio social é feita ordinariamente pela empresa industrial. Participam também do diálogo organizações complementares: bibliotecas, revistas especializadas, unidades formadoras de recursos humanos, inclusive em nível médio, fundações de apoio, etc.

### **Ciência-Tecnologia na era da Fotografia**

Uma técnica importante por suas repercussões na ciência e pelo alcance que teve fora dela é a fotografia. Sua descoberta não se articulou em qualquer técnica ou conhecimento científico consolidado anteriormente e talvez por isso não tenha sido considerada na obra de *Bernal*. Começou com cópias do tipo heliográfico, iniciativa de *Nicephore Niépce*, considerado autor da primeira fotografia da história após 8,2 horas de exposição. *Niépce* atraiu a curiosidade de um pintor de murais para cenários teatrais, *Louis Jacques Mandé Daguerre* (1789-1851), que, após a morte de *Niépce*, resolveu jogar com o escurecimento de sais de prata provocados pela luz: espalhou iodeto de prata numa superfície metálica e “revelou”, após exposição a um motivo iluminado, vaporizando mercúrio sobre a superfície. A remoção da prata não ativada (fixação) foi feita com um banho em solução de sal de cozinha. A figura obtida tomou o nome de *daguerreotipo*. A técnica evoluiu rapidamente pela inserção de um substrato viscoso e transparente (primeiro albumina sobre a placa metálica, depois o colódio úmido), pela química do processamento (primeiro usando o tiosulfato de sódio na fixação, depois aperfeiçoando progressivamente a revelação), pela cópia em papel fotográfico e pelo aperfeiçoamento da câmara fotográfica. Aqui importa observar que três anos antes do sucesso de *Daguerre*, *Hercules Florence*, em Campinas, SP, deixou anotações demonstrando que obtivera fotografias com os mesmos princípios do *daguerreotipo* e que cunhou o termo “fotografia” antes do astrônomo *William Herschel*, reputado como seu introdutor. Em meados do século XIX descobriu-se que a inserção de corantes adequados estendia a sensibilidade dos grãos de prata à luz na faixa do vermelho, dando ensejo à exibição de alguma cor. É curioso observar que essas tarefas, mergulhadas em sólido empirismo, atraíram a atenção de ninguém menos que *James Clerk Maxwell* que ganhou reputação na área pela produção de uma das primeiras, senão a

primeira, fotografia em cores baseada nesses princípios. A fotografia pancromática só veio a ser introduzida mais de cinquenta anos depois, em 1931. O desenvolvimento da técnica foi vertiginoso após o sucesso do daguerreotipo. Levantou o interesse de firmas que se formaram e especializaram no ramo, como a Eastman Kodak, a Agfa-Gevaert e a Compagnie Générale des Établissements des Frères Pathé, formada após a compra da patente dos irmãos *Lumière*, especializando-se na fotografia em movimento ou cinema. A partir da atividade dessas empresas a sensibilidade do material fotográfico se aperfeiçoou, ensejando exposições mais curtas, o processamento químico eliminou falhas e manchas, a cópia em papel fotográfico se popularizou, tudo com velocidade vertiginosa. Para dizer o mínimo, decorridos apenas dois anos da descoberta de *Röntgen*, já a Agfa-Gevaert colocava na praça placas sensíveis a raios X para uso médico. Paralelamente o *status* social dos pesquisadores que trabalhavam no desenvolvimento da técnica nesses primeiros anos mudou radicalmente: os pioneiros, como *Daguerre*, *Niépce* e outros, para os quais a fotografia era o encanto, mas não o sustento de suas vidas, foram substituídos por assalariados das firmas que acreditaram no potencial econômico daquele produto e nele decidiram investir. Certamente a medida aumentou a eficiência do trabalho, mas as necessidades de um maior controle das variáveis, ainda fixadas empiricamente, convocaram a ciência a entrar no diálogo. Foi quando, em 1938, *R.W. Gurney e N.F. Mott* publicaram o trabalho seminal sobre a teoria da formação da imagem latente em sais de prata, base da compreensão de todo o processo fotográfico. A intervenção da ciência básica não ficou nisso; durante a guerra a necessidade de localização de alvos em voos exploratórios noturnos, por motivos de segurança, motivou a convocação de um grupo de físicos e físico-químicos para estender a sensibilidade dos filmes fotográficos até o infravermelho. O sucesso do grupo foi completo, produzindo emulsões fotográficas com grãos diminutos de halogeneto de prata, viabilizando o aumento de sua concentração e maior sensibilidade. *C. F. Powell*, que fizera parte do grupo, levou as novas emulsões para Bristol e com elas, em 1947, era descoberto o méson-pi com a destacada atuação de *César Lattes*. Esta fase do desenvolvimento da fotografia ilustra bem uma das importantes conclusões de *Bernal*: “Em qualquer época onde exista um número suficiente de pessoas trabalhando num campo determinado e em clima de otimismo, as ideias e suas aplicações afluem e se sucedem com rapidez, produzindo-se uma espécie de reação em cadeia. Pelo contrário, se os esforços em um campo qualquer não apresentam um bom nível, se os homens trabalham isolados ou estão superespecializados, a erudição ou pedantismo estéril assumem as iniciativas e paralisam o curso das descobertas”.

A fotografia deu frutos notáveis dentro da ciência pura e aplicada: a radiografia de *Röntgen* foi estendida a tecidos mais transparentes, tornando-se instrumento indispensável na medicina; ressaltou-se a inovação do dr. *Manuel de Abreu* que tantos serviços prestou para o controle e erradicação da tuberculose no Brasil em sua primeira fase. No campo das partículas elementares o método fotográfico notabilizou-se, primeiro com a fotografia em câmara de Wilson, depois com as emulsões nucleares, e mais tarde nas câmaras de bolhas, revelando o mundo fascinante das partículas subnucleares. Nas mãos dos hábeis espectroscopistas do início do século, além de dar resposta à indagação sobre a abundância química dos elementos, deu as séries espectroscópicas que desempenharam papel decisivo na confirmação de resultados da nascente mecânica quântica, abrindo um mundo novo no domínio da realidade observável. Finalmente, o desvio para o vermelho das linhas observadas nos espetros fotografados de galáxias distantes deu curso à ideia de *Hubble* de expansão do universo, marco fundamental da moderna cosmologia. Levando em

consideração que a fotografia serviu de inspiração e modelo para o transporte da imagem sobre ondas eletromagnéticas, telefoto, TV e suas variantes digitalizadas, pode-se concluir sem exagero que dentre os produtos do engenho humano o método fotográfico é de longe o mais grandioso, pela profundidade e abrangência de suas conseqüências. Fruto da fantasia lúdica de um punhado de sonhadores, é uma singular ribalta para o desenrolar do diálogo ciência-tecnologia junto com os fatores socioeconômicos que os condicionaram: aí se vê com toda a clareza a alternância dos interlocutores e o papel que desempenharam no curso dos eventos.

### **Miniaturização de Circuitos Eletrônicos**

O segundo tema aqui escolhido é o do diálogo ciência-tecnologia no processo de miniaturização dos circuitos eletrônicos, os chamados circuitos integrados e suas fantásticas conseqüências econômico-sociais. Trata-se de compactar circuitos eletrônicos em domínios de dimensões mínimas, garantindo baixo peso, mínimo consumo de energia elétrica, ganhos em rapidez e confiabilidade nas operações a que se destinam. O transistor de junção, criado em 1949, despertou o sonho da integração em unidades compactas, mas para atingir viabilidade precisou esperar até 1958, pelo anúncio de protótipos concretos de circuitos integrados, primeiramente em germânio, logo após em silício como substrato básico. A criação do transistor de junção é, assim, o marco de transição no processo de miniaturização de dispositivos eletrônicos. Sua concepção original passa pelo conhecimento da teoria do transporte de cargas elétricas em semicondutores dopados e pela fabricação de junções semicondutoras. Sua integração em microcircuitos foi reclamada pelas carências dos tubos termiônicos usados em circuitos eletrônicos diversos, acelerada por duas guerras de dimensões mundiais e pela ‘guerra fria’ que as substituiu. A substituição da válvula termiônica pelo transistor em circuitos eletrônicos passou-lhe um extenso legado de notáveis aplicações: a válvula termiônica deu nascimento a praticamente todos os circuitos eletrônicos conhecidos até a era da integração, inclusive muitos daqueles necessários aos computadores.

A válvula termiônica nasceu com a introdução de um terceiro eletrodo no diodo a vácuo, por *Lee de Forest*, em 1907, que no mesmo ano fez uma tentativa de transmissão de música pelo rádio, em Nova Iorque. Fez também, no ano seguinte, uma transmissão da Torre Eiffel, captada em Bruxelas. Nesse particular foi precedido de muitos anos pelo brasileiro *Roberto Landell de Moura* (1821 -1928) que já em 1893 patenteara instrumentos para a transmissão e recepção de voz através de ondas eletromagnéticas, e fez no Brasil, entre 1901 e 1904, demonstrações práticas em pequenas, mas significativas distâncias. Essas demonstrações, entretanto, foram recebidas com incredulidade e pessimismo. A descoberta das ondas eletromagnéticas por *Hertz* em fins do século XIX abriu expectativas novas nos meios empresariais para as comunicações à distância, limitadas ao telégrafo e ao cabo submarino, através do código Morse. A transmissão da voz em cabo condutor dependia de potentes baterias, capazes de mobilizar energia elétrica suficiente para compensar as perdas, principal entrave ao alcance do aparelho de *Graham Bell*. Além de dispensar os gastos com cabos, postes, baterias, etc., o uso das ondas hertzianas ensejava a conexão com qualquer cidade, não apenas aquelas ao longo das linhas, assim aumentando grandemente a eficiência da comunicação. A criação do chamado telégrafo sem fio por *Marconi* em 1897 ensejou maior alcance e economia, mas continuou com as limitações do código Morse, dependendo de especialistas intermediários antes de passar as mensagens ao

público alvo. Foi na linha das aplicações do triodo termiônico que o desenvolvimento das telecomunicações se fez: os dispositivos de *Landell de Moura*, talvez porque incorporassem múltiplos componentes com complicados atributos especiais, não competiram com a simplicidade de construção do triodo de *Lee de Forest*. O desenvolvimento de circuitos eletrônicos com válvulas triodo teve duas vertentes até chegar a seu patamar mais elevado, com o computador. A primeira, distante de qualquer aplicação rentável, vinculou-se às pesquisas abertas pela descoberta da radioatividade natural e da radiação cósmica. O tubo termiônico foi adotado para satisfazer as demandas de processamento de sinais elétricos produzidos por câmaras de ionização, detectores proporcionais e Geiger. A segunda vertente manifestou-se nas necessidades de comunicação da área militar, trazidas pela iminência da 1ª guerra e aumentadas ao longo dela. Os esforços de guerra estimularam a criação de osciladores à reação e de relaxação a partir de triodos, inspirando finalmente a fundação de empresas cuja atuação levou ao rádio comercial. Na década de 1930 os circuitos eletrônicos necessários à radiocomunicação comercial ficaram disponíveis com virtualmente a mesma técnica hoje praticada, ressalvada a transmissão em frequência modulada que apareceu apenas após a 2ª guerra. O êxito na transmissão à distância do som e da voz alimentou expectativas de transmissão da imagem, que, entretanto, precisou esperar pelo aperfeiçoamento do transdutor fotoelétrico. Em 1927 *P. Farnsworth* montou o primeiro sistema de televisão inteiramente eletrônico, da emissão à recepção. Em 1936 *Manfred Von Ardenne* transmitiu cenas da Olimpíada de Munique em rede para vários países europeus, marcando assim a conquista do processo de transmissão da imagem à distância. Com esse legado de importantes realizações, a válvula termiônica recebeu novas demandas na 2ª guerra, como o radar, colocando em cheque suas fraquezas: grande consumo de energia elétrica; excessivo peso e volume ocupado; fragilidade contra vibrações e choque; longo tempo de preaquecimento; necessidade de dissipar calor para fora dos tubos para manter a temperatura dentro de limites operacionais toleráveis. Essas demandas foram parcialmente respondidas com a criação de tubos com muitos eletrodos, capazes de acumular múltiplas funções, que propiciaram a redução do espaço ocupado e aliviaram as demandas de dissipação térmica, mas foram insuficientes para atender a todos os questionamentos. Com carências ainda pendentes, o final da segunda guerra trouxe para a válvula eletrônica uma grandiosa aplicação: o computador. Grandes empresas, como a IBM, a Burroughs, a Remington, fabricantes de equipamentos eletromecânicos para processamento de dados comerciais e financeiros, se organizaram para desenvolver computadores, inspirados nos exemplos deixados pelo Colossus inglês, criado no desfecho do processo de decodificar as mensagens produzidas pela máquina Enigma dos alemães e do ENIAC que processou os dados nucleares ligados com as bombas atômicas. A indústria de computadores com válvulas termiônicas cresceu, a despeito das dificuldades apontadas, até os anos 1970, quando os circuitos integrados com escala suficiente de integração começaram a ficar viáveis. Entretanto não foi o fortalecimento dessa importante indústria que catalisou os avanços da técnica de compactar circuitos em sanduíches de semicondutores dopados, mas as necessidades de competição da guerra fria. Na guerra fria as nações líderes do mundo, os EUA e a URSS, mobilizavam recursos naturais próprios e de suas zonas de influência, ao lado de abundantes fundos financeiros para conquistar metas científico-tecnológicas de reconhecida significação. O *status* tecnológico passava a representar uma forma potencial de dominação. Em 1961 a corrida nuclear chegava a um sinistro desfecho com o anúncio de *Andrei Sakharov* de um engenho termonuclear de concepção modular, com 100 Megatons em cada módulo, sem limitação para o número de

módulos. A explosão de um único desses módulos, testado em 1961 com 50 Megatons, jogou mais poluentes radioativos na atmosfera que toda corrida nuclear até então. O episódio inaugurou uma temporada de entendimentos para limitar, primeiro os testes de novos engenhos e, numa segunda etapa, os estoques nucleares, temporada que ainda continua. A corrida se transferiu para domínios aeroespaciais, onde a URSS firmara também posição de vantagem. Os EUA centralizaram abundantes recursos financeiros numa única agência espacial, a NASA, criada em 1958, e partiram para neutralizar a vantagem soviética. Concluíram que para isto precisavam enfrentar a excepcional impulsão dos combustíveis soviéticos para propulsão de mísseis lançadores de satélites, e que um modo de consegui-lo seria pela redução do peso em equipamento eletrônico embarcado, todo ele construído com as eficientes, mas pesadas válvulas termiônicas. Isto importaria na integração de circuitos eletrônicos em substratos delgados de sanduiches de semicondutores dopados, com peso e dimensões microscópicos, baixo consumo de energia e confiabilidade de operação, como fora anunciado em 1958. A NASA contratou com a *Texas Instruments* a produção de *chips* de circuitos integrados para substituir a eletrônica embarcada em satélites; os *chips* se tornaram disponíveis entre 1960 e 1963. Muitos problemas ligados à escala de integração precisaram ser resolvidos antes que pudessem ser usados em computadores, o que ocorreu apenas na década seguinte. A URSS, acomodada na superioridade de seu combustível, continuou com os tubos termiônicos, mas perdeu posição na fabricação de circuitos integrados. Hoje há poucos produtores de circuitos integrados para unidades centrais de processamento de computadores com elevada escala de integração, todos americanos.

A principal razão para abordar o tema da miniaturização de circuitos eletrônicos é que ele permite apreciar o diálogo ciência-tecnologia em dois períodos radicalmente distintos: o que vai do início do século XX até o fim da 2ª guerra e o que vai do final da 2ª guerra em diante. O primeiro período reproduz características semelhantes às do século XIX: a expectativa do valor econômico de um invento pré-existente auspícia a criação de tecnologias e daí à formação de empresas que investem na fabricação do invento; eventualmente outros domínios científicos e técnicas aparecem na esteira desses eventos, ramificando novas cadeias de produtos e conceitos. Assim, o invento do triodo termiônico e sua capacidade de uso na transmissão do som à distância por ondas eletromagnéticas chamaram atenção das empresas ocupadas em comunicação pelo telégrafo. Tal evento encontrou nas necessidades militares de comunicação da 1ª guerra coadjuvante de peso para estabelecer os circuitos eletrônicos adequados à radiocomunicação. Limitado numa primeira fase ao transporte de voz em distâncias curtas ou médias, características da atividade militar, seu êxito levou à criação de novos empreendimentos estudando a radiocomunicação e atuando no ramo da produção de válvulas termiônicas, na RCA-Victor, na Philco, na General Electric, na Phillips e muitos outros aparecendo ao longo dos anos 1920, tudo culminando no rádio comercial. Paralelamente, físicos e químicos, interessados em aprofundar os conhecimentos sobre a radioatividade natural, viram no triodo termiônico uma possibilidade de amplificar os fracos sinais produzidos pelas então misteriosas radiações em detectores como as câmaras de ionização. Substituíram o preciso, mas delicado, eletrômetro piezoelétrico do casal *Curie* por um estágio amplificador intermediário, um simples triodo de *Lee de Forest* capaz de elevar o nível do sinal até valores tratáveis com instrumentos mais simples, agilizando o trabalho na faixa das substâncias com vida mais curta. Importa mencionar que a descoberta do nêutron no início dos anos 1930 usou um tubo termiônico na saída de uma câmara de ionização para

processar os sinais. Outra radiação misteriosa que apareceu mais ou menos à mesma época da radioatividade natural – a radiação cósmica – também ganhou com a introdução do triodo: substituiu por válvulas termiônicas os eletroscópios de folhas usados como indicadores da descarga de tubos Geiger que demandavam atenção visual permanente; usando válvulas passaram a ativar um contador eletromecânico, agilizando a tomada de dados. Destaque-se aqui a criação do método de coincidências por *Walther Bothe* e o salto de qualidade que teve com a criação do circuito eletrônico de coincidências de *Bruno Rossi*, em 1930, que ensejou a câmara de Wilson com disparo automático e daí a descoberta do elétron positivo e das partículas *V*. Note-se que aqui se trata de nomes ligados à ciência fundamental apresentando soluções tecnológicas que repercutiram imediatamente em resultados científicos significativos. Esses pesquisadores, bem como seus colegas da radioatividade natural, projetavam e operavam os circuitos eletrônicos de que careciam e raramente dispunham de recursos para contratar técnicos. A ciência básica retornou para a tecnologia os benefícios colhidos com a válvula termiônica: contribuiu com os cristais piezelétricos de *Pierre Curie* para os osciladores a reação, indispensáveis tanto na recepção quanto na transmissão de ondas de rádio.

Do final da 2ª guerra em diante, o diálogo ciência-tecnologia sofre uma mudança radical, marcada pela institucionalização da pesquisa científico-tecnológica dentro da empresa industrial. No primeiro período o empreendimento industrial se formava a partir de um invento preexistente. Passava a produzi-lo comercialmente e eventualmente patrocinar aperfeiçoamentos e inovações, empregando cientistas e técnicos ou os subvencionando em seus locais de trabalho, como uma espécie de ‘olheiro’ atento do processo. No segundo período a empresa dispensa o invento preexistente. Em lugar disso o concebe e busca produzi-lo em sofisticados departamentos de pesquisas que cria, reunindo cientistas, engenheiros e técnicos. O transistor de junção foi descoberto na Bell Telephone por pesquisadores assalariados do mais alto nível, contando com generosos recursos para laboratórios e instrumentos de última geração. A ideia da empresa de alta tecnologia do pós-guerra é reproduzir os méritos do projeto Manhattan que reuniu cientistas, engenheiros e técnicos com recursos virtualmente ilimitados para criar um engenho de alta letalidade a partir de uma simples especulação: a de que seria possível uma reação em cadeia de fissões induzidas por nêutrons. Foi o que fizeram a Bell e muitas outras. A concessão do prêmio Nobel pela descoberta do transistor alinhou os nomes de *J. Bardeen* e *W. Brattain* ao de *W. Shockley*, tornando clara a união entre cientistas voltados aos aspectos mais fundamentais dos semicondutores aos de enfoque mais aplicado. A etapa de incorporação do transistor em circuitos integrados foi marcada pela mesma característica, ensejando uma grande multiplicação de empreendimentos conhecida como Vale do Silício. O processo não erradicou, entretanto, as pesquisas em universidades nas quais a grande empresa de alta tecnologia continuou interessada, financiando inclusive algumas iniciativas judiciosamente escolhidas. A despeito de sua ampla dominação do processo científico-tecnológico, oferecendo bons contratos de trabalho, definindo os domínios de interesse, linhas de atividade, instrumentos de pesquisas, subvencionando publicações e congressos, etc., a grande empresa acredita que ainda assim algo importante possa escapar a seu planejamento. Assim, em algum lugar fora dela pode surgir uma ideia não contemplada em seus projetos de investigação, entre outros motivos, porque eles acabam refletindo sutil, mas inevitavelmente, a estratégia geral de otimizar lucros e de vencer a competição com empresas congêneres.

### **Diálogo ciência-tecnologia após o Projeto Manhattan**

As explosões atômicas em Hiroxima, e Nagasaki, respectivamente, em 6 e 9 de agosto de 1945, marcaram o final da 2ª guerra, mas, a despeito de constituírem a meta do projeto Manhattan, não foram seu resultado principal. À parte os episódios mencionados, as bombas nucleares nunca foram usadas a não ser em testes de desenvolvimento. Sua utilidade principal se restringiu a operações de chantagem diplomática, ou para justificar invasões como a do Iraque, seguindo a doutrina do ataque preventivo.

O projeto Manhattan foi um empreendimento de dimensões ciclópicas, envolvendo mais de 150000 pessoas entre cientistas, engenheiros e técnicos, distribuídos em três sítios principais com funções específicas, ao lado de organizações acadêmicas como as Universidades de Chicago e da Califórnia e de numerosas empresas de grande porte, como a Dow Chemical, a Union Carbide, a Arthur D. Little. Sua unidade mais crítica foi o complexo de Los Álamos, chefiado por *J.R. Oppenheimer*. Los Álamos ocupou-se dos aspectos mais incertos e arrojados do projeto. O conjunto de todas as unidades foi supervisionado pelo General *Leslie Groves*, pessoa extremamente hábil que soube manter as rédeas do projeto sem maiores colisões com os participantes. Ficou conhecido como responsável pela diretriz geral do projeto: ampla generosidade no financiamento das iniciativas e firme intransigência nos prazos de execução. Queria um engenho pronto para explodir antes do final de 1945, prazo em que os cálculos logísticos mostravam que a guerra terminaria de qualquer modo. Isto deu pouco mais de três anos para desenvolver duas bombas, uma de urânio, outra de plutônio.

Ao tempo em que o projeto Manhattan se instalou (cerca de seis meses antes do reator de *Fermi* entrar em regime crítico) a reação em cadeia com nêutrons de fissão não passava de uma especulação. O reator de *Fermi* entrou em regime crítico em dezembro de 1941, mas ainda deixou larga margem de dúvida para uma reação em cadeia se desenvolver em um material fissil puro, sem a presença de um moderador, de modo a garantir a rápida liberação de energia demandada por um explosivo. A descoberta do plutônio, suas características fisséis favoráveis e a possibilidade de fabricá-lo em reatores de potência, dispensando o custoso e demorado processo de enriquecimento por difusão gasosa, colocou nas mãos do projeto um elemento químico novo, com todas as suas propriedades por determinar. À última hora foi descoberta sua fissão espontânea que obrigou o projeto a criar um detonador totalmente novo, diferente do usado com urânio, para explodir a bomba a plutônio. A história do projeto Manhattan é, de certo modo, um empolgante relato sobre como gerenciar e encontrar soluções para problemas inéditos.

Terminada a guerra, a grande empresa industrial entendeu que adotar postura semelhante não era mais uma incerta aventura. O projeto Manhattan havia mostrado ser possível tudo aquilo que desejava: completo controle sobre o processo de criação de produtos tecnológicos avançados de valor econômico, gerenciando todos os talentos necessários para sua concepção e conformação ao mundo prático. E assim foi feito, adotando as práticas de ação do Projeto Manhattan, inclusive a doutrina *Groves*: recursos materiais abundantes, cobrança implacável de resultados através de variados estratégias.

Muitas empresas adotaram este ideário: convidaram cientistas do maior renome, vários egressos dos quadros do Projeto Manhattan, para organizar departamentos capazes de trabalhar em todos os níveis da criação científico-tecnológica, com recursos para montar e contratar toda infraestrutura material e humana necessária para suas tarefas. Empresas

tradicionais no ramo da telefonia, a Bell, a ATT, a ITT, se lançaram no empreendimento; outras se formaram principalmente no ramo da energia, para se beneficiar dos conhecimentos sobre reatores deixados pelo Projeto e levá-los adiante. Foram seguidas por outras empresas, e em poucos anos o modelo se instalava em praticamente toda a área produtiva de certo porte, da agricultura ao petróleo. As empresas de menor porte também se adequaram, passando a investir firmemente em pesquisa e inovação, aperfeiçoando sua linha se não com produtos originais, com produtos melhores.

Assim aqueles interlocutores do diálogo ciência-tecnologia que no passado tinham convivência mais ou menos autônoma, eventualmente rompida pela polarização criada por uma ideia ou invento promissor, passaram a conviver sistematicamente de forma integrada, como departamento de pesquisas da grande empresa industrial ou de organizações governamentais, universidades e outras constituindo o bloco principal dos agentes da ciência e da tecnologia.

Passados mais de cinquenta anos dessa prática se podem extrair algumas conclusões sobre aspectos novos, ligados à forma que tomou o diálogo ciência-tecnologia. Adiante uma breve palavra a respeito.

ASSALARIADOS – Já houve momentos no passado em que a empresa industrial contratou engenheiros e técnicos para a produção de bens com tecnologia de fronteira. No pós-guerra essa condição deixou de ser ocasional para ser planejada, além de incluir assalariados em todos os níveis, dos mais fundamentais aos mais artesanais. O cientista, o engenheiro, o técnico, passaram a constituir categoria de trabalhadores assalariados, atuando em dependências da empresa industrial, nas universidades ou em institutos subvencionados pelo governo. Essa condição incorpora avanços e preocupações. Contar com um emprego que permita dedicar-se exclusivamente aos propósitos de sua área de investigação, dispondo de laboratórios e instrumentos de primeira qualidade, informação atualizada e ágil, é certamente uma situação superior àquela que prevaleceu em anos anteriores. O pesquisador ao longo da história alternou entre dispor de fortuna pessoal, depender da generosidade de um mecenas a quem retribuía com conselhos e soluções para problemas diversos, ou então ter vida muito sacrificada para acomodar compromissos pessoais à necessidade de custear laboratórios e instrumentos com a remuneração que pudesse auferir de seu trabalho. Sem dúvida a nova forma é indiscutivelmente um avanço sobre quaisquer das alternativas anteriores. O aspecto preocupante é que a remuneração do trabalho – seu emprego – não lhe pertence e pode desaparecer a qualquer momento de acordo com a avaliação de seu desempenho segundo os critérios da empresa, nem sempre bem recebidos. Embora avaliações de desempenho aferidas por valores fora do agrado individual sejam corriqueiras na vida das pessoas, nem sempre a ‘doutrina *Groves*’ é aplicada com sabedoria; as pressões das cobranças têm sido invocadas para justificar desvios éticos absolutamente deploráveis. A prática científica de ratificar resultados apenas após sua confirmação em repetidos experimentos tem detectado grosseiros embustes e falsificações. Poucos casos, como o escandaloso anúncio da fusão fria, que afinal se esclareceu como uma fraude para decidir por um dos lados a competição entre grupos disputando os mesmos recursos financeiros, não se referem à cobrança do desempenho, à qual está aparentemente ligada a maior parte das fraudes. A frequência das fraudes detectadas é preocupante, sugerindo que os critérios ou a intensidade na cobrança possam estar atingindo limites com os quais o ser humano tem dificuldade para lidar. Certamente a competição entre empresas não tem para os pesquisadores do presente o mesmo valor que a

guerra teve para alinhar as vontades dos participantes do Projeto Manhattan com as diretrizes do general *Groves*. Fraudes diversas são também assinaladas no setor acadêmico, aparentemente também por pressões vinculadas à cobrança do desempenho, ampliando a gravidade da situação.

INVENTOS E PATENTES INDIVIDUAIS– O inventor *free lancer* desapareceu do cenário do novo diálogo ciência-tecnologia. Tornou-se dispensável aquele questionador do cotidiano que sobreviveu ao longo de séculos pela venda de engenhosos artefatos, úteis na solução de inúmeros problemas da vida prática, e que, na evolução da organização social, passou a requerer patentes para negociá-las com empresas. Quando a nova empresa contrata seus funcionários ou quando arrisca empreendimentos fora de sua jurisdição, em universidades ou outras organizações, estabelece uma cláusula de propriedade de patentes, podendo no máximo compartilhar direitos com o autor ou autores da novidade. Assim, ainda quando admita que ideias novas possam nascer em contextos fora do alcance de seu planejamento, protege os eventuais produtos do empreendimento com todos os cuidados relativamente às patentes de invenção. O inventor individual perdeu espaço para o técnico assalariado da nova empresa. Resta elucidar se a eliminação do inventor ingênuo, livre para pensar e jogar com objetos para os quais encontra eventual utilidade, priva o sistema de uma qualidade única, que não pode ocorrer senão dentro de condições de total autonomia e liberdade de ação. Não é impossível, mas extremamente improvável, que alguém possa exercitar sua fantasia lúdica – um *Daguerre* no século XXI– com objetos ou ideias que ainda não tenham sido considerados pelas empresas industriais espalhadas pelo planeta, descartados ou aproveitados por elas, isto é, conseguir sobreviver sem ‘reinventar a roda’. Assim, a questão sobre a relevância da liberdade e autonomia na originalidade do invento fica sem resposta pelo esgotamento das situações onde testá-la. De outro lado, a associação de cientistas, engenheiros e técnicos, o propósito e planificação na inovação criativa da nova empresa industrial se mostraram de colossal eficiência: a empresa industrial do pós-guerra colocou ou substituiu na sociedade numerosas e diversificadas utilidades, talvez mais que toda produção de anos anteriores. Assim essa nova forma que dispensa o inventor *free lancer* do diálogo ciência-tecnologia encontra acato no estrondoso êxito que demonstra na produção e renovação de objetos para consumo social.

PARADOXO – O custo elevado e a rápida substituição de produtos por outros ainda mais sofisticados refletem-se negativamente em alguns setores da organização social. Talvez os mais atingidos sejam a educação e a saúde. A taxa de inovação em equipamentos médicos novos, mais eficientes e avançados, porém muito mais caros, impõe pesados ônus financeiros ao sistema de saúde para manter-se em nível alto. Os médicos que se vão integrando ao sistema, informados sobre novos recursos instrumentais ou de laboratório mais eficazes, recusam as versões pretéritas e a pressão pela substituição é irresistível. O mesmo ocorre relativamente a novos fármacos mais eficientes no combate a esta ou àquela enfermidade, mas de custo exorbitante, inacessível ao paciente individual e pesadíssimo ao sistema de saúde. No caso da educação o problema é aparentemente mais grave, pois envolve aspectos que não se corrigem com o mero aporte de recursos financeiros. A formação escolar não consegue acompanhar a demanda por profissionais qualificados para lidar com novos materiais, novas máquinas, novas ferramentas de trabalho, na velocidade em que vão aparecendo. A carência de engenheiros e técnicos capazes de lidar com os novos equipamentos é cobrada aos sistemas de educação em todo o mundo. Na falta de solução para o problema por parte dos órgãos de educação, as empresas industriais se

oferecem para substituí-los, proporcionando treinamento e atualização de conhecimentos para engenheiros e técnicos. Isto tampouco resolve a questão, senão provisoriamente, ficando a solução ancorada a um momento do *status* técnico que a empresa eventualmente domine. Na primeira aquisição de novas máquinas terá de desviar empregados das linhas de produção para os bancos de aprendizagem ou voltar ao mercado em busca de profissionais capazes de utilizá-las. Esse mesmo problema atormenta a educação em diversos países com diferentes níveis de PNB, não importa se tiveram êxito nos sistemas educacionais do passado ou se sempre lutaram com carências, se suas populações são estáveis ou se as têm crescentes; todos os que consomem produtos e procedimentos de alta tecnologia em seu cotidiano enfrentam o mesmo desafio. Uma causa comum pode ser encontrada na ideia de que a posse pelo ser humano de criações técnicas novas estende sua realidade para regiões desconhecidas, transformando-o<sup>2</sup>. Não surpreende, então, que o consumo voraz de produtos tecnológicos com taxa de renovação vertiginosa ao longo de mais de sessenta anos, tenha criado pessoas vivenciando realidades com as quais os sistemas educacionais não são capazes de lidar, uma vez que seus fundamentos se consolidaram em anos pretéritos, quando as transformações eram mais lentas e assimiláveis. Nessas condições o novo diálogo ciência-tecnologia mergulha em desconfortável paradoxo: de um lado cria um mundo fantástico de utilidades que encantam e gratificam a vida das pessoas e de outro ergue a bandeira vermelha do alarme contra sua continuação.

O LABORATÓRIO NACIONAL— Embora os produtos estejam sujeitos a leis de mercado e seus custos fiquem quase sempre dentro de limites controlados pela produção e livre competição industrial, o custo da pesquisa cresceu progressivamente no pós-guerra. A grande empresa não mede despesas quando se trata de financiar o desenvolvimento de um produto novo porque seu êxito lhe garantirá tal vantagem de mercado que é certo o retorno do investimento com vasto lucro. Já as organizações governamentais, universidades e institutos independentes, não contam com essa possibilidade. Normalmente recorrem a fundações de apoio à pesquisa que, não raro, recebem solicitações destinadas a pesquisadores de diferentes organizações trabalhando em assuntos idênticos ou fortemente correlacionados. Embora tais casos sejam usualmente atendidos em nome dos benefícios da competição científica, essa atitude fica difícil de ser sustentada nos domínios mais custosos das pesquisas. A solução foi a criação de laboratórios nacionais; o FERMILAB é o modelo típico. Foi criado em 1967 para acomodar a demanda em pesquisas no campo das partículas elementares com o alto custo em aceleradores, anéis de colisão e instrumentação periférica. Por ocasião do discurso inaugural *R. R. Wilson*, seu primeiro diretor, evocou as façanhas do projeto Manhattan e auspiciou para o FERMILAB igual desempenho na fronteira das pesquisas no campo das partículas elementares. Pouco mais de dez anos depois, deixava a direção do FERMILAB protestando contra a insuficiência de recursos. Foi substituído por *Leon Lederman* em 1979 que ampliou o escopo do laboratório, abrindo-o para a participação de físicos fora dos EUA. Foi seguido nessa orientação, algum tempo depois, pelo CERN, organização europeia fundada em 1954 para garantir a presença do continente europeu nas pesquisas em áreas subnucleares.

O progresso dessas grandes organizações influenciou enormemente nos atributos profissionais dos físicos atuando na área das partículas elementares. A evolução dessa influência acabou refletindo os mesmos problemas que a formação profissional de técnicos

---

<sup>2</sup> *W. Heisenberg*, A ordenação da realidade, com apresentação de Fabio Antonio da Costa e Antonio Augusto Passos Videira, Editora Forense Universitária, Rio, 2009.

para o mercado tradicional de trabalho: forte demanda por crescente especialização. É bom lembrar que a formação de pessoal adquiriu visibilidade no diálogo ciência-tecnologia principalmente após o século XIII, com a criação das universidades por iniciativa da igreja católica. A universidade foi progressivamente se libertando desse vínculo até completa emancipação, tornando-se uma peça da maior importância para a criação e disseminação de conhecimentos bem como para a qualificação de profissionais para usá-los. Os físicos envolvidos em pesquisas num laboratório dedicado às altíssimas energias precisam ter sólidos conhecimentos sobre teoria de partículas elementares, tanto quanto sobre alto vácuo, materiais e instrumentos periféricos de aceleradores, bem como ter capacidade para construir e operar detectores especiais. É importante que todos os membros de um grupo de pesquisas desfrutem de um padrão mínimo para pretender sucesso na preparação, apresentação e execução de um projeto de pesquisas junto a grandes aceleradores. A universidade em geral não dispõe de laboratórios que permitam desenvolver essas qualificações além de certo nível, de modo que para alcançá-las é preciso dispor das facilidades do FERMILAB ou do CERN. A necessidade de estágio *in situ* para o acabamento profissional se tornou de tal modo corriqueira que levou o FERMILAB— inicialmente parte do Departamento de Energia— a ser operado, a partir de 2007, por um consórcio de universidades, explicitando assim, seu papel complementar na educação. O CERN não sofreu mudança explícita de sua inserção, mas na prática tem também forte presença na complementação da formação profissional dos egressos da universidade na área das partículas elementares. Não obstante à fórmula do Laboratório Nacional, os elevados custos das pesquisas já levaram ao abandono de projetos tidos como insuportavelmente onerosos, como, por exemplo, o grande acelerador que os americanos deixaram de construir na década de 1990, para cobrir faixa de energias além da disponível no FERMILAB e, mais recentemente, a suspensão do programa dos voos aeroespaciais tripulados. As pesquisas avançadas de partículas elementares continuaram apenas no anel de colisão do CERN, o LHC, abortada a iniciativa americana. O programa aeroespacial vai continuar apenas com as naves Soyuz com as quais o resgate das pessoas e materiais é mais acidentado e complicado do que a aterrissagem do ônibus espacial, mas seu custo é mais baixo. Vale mencionar que boa parte das pesquisas em astrofísica, sediadas em universidades, depende de informações cujo acesso é feito unicamente por sondas espaciais, por laboratórios sediados em satélites ou pelo telescópio Hubble. Também experimentos que dependem da condição de gravidade zero, só podem ser feitos na Estação Espacial Internacional. Esses empreendimentos estão fora do alcance da maioria dos países, pelo custo e pelo *know-how* envolvido na técnica aeroespacial; o acesso aos dados é franqueado por acordos internacionais. Fora os sucessores da URSS e dos EUA, apenas a China, a Índia, o Japão e o Irã lograram sucesso em programas autônomos de lançamento de satélites orbitais.

Grandes usuários da computação os laboratórios nacionais, CERN e FERMILAB, além das conquistas científicas no campo das partículas elementares e do papel complementar na formação de pessoal qualificado, vem dando importantes contribuições ao diálogo ciência-tecnologia no campo dos computadores. A estrutura do WWW, viabilizando a organização da Internet como rede mundial de computadores com acesso a dados onde quer que estejam, a computação paralela, aumentando a velocidade de cálculo pelo compartilhamento dos dados em diferentes processadores atuados paralelamente, e ultimamente a GRID, sistema que permite usar a capacidade ociosa de grandes

computadores espalhados por diferentes lugares do mundo para o processamento de complexos programas de análise de dados de pesquisas, são contribuições destacadas dos laboratórios nacionais.

**EXPLOÇÃO TÉCNO-CIENTÍFICA**– Como parte do novo diálogo ciência-tecnologia um surto enorme de criações revolucionárias teve curso em diferentes áreas da ciência e da técnica, graças principalmente aos novos recursos instrumentais a que tiveram acesso. Algumas vezes a inovação ocorreu principalmente no campo metodológico, obscurecendo a condição de não haver invento anterior. Na solução metodológica, entretanto, se encontram os característicos de criação original, sem versões pré-existentes, que tipificam o diálogo ciência-tecnologia do pós-guerra. São exemplos a Telefonia Celular, a Máquina Fotográfica Digital e o computador. Ainda que a rede telefônica a cabo preexistisse de muitos anos, a construção de uma rede telefônica totalmente operada sobre ondas eletromagnéticas envolveu soluções sem precedentes. A forma pulsada na transmissão e recepção tanto quanto o trânsito simultâneo de milhões de mensagens num suporte de micro-ondas, sem falar nos microcircuitos especiais que tiveram de ser desenvolvidos para manter as baterias dentro dos limites da portabilidade, testemunham o ineditismo das soluções que viabilizaram a telefonia celular. O mesmo se pode dizer quanto à gravação dos dados da imagem fotográfica como *pixels* em memórias de baixo consumo elétrico. A solução dependeu de um transdutor fotoelétrico novo, essencialmente diferente daqueles das filmadoras do cinema e TV que demandam pesadas baterias elétricas, inovação obtida dentro da rede do novo diálogo. A imagem pode ser transferida para papel por meio de um computador, substituindo a etapa química da revelação. Assim, também neste caso o empreendimento envolve soluções a problemas inéditos que justificam sua inserção como dispensando um invento pré-existente para se concretizar. A introdução da fotografia digital provocou efeito devastador na indústria de filmes e papéis fotográficos: em poucos anos ficou reduzida a dois únicos fabricantes. No que diz respeito aos computadores, as primeiras empresas se lançaram ao projeto de computadores a partir dos modelos pré-existentes do Colossus e do Eniac, isto é, no estilo anterior à 2ª Guerra. Entretanto, desde o início aqueles sistemas foram revisados criativamente, em departamentos de pesquisas envolvendo profissionais de todos os níveis incluindo matemáticos. Com o aparecimento dos circuitos integrados com escala de integração suficiente, na década de 1970, os desenvolvimentos tornaram-se completamente independentes da herança anterior, enquadrando a iniciativa no critério de autonomia quanto a modelos pré-existentes.

A despeito da revolução trazida aos hábitos das pessoas, nem o telefone celular nem a câmara fotográfica digital ou o computador causaram tamanho impacto cultural como os que ocorreram em decorrência de inovações na área aeroespacial e em áreas da biologia e da medicina da reprodução. O primeiro satélite orbitou a Lua em 1957, seguido de um voo tripulado em órbita terrestre em 1961 e, em 1969, o homem desceu na Lua. O espaço exterior vem sendo desde então minuciosamente pesquisado por intermédio de estações espaciais, laboratórios de observação em satélites, sondas espaciais e pelo telescópio Hubble. Em áreas biológicas e da medicina os sucessos não foram menores: a revelação da dupla hélice do ADN em 1953, o primeiro transplante de coração por *Christian Barnard* em 1967, o bebê de proveta em 1987, a ovelha Dolly em 1996, a identificação e sequenciamento dos genes no cromossoma humano, conhecida como projeto Genoma Humano, consolidada nos primeiros anos do século XXI, são destaques da lista. Talvez se possa acrescentar, no mesmo nível de impacto, a suspensão magnética propiciada pela

supercondutividade, que deu vida ao trem bala e ao enriquecimento de urânio em ultracentrífugas de altíssima velocidade de rotação, a “mãe da bomba atômica dos pobres”. O transplante de coração dependeu menos de novos conhecimentos que de audácia para romper com consensos de ética médica e valores religiosos em plena vigência no momento. Representou a adoção do conceito de morte cerebral como definindo a irreversibilidade dos processos vitais, em substituição ao consenso vigente na época que reputava ao coração a sede da vida. A técnica não salva vidas— uma é perdida em benefício de outra— e assim não se enquadra no escopo geral da medicina, mas após a descoberta das drogas contra rejeição, ganhou aceitação tanto na área médica quanto entre os cidadãos comuns. O bebê de proveta e a ovelha Dolly, ambos fizeram retirar do sexo o caráter de condição necessária à reprodução e assim contribuíram para afrouxar os consensos vigentes sobre o afeto e a família, com profunda repercussão na ordem social. Validou também os reclamos de pessoas de mesmo gênero, unidas pelo afeto, aos mesmos direitos que as uniões heterossexuais, além das cirurgias para mudanças de sexo. Com o sequenciamento dos genes no ADN os mistérios da herança genética ficam elucidados e podem ser usados para a produção de fármacos capazes de vencer enfermidades de fundo genético ou para prever sua eventual incidência. Uma empresa, de posse da listagem dos genes de um candidato a emprego, poderia, por exemplo, recusá-lo diante da presença de um gene que o predisponha à enxaqueca ou qualquer outro mal que afete sua capacidade de trabalho. Para evitar que o conhecimento desses dados pudesse ser alvo de patentes o projeto Genoma Humano foi inicialmente conduzido numa frente multinacional envolvendo centenas de laboratórios, coordenados pelo Instituto Nacional de Saúde nos EUA e seu financiamento foi basicamente governamental. Pelo caráter governamental do gerenciamento e suporte financeiro foi o único movimento na contramão da linha adotada no diálogo ciência-tecnologia da segunda metade do século, marcada pela liderança da empresa privada. Entretanto foi também conduzido por uma empresa privada que invocou o direito a requerer patente para seus achados, pois seu método de trabalho era original, menos preciso, mas mais rápido e barato que o da iniciativa governamental, provocando enorme polêmica. Terminou com o presidente *Bill Clinton* socando a mesa em severa reprovação ao direito de patentes para genes. Isto é realmente um marco revolucionário, por ocorrer na maior economia capitalista do mundo, ciosa da propriedade das ideias e invenções e do direito à exclusividade de sua exploração comercial através de patentes.

Aparentemente apenas o caso da revolução de Copérnico teve alcance e profundidade como estão tendo na cultura do século XXI as novas realidades sobre a reprodução assexuada e o sequenciamento do genoma humano.

A lista das realizações do diálogo ciência-tecnologia do pós-guerra, arrolando itens de impacto mais modesto que as assinaladas acima, é muito expressiva e longa. Ela se concentra em domínios instrumentais, sobretudo na medicina, e no campo da robótica. O ultrassom deixou os laboratórios de física para se instalar nas operações de limpeza de superfícies metálicas e no diagnóstico médico do funcionamento do coração e de órgãos localizados no abdome; o método dos traçadores radioativos invadiu a medicina no diagnóstico do funcionamento da tireoide e do cérebro, sob forma de tomografia computadorizada, no que divide espaço com a ressonância magnética nuclear; o pavor que cercou as radiações nucleares desde as bombas de Hiroxima e Nagasaki foi vencido e a radioterapia com pesadas doses de radiações de raios X do Cs<sup>137</sup> ou do Co<sup>60</sup>, é corriqueiramente usada no tratamento de diversas ocorrências de câncer, no que compartilha eficácia com agulhas de material radioativo espetadas em órgãos afetados,

inclusive em regiões próximas aos órgãos da reprodução. O transdutor fotoelétrico que viabilizou a câmara fotográfica digital ensejou a construção de câmaras microscópicas para inspeção visual dentro de cavidades naturais do corpo, de grande valor para o exame de órgãos internos precedendo cirurgias ou simultâneos com elas; a disponibilidade de novos materiais, especialmente inertes e elásticos, em tamanhos compatíveis com os diâmetros de vasos sanguíneos permite alarga-los definitiva ou temporariamente, favorecendo o tratamento ou a passagem de outros instrumentos. Terminam a lista, mais pelo tédio de enumerá-las ao leitor que por sua escassez, as próteses de pernas, braços, mãos, que aliam a resistência ao desgaste e leveza de novos materiais à perfeição de movimentos; já se estuda articulá-los diretamente a uma interface eletrônica instalada no cérebro para ativá-los diretamente através dos impulsos cerebrais de comando.

Como resultado desse desfile de fantásticas realizações, disciplinas como a física perderam a visibilidade pública que tinham no final da guerra. Disciplina básica para a formação de recursos humanos capazes de usar eficientemente as novas tecnologias, se junta à matemática e à química para constituir um núcleo indispensável de conhecimentos que os sistemas educacionais não estão conseguindo passar satisfatoriamente às novas gerações. Essa circunstância alia-se às já mencionadas ameaçando a sustentabilidade dos projetos de tecnologia avançada.

### **Comentários Finais**

Estes comentários resumem a tentativa de responder à indagação: terá o diálogo ciência-tecnologia atingido sua forma final, definitiva ou, em face da acumulação das dificuldades já mencionadas, formas novas poderão ser geradas?

É verdade que a forma atual que o diálogo assumiu, com a ciência base, as engenharias e as técnicas incorporadas num único sistema sob comando da empresa industrial, ao lado de universidades privadas e públicas, organizações governamentais e órgãos complementares, revelou uma tremenda eficiência. A empresa industrial, sobretudo a partir do século XIX, foi a principal interface na relação do diálogo ciência-tecnologia com a sociedade, negociando com ela a comercialização de seus produtos; assumiu excepcional posição dentro do diálogo no pós-guerra. O notável êxito do formato atual é também indicador de sua aprovação social. Entretanto, não é certo dizer que a sociedade instrumentaliza seu poder delegando-o exclusivamente a este ou aquele agente para decidir sobre este ou aquele setor. Muito embora o conteúdo inovador criado dentro do diálogo ciência-tecnologia seja intrinsecamente autônomo, pode sofrer retardos ou acelerações pela incidência de influências externas. Os estrepitosos acontecimentos obstando a adoção das ideias de Copérnico e a adoção tardia do sistema métrico decimal são exemplos de influências de fora do diálogo que alteram os ritmos de adoção de suas conclusões. O complexo do diálogo ciência-tecnologia, a despeito de sua autonomia, pode, portanto, não ser quem dá à sociedade a última palavra sobre a conveniência de suas criações.

Todo um mundo de fascinantes realizações abre-se ante os olhos dos viventes do século XXI, criando oportunidades inéditas, quase milagrosas, de bem estar e gratificação. Praticamente todas as áreas do conhecimento – não apenas as ligadas ao grupo das ciências naturais – experimentaram grande renovação, favorecendo o diagnóstico e a gestão de problemas de interesse público com procedimentos extremamente eficazes. Tal foi o avanço alcançado em todos os domínios que deu curso à ideia de que os conhecimentos necessários para resolver qualquer problema afetando os membros de uma comunidade já

estão disponíveis: a solução depende unicamente do aporte de recursos e de administração competente. Embora seja verdadeira para numerosos problemas afligindo as comunidades, a presunção é falsa para uma importante faixa de fenômenos contingentes – grandes terremotos, tsunamis, grandes erupções vulcânicas, calamidades climáticas em geral. Nesses casos, embora se conheçam as principais causas, não há como preveni-los nem atenuar a dor de remediá-los. Dado que esses fenômenos têm, em geral, baixa taxa de incidência, sua presença não chega a invalidar a ideia de que já se sabe o bastante e que é preciso apenas arrecadar e administrar corretamente os recursos. Esta atitude importa no enfraquecimento do poder político tradicional e fechamento de canais pelos quais as sociedades podem influir em quaisquer de suas instituições. Esse fechamento favorece a continuação do modelo atual do diálogo ciência-tecnologia. A resposta à indagação formulada acima quanto a eventuais agentes alternativos que possam alterar o formato atual do diálogo ciência-tecnologia parece, portanto, negativa.

As dificuldades para a assimilação pelo meio social das inovações previsíveis no futuro imediato, geradas pelo modelo em curso, afetam negativamente o emprego das pessoas, tanto porque visam maior produtividade dos investimentos, criando cada vez menos empregos, como por requerer profissionais cada vez mais sofisticados. Indicativos das dificuldades em gerar novos empregos têm aparecido em todas as economias mundo afora, mas os esforços para resolvê-las concentram-se em formas supletivas aos sistemas de educação vigentes, sem maiores conteúdos inovadores. Enfim, as reações lembram uma conjuntura de homeostasia, isto é, a tendência dos sistemas a preservarem a forma de equilíbrio anterior sempre que o afastamento dele se dê com desvios de pequena amplitude. A tecnologia tem autonomia, objetivos e recursos próprios para continuar no seu caminho, a despeito de dificuldades que precise enfrentar, como as já mencionadas, desde que não se acumulem para compor desvios de maior amplitude. Dentro dessa hipótese, é previsível para o futuro próximo o aprofundamento das tecnologias atuais: microcircuitos com densidade de integração ainda maiores, propiciando memórias mais rápidas e de maior capacidade, computadores mais rápidos e sofisticados, telecomunicações mais diversificadas, avanços nos limites ainda existentes para o uso da Internet, etc. Além desses se pode esperar uma variedade de aplicações que tanto novos materiais como a ideia de miniaturização podem aportar a outros domínios da ciência aplicada, medicina, biologia, geociências, etc., além da componente de ciência básica em curso em universidades, institutos e laboratórios nacionais. Tudo aponta na linha da continuação do formato atingido pelo diálogo ciência-tecnologia.

Apenas uma área que vem crescendo de importância incorpora elementos de contestação ao presente *status* do diálogo: a preservação do meio ambiente. De um lado reclama por mais ciência e tecnologia e assim reforça o modelo atual; de outro contesta algumas soluções do modelo em nome da preservação ambiental. No lado em que reclama por mais ciência e tecnologia estão os estudos de fontes de energia em substituição aos combustíveis fósseis, poluidores implacáveis da atmosfera, os automóveis com tração elétrica, os projetos de dessalinização da água do mar e de aquecimento doméstico tocado a energia solar, aproveitamento energético de fontes eólicas, solares, da biomassa e outras. No lado contestador reclama por uma contabilidade diferente, que leve em conta os danos causados ao ambiente pelas soluções tecnológicas na fase de projeto e não depois, incorporando os danos ambientais às análises custo-benefício. É possível que um dia essa nova contabilidade venha a ganhar força de modo que no futuro os projetos subtraíam automaticamente de seus benefícios os danos ambientais e que decisões ecológicas possam

ser tomadas. É plausível também que esse futuro não esteja assim tão distante, tal o grau de depredação ambiental e de esgotamento de recursos naturais que o planeta já revela, após tanto tempo de exploração indiscriminada. Essa contabilidade, caso venha a ser adotada, será uma marca nova no formato do diálogo ciência-tecnologia.

A conclusão destas reflexões é, assim, que a tendência das forças atuantes no presente parece ser a de preservar o diálogo ciência-tecnologia na forma deixada a partir do final da 2ª guerra mundial.

Aparentemente o diálogo atingiu sua forma histórica mais eficiente e racional, mas ficou demasiadamente carregado pelas soluções que aumentam a produtividade dos investimentos em detrimento da geração de empregos, pelo custo dos desenvolvimentos e por não contabilizar os problemas levados ao meio social pela diversidade e volatilidade das realizações. O presente formato do diálogo ciência-tecnologia está sendo minado principalmente pela baixa geração de empregos novos, e dificuldade de formar pessoal com qualificação cada vez mais apurada. Na ausência de maiores entraves econômico-sociais não há agentes para encaminhar qualquer alternativa, de modo que tudo leva à conclusão de que a presente conjuntura confere caráter definitivo e terminal à forma atingida pelo diálogo ciência-tecnologia. É difícil prever que tempo podem sobreviver os fatores característicos da conjuntura atual em face das incertezas quanto aos extremos a que pode levar a presente crise econômica que está assombrando o planeta. Uma estimativa que parece verossímil talvez seja a de que se modifiquem juntamente com outras criações da 2ª guerra, como o acordo de Bretton Woods que substituiu o ouro pelo dólar como moeda internacional, as Nações Unidas e suas agências, Conselho de Segurança, UNESCO, FAO, entre outras que já deram sinais de fragilidade.

Para finalizar, uma palavra sobre a ciência fundamental no diálogo ciência-tecnologia.

A ciência fundamental está presente nos setores governamental e privado do diálogo, mas essa presença se faz usualmente de forma tão indireta e distante que só se torna reconhecível quando engajada a um projeto através do qual pode ser acessada, como é o caso de fundamentos de lógica matemática no desenvolvimento de computadores. No caso do setor acadêmico e de institutos especializados, os temas como astrofísica, cosmologia, teorias de campo e outros se desenvolvem com um discurso que só chega ao público esporadicamente, através de iniciativas isoladas para divulgação científica que não esclarecem o papel dessas áreas no diálogo.

Entretanto têm um papel muito importante. De um lado fundamentam o conhecimento corrente na produção de bens e serviços de alta tecnologia e de outro contêm o germe das ideias que os irão substituir. Assim, o eletromagnetismo do final do século XIX fundamentou o conhecimento necessário à produção do motor elétrico, do dínamo e da iluminação elétrica que marcaram os grandes empreendimentos do início do século XX, e ao mesmo tempo, com as ondas eletromagnéticas, abriu os caminhos para a era da Comunicação: Rádio, TV, Telefonia, Internet, que dominaria o restante do século. A acumulação de conhecimentos no início do século XX levou ao átomo e à visão quântica de mundo que, ao mesmo tempo em que fundamenta os conceitos presentes nas maravilhosas aplicações dos microcircuitos, dos novos materiais, da supercondutividade, etc., retira o ser humano da condição de simples figurante e o eleva ao papel de ator destacado no discurso sobre a natureza. O principal alvo do diálogo ciência-tecnologia da segunda metade do século XX em diante tem sido o microcircuito que fundamenta a telefonia celular, o computador, as microcâmaras e através deles inúmeras aplicações. O diálogo ciência-

tecnologia renova-se nessas áreas quantitativamente, com o aumento da escala de integração dos microcircuitos. Este aumento de escala já se avizinha do máximo permitido pelas regras clássicas para a materialização de transistores, resistores e demais componentes dos circuitos. Para além desses limites os bits de informação já atingem dimensões atômicas e requerem regras quânticas, não as clássicas para sua materialização. A ideia de um computador quântico vem sendo intensamente discutida por grupos de pesquisas nos dois setores do diálogo – empresa privada e organizações governamentais – e, a despeito de resultados encorajadores, não foi ainda possível ultrapassar as dificuldades para materialização de um processador quântico contendo o número mínimo de unidades lógicas que as aplicações práticas requerem. Afora essa iniciativa, outras que não dependem do aumento da escala de integração além dos limites clássicos têm sido também cogitadas: baixas temperaturas de modo a ensejar o transporte da informação em regime de supercondutividade ou usando luz como meio de transporte da informação em lugar de correntes elétricas. Também há impasses nesses caminhos de modo que qualquer passo adiante na tecnologia de processadores digitais depende de vencer ao menos um deles. Caso soluções apareçam, o atual formato do diálogo ganha novo alento pela geração de processadores digitais com desempenho muito superior aos atuais. Caso não apareçam, fica ameaçado pela falta de genuína renovação, aliada às dificuldades já mencionadas. Uma vez que a previsão é de que o aumento da escala de integração chegue o seu máximo em 2012, a ameaça ao atual formato do diálogo parece próxima, mas ainda assim, a não ser que as condições de qualificação crescente e baixa taxa de novos empregos assumam dimensões muito maiores, alterações no atual formato não parecem prováveis.

### **Bibliografia.**

*J.D.Bernal* – Ciencia y industria en el siglo XIX, Martinez Roca, Barcelona 1973, tradução do original inglês editado por Rutledge & Keagan, Londres 1973

*W. Heisenberg* – A ordenação da realidade, com apresentação de Fabio Antonio da Costa e Antonio Augusto Passos Videira, Editora Forense Universitária, Rio 2009.

*J. D. Bernal*–Science in History, Penguin Books 3ª edição, em 4 volumes, 1965, publicados originalmente por C. A. Watts & Co. Ltd, 1954

Pedidos de cópias desta publicação devem ser enviados aos autores ou ao:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
Área de Publicações  
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4<sup>o</sup> andar  
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ  
Brasil  
E-mail: [socorro@cbpf.br](mailto:socorro@cbpf.br)/[valeria@cbpf.br](mailto:valeria@cbpf.br)  
[http://www.biblioteca.cbpf.br/index\\_2.html](http://www.biblioteca.cbpf.br/index_2.html)

Requests for copies of these reports should be addressed to:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
Área de Publicações  
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4<sup>o</sup> andar  
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ  
Brazil  
E-mail: [socorro@cbpf.br](mailto:socorro@cbpf.br)/[valeria@cbpf.br](mailto:valeria@cbpf.br)  
[http://www.biblioteca.cbpf.br/index\\_2.html](http://www.biblioteca.cbpf.br/index_2.html)