



Padrões sociointelectuais da pesquisa em nanoescala: laureados com o Prêmio Feynman de Nanotecnologia, 1993-2007

Terry SHINN & Anne MARCOVICH



RESUMO

Este artigo explora as atividades da pesquisa em nanoescala, com referência à epistemologia, à mudança de orientação em questões de pesquisa, divisões de trabalho, contato com a indústria e se a nanopesquisa constitui ou não um novo paradigma científico. Os dados foram coletados de uma amostra dos laureados com o Prêmio Feynman de Nanotecnologia, iniciado em 1993 para incentivar avanços na teoria e na experimentação. Será dada particular atenção ao lugar das disciplinas e da interdisciplinaridade e à emergência de novas formas nas relações de trabalho. Embora a química constitua a disciplina de origem de muitos ganhadores, durante os últimos oito anos muitos cientistas entrevistados em nosso projeto estavam empregando materiais biológicos em seu trabalho, independentemente de seus nichos disciplinares. A epitaxia, a arquitetura e a estrutura nanos e os efeitos do nanoconfinamento dos fenômenos emergem como pontos centrais. A epistemologia da teoria e da experimentação baseadas em simulação torna-se crescentemente importante. Similarmente, as imagens emergem como centrais para a epistemologia da nanoescala. A indústria mostra-se muito menos relevante para as atividades desse grupo de cientistas do que inicialmente antecipávamos. Uma pequena minoria de praticantes acredita que a pesquisa em nanoescala representa um novo paradigma, embora argumentos a favor dessa interpretação frequentemente introduzam questões cognitivas e epistemológicas importantes.

PALAVRAS-CHAVE • Pesquisa em nanoescala. Paradigma. Interdisciplinaridade. Divisão do trabalho. Epistemologia. Simulação. Imagem. Química. Biologia. Epitaxia.

O Prêmio Feynman de Nanotecnologia foi instituído em 1993 para identificar e reconhecer publicamente contribuições de projeção na pesquisa em nanoescala (PNE). Um prêmio foi atribuído em 1993 e outro em 1995, e desde 1997 tem havido dois prêmios anuais, um para realizações na teoria e outro, na experimentação.¹ Ao examinar as atividades intelectuais e profissionais dos laureados Feynman, nossa proposta é a identificação do que é frequentemente considerado, entre os praticantes da PNE, como

aspectos que incorporam pesquisa de ponta e promissora nesse campo, ou seja, o Prêmio Feynman de Nanotecnologia é visto como razoavelmente emblemático da realização notável por pelo menos parte do domínio da PNE.

Em nossa reflexão, o vocabulário comumente usado de “nanociência” e “nanotecnologia” foi substituído por “pesquisa em nanoescala”, devido ao fato de que, em muitas instâncias nesse domínio, as novas combinações de indivíduos que emergem ultimamente vêm de uma variedade de formações disciplinares, da capacidade de construir e combinar novos materiais e das incertezas e múltiplas finalidades dos produtos cognitivos, das produções e resultados de pesquisa, o que significa que, enquanto distinções entre ciência e tecnologia persistem, a interação entre elas aqui é combinatória e entrelaçada e, portanto, os atores não se classificam segundo linhas de ciência ou tecnologia. Eles alegam operar na nanoescala, e é isso que dá sentido a seu trabalho e estrutura seu pensamento, suas atividades materiais e interações sociais – portanto “pesquisa em nanoescala” *versus* “nanociência” ou “nanotecnologia”.

Seis aspectos, que claramente surgem nos esforços dos laureados Feynman, serão examinados aqui:

1. construção – arquiteturas / ferramentas / resultados;
2. investigação – artefatos, propriedades e conceitos;
3. os papéis e o *status* da simulação computadorizada;
4. o *status* e a dinâmica das disciplinas científicas na PNE e o lugar da circulação de conhecimento e da sinergia;
5. a centralidade crescente dos materiais biológicos na pesquisa dos laureados Feynman;
6. a extensão na qual questões de aplicação da PNE figuram no pensamento dos ganhadores e suas ligações com as empresas.

O sistema do Prêmio Feynman de Nanotecnologia foi organizado pelo *Foresight Institute*, fundado por Eric Drexler e Christine Peterson em 1986 para promover a manufatura de nanotecnologia molecular (cf. Peterson, 1995). O objetivo do Instituto era *educação*. A educação era dirigida para o público em geral, praticantes de engenharia e de ciência, gestores de política de pesquisa e empresas.² No início da década de 1990,

¹ Este artigo é uma descrição preliminar de um estudo mais amplo com a população desses laureados. 12 laureados foram entrevistados, além de Christine Peterson, enquanto diretora da seção de pesquisa do *Foresight Institute*, que organiza o Prêmio Feynman de Nanotecnologia. Um arquivo de dados foi organizado para cada ganhador do prêmio anual; certos arquivos são mais completos que outros.

² Entrevista com C. Peterson por T. Shinn, fevereiro de 2008. C. Peterson é, atualmente, diretora do escritório de pesquisa do *Foresight Institute* e coordenadora do programa do Prêmio Feynman de Nanotecnologia.

a PNE estava ainda em sua infância, quando comparada à atual magnitude do campo. A introdução e o crescimento espetacular do domínio tiveram cinco causas principais, além da política governamental.

A primeira está ligada à invenção de novos instrumentos e ferramentas de pesquisa. A invenção do microscópio de tunelamento com varredura (*scanning tunneling microscope* – STM) e do microscópio de força atômica (*atomic force microscope* – AFM), em meados e no final da década de 1980, abriu a via para a manipulação, o controle e a exploração de materiais em uma nova escala – a nanoescala. O desenvolvimento de técnicas como a litografia *dip-pen* permitiu aos pesquisadores investigarem novas propriedades físicas ou reabrirem caminhos que antes não haviam sido completamente explorados. Inumeráveis pesquisadores em PNE até hoje continuam a expressar seu encantamento quando da primeira visão das letras IBM soletradas usando 65 átomos de xenon, por Donald Eigler em 1989, e as primeiras imagens vistas usando o STM. Muitos testemunham um sentimento imediato de que um novo capítulo da pesquisa científica fora aberto, repleto de ricas surpresas e novas possibilidades. Segundo, tornou-se agora possível estudar experimentalmente o comportamento físico com referência a moléculas individuais em oposição a grandes populações de átomos ou moléculas. Isso significou aceder a um entendimento mais preciso e ao entendimento de formas até hoje inimagináveis de eventos e interações físicas. Terceiro, o crescimento da ciência dos materiais e o progresso na epitaxia permitiram à PNE ser empreendida sobre formas modificadas dos materiais e desenhar e construir nanomateriais originais, tais como os *nanodots* e os nanofios, desenhados para a pesquisa específica. De fato, a epitaxia está no coração da PNE (cf. Mody, 2004a, 2004b, 2006; Shinn, 2006). Quarto, a emergência da ciência computacional também se mostrou estar no centro. Computadores mais poderosos e novos programas aceleraram a pesquisa baseada em simulação, e as ferramentas de simulação foram rapidamente focalizadas no mundo da nanoescala (cf. Lenhard, 2004, 2007; Shinn, 2006). A simulação sugere possibilidades plausíveis de artefatos desconhecidos, propriedades e leis físicas na nanoescala, as quais por seu turno estimulam o avanço da experimentação (cf. Johnson, 2006). Quinto, o nascimento de novos instrumentos de observação e a simulação foram ambos responsáveis pelo crescimento das imagens na ciência, o que teve impacto na epistemologia.

I A POLÍTICA GOVERNAMENTAL PARA A PESQUISA EM NANOESCALA

As iniciativas nacionais de base governamental constituem o principal fator no rápido crescimento da PNE. A política pública de pesquisa promoveu o interesse e a atividade em PNE, canalizando tímidas quantias de dinheiro público para o campo da pesquisa.

Em 2000, em um discurso proferido no *California Institute of Technology* (Caltech), o presidente Clinton anunciou a Iniciativa Nanotecnológica dos Estados Unidos, que deveria receber um investimento de duzentos milhões de dólares, que rapidamente subiu para trezentos milhões; hoje, ele está em quase um bilhão e meio. Entre 2005 e 2007, o Departamento de Energia dos Estados Unidos criou cinco institutos dedicados à PNE, com fundos anuais garantidos por dez anos (20 milhões de dólares),³ encorajando desse modo programas de longo prazo. Como o governo de cada país estuda cuidadosamente as orientações de pesquisa adotadas por outras nações, muitos países europeus também desenvolveram iniciativas em PNE, assim como a China.⁴ Atualmente, os institutos de pesquisa chineses publicam aproximadamente 40% do trabalho listado no *Science Citation Index* (SCI), os Estados Unidos também publicam cerca de 40%.⁵ Induzidos por financiamento abundante, os pesquisadores, em muitos casos, apressaram-se em modificar sua orientação ou redefinir a atividade em andamento, de maneira a beneficiarem-se do novo fluxo de recursos de considerável monta, totalmente imprevisto.⁶

Os esforços de Drexler e seu império organizacional, embora não decisivos, provaram ser altamente importantes para o desenvolvimento da política de pesquisa pró-PNE e seu farto financiamento. A pesquisa, os novos conceitos de engenharia, a “visão” de um mundo material muito diferente, baseado na manufatura molecular de base nanotecnológica, suas criações organizacionais, sua militância pública a favor de um *lobby* governamental pela PNE e, finalmente, seus testemunhos em muitos comitês governamentais ligados à elaboração de políticas contribuíram significativamente para a institucionalização e o vigor criativo da PNE nos Estados Unidos. Por um período de tempo durante a década de 1990 e o início de 2000, ele foi uma força central e seu *Foresight Institute*, com a criação do Prêmio Feynman de Nanotecnologia, operou como elemento-chave na estratégia para fazer que a manufatura molecular esteja baseada em um tema não dominante na pesquisa tecnológica, na engenharia, na empresa, no

³ Entrevista com M. Cohen por T. Shinn, fevereiro de 2008.

⁴ Primeiro foi o Japão na década de 1990, sob os auspícios do MIT, e depois os Estados Unidos que desenvolveram políticas e atividades amplas, organizadas e de longo prazo em PNE. O termo “nanotecnologia” foi utilizado pela primeira vez em 1974, na Universidade de Tóquio, pelo Professor Norio Taniguchi.

⁵ Para um exame cientométrico de aspectos da PNE muito útil, ver o número especial do periódico *Scientometrics* de 2007. Para um estudo qualitativo de certos aspectos econômicos da PNE e das interações com a empresa, ver o número especial em PNE de *Research Policy* de 2008.

⁶ Na França, por exemplo, pode-se razoavelmente conjecturar que a fusão intelectual e organizacional de 2003 e a reorientação parcial de quatro importantes laboratórios parisienses, que resultaram na criação do Instituto de Nanociência de Paris, explicitamente em torno de temas relacionados à PNE, foram significativamente influenciadas pela recente política pró-PNE e pelo dinheiro concedido especificamente para as iniciativas em PNE. Podem-se citar muitos exemplos desse tipo para vários países.

desenvolvimento de novos produtos; em um modo modificado de existência para a espécie humana. Contudo, é altamente complexa a ligação entre o programa de Drexler e a pesquisa reconhecida pelo Prêmio e a posição dos ganhadores em relação à perspectiva de PNE de Drexler. Enquanto a grande maioria dos laureados do prêmio identifica a PNE a uma importante mudança na ciência e, às vezes, a uma mudança radical ou paradigmática, muito poucos identificam-se com a visão e as prioridades da orientação drexleriana do *Foresight Institute*. O que, então, esse prêmio altamente cotado nos diz sobre o conteúdo, a organização do trabalho, a epistemologia e as interações sociais mais amplas da PNE? Onde residem as concordâncias e as divergências com Drexler?

2 O PROGRAMA DE DREXLER

Em uma extensa série de artigos e livros, iniciada em 1981, o engenheiro formado no doutorado multidisciplinar do MIT, K. E. Drexler, estabelece um programa tecnológico sem precedentes com o propósito de transformar o modo humano de produção material. Ele defende a possibilidade da produção de máquinas em nanoescala, capazes de se autorreplicar em milhões, que podem, em uma dimensão molecular, manufaturar mais produtos do que é presentemente concebível. Esse enfoque poderia, do mesmo modo, levar a novos tipos de produtos e fazer isso de modo muito barato e sem agredir o ambiente ou consumir as vastas quantidades de energia atuais. O programa foi primeiro anunciado em seu livro de 1986, *Engines of creation: the coming era of nanotechnology*. Em outro livro publicado logo depois, *Nanosystems: molecular machinery, manufacture and computation*, Drexler, tecnicamente muito astuto, demonstrou o lado técnico sério de seu programa. Ele propôs projetos precisos em nanoescala, de motores, bombas, válvulas e interruptores moleculares eletrônicos. A investigação e o *design* são “teóricos” e não envolvem experimentação e construção de artefatos materiais. Em seus estudos no MIT e em muito de sua pesquisa subsequente em tecnologia espacial para a NASA, o trabalho de Drexler baseou-se principalmente em técnicas computacionais. Ele era um engenheiro de computação talentoso e, com o tempo, seu enfoque da PNE e da manufatura molecular passou a ser cada vez mais baseado em simulação computadorizada.

A visão de Drexler da engenharia e manufatura moleculares foi inspirada pelo discurso *There's plenty of room at the bottom*, de Richard Feynman, no banquete de 1959 da Sociedade Americana de Física. Em sua apresentação, Feynman fez duas propostas altamente originais. Primeira, é fisicamente possível manipular e controlar átomos e moléculas individuais de um modo tal que eles podem ser arranjados para realizar trabalho e tarefas específicas. Segunda, o fato de que não haja hoje em dia ciência asso-

ciada com tal empreendimento não é decisivo. Engenharia é diferente de ciência e, na tecnologia, o homem é capaz de obter controle material sobre a natureza sem que seja necessário entender completamente, em termos científicos, as leis e dinâmicas dos eventos. Assim, nós podemos reorganizar o mundo se estivermos equipados com as ferramentas apropriadas em uma escala atômica, inclusive na ausência de conhecimento formal sobre as atividades transformacionais (cf. Feynman, 1960). Drexler aplicou esse *bottom-up* (de baixo para cima) *versus* o padrão atual da estratégia de miniaturização *top-down* (de cima para baixo) na antecipação do sistema de manufatura molecular, no qual ferramentas e divisas moleculares poderiam autorreplicar-se em mais de seu tipo e possibilitariam, então, que máquinas produzissem um fluxo sem fim de produtos necessários para uma vida mais longa, mais saudável e melhor para todos (cf. também Drexler, Peterson & Pergamit, 1991).

Drexler e seu *Foresight Institute* exibem uma estratégia e uma epistemologia engenhariais. O foco é primariamente: (1) *função* análoga a máquina e (2) *estrutura* análoga a arquitetura.⁷ As propriedades dos materiais possuem interesse principalmente na extensão em que servem a esses fins. Para a manufatura nanotecnológica molecular, os conceitos, os princípios e as leis são periféricos no programa de Drexler e na orientação e no discurso do *Foresight Institute*.

Neste artigo, estudamos uma amostra dos laureados com o Prêmio Feynman de Nanotecnologia para expor de modo mais claro as atividades que estão ocorrendo no mundo da PNE. Desde a criação do prêmio em 1993, um total de 46 ganhadores foram designados (muitos prêmios são atribuídos a iniciativas coletivas); estudamos os pesquisadores principais para todos os prêmios. Levantamos os dados de 22 cientistas principais e entrevistamos 12 ganhadores, além de C. Peterson, que dirige o grupo do *Foresight Institute* que distribui os prêmios anuais.

Tanto foi dito sob a bandeira da PNE e tal variedade de atividades é atribuída a ela que existe certa medida de validade em qualquer coisa que se possa dizer sobre esse campo. Examinando os laureados desse ambicionado prêmio, torna-se possível delimitar o que é visto como pesquisa interessante e excelente. Queremos identificar os tipos de questões que foram levantadas, sua metodologia, epistemologias, tipos de materiais que eles selecionam como sua plataforma de pesquisa, a estrutura organizacional e a dinâmica de trabalho, a interação disciplinar e a evolução dos praticantes e a extensão e natureza da interação com a manufatura e a empresa. Também exploramos o que mudou na população do Prêmio Feynman de Nanotecnologia entre 1993 e 2007 e o que isso pode revelar sobre o mundo da PNE.

⁷ O reconhecimento de Drexler da significância da estrutura análoga a arquitetura pode ser visto em um de seus primeiros artigos no qual teorizou acerca da utilização de proteínas como uma estrutura molecular útil na manufatura molecular (cf. Drexler, 1981, 1989).

Desde o início, não houve forte conexão entre o *Foresight Institute* e seu prêmio, em uma relação de caráter frequentemente indireto; a designação dos candidatos ao prêmio envolve, para além do pessoal do Instituto, consultas à empresa e, principalmente, à academia. O ganhador do Prêmio Feynman de Nanotecnologia é escolhido por um grupo de laureados que muda anualmente e um grupo maior de acadêmicos. Nossas entrevistas com os laureados indicam que a maioria nunca se associou ao *Foresight Institute* ou à visão de Drexler. Muitos exibem pouco conhecimento ou aparentam desinteresse. A questão, de todo modo, mantém-se: em que grau e de que maneira, se é que há alguma, a pesquisa dos laureados do Prêmio Feynman de Nanotecnologia incorpora alguns aspectos da orientação filosófica ou técnica expressa por Drexler e seu grupo desde meados de 1980?

3 CONSTRUINDO — ARQUITETURAS / FERRAMENTAS / RESULTADOS

Uma grande maioria dos laureados pode ser classificada como nanoconstrutores. Em grau considerável, a *construção* compreende a maior parte da atividade da PNE. A arquitetura refere-se a construir estruturas geométricas pré-projetadas, átomo por átomo ou molécula por molécula. Aqui, o objetivo é impor uma forma estável pré-determinada à estrutura. As ferramentas consistem de artefatos capazes de alcançar rotineiramente o controle da posição, do movimento ou da interação de objetos na nanoescala. Em alguns casos, o termo instrumento é usado no lugar de ferramenta. As ferramentas podem ser empregadas para os propósitos de manipulação ou de construção de entidades mais complexas na nanoescala. Os resultados (*outputs*) são, frequentemente, a montagem dos elementos obtidos pelas ferramentas; eles podem resultar em uma *finalité*, podem ser associados à performance de um trabalho concreto, aplicações para consumidores, pesquisa fundamental etc.

Primeiro, quase sempre é um desafio em si mesmo construir uma geometria concebida na nanoescala, na qual os materiais apropriados, os processos e as forças físicas envolvidos não são bem conhecidos ou compreendidos atualmente. Segundo, a geração de um objeto (uma ferramenta) que permite um processo concebido frequentemente mostra-se problemática, muitas vezes levando ao fracasso ou exigindo anos de esforços. Terceiro, o desenvolvimento de um artefato (resultado) que realiza, rotineira e confiavelmente, uma função que permite certo efeito visado na forma de “trabalho” é uma tarefa significativa que envolve a posse de arquiteturas adequadas, componentes que fornecem efeitos necessários e, finalmente, controle de interfaces ou interações de multicomponentes. A fronteira entre arquitetura, ferramentas e resultados é frequentemente apenas parcial ou não pode ser percebida. A relação entre os

três é quase sempre circular, não linear e recíproca. A arquitetura é, em geral, integrada nas nanoferramentas e a passagem entre ferramentas e resultados nano é altamente simbiótica e multidirecional. Enquanto arquitetura, ferramentas e resultados mantêm uma identidade central, muitas formas de ligação entre eles garantem a circularidade e a sinergia, assegurando, desse modo, frequentes passagens entre as fronteiras e mútuo enriquecimento multidimensional. É por isso que a taxonomia de arquitetura, ferramentas e resultados retém certa medida de significado categórico, a verdadeira significação reside em sua interação (cf. Shinn, 2008).

3.1 ARQUITETURA

A forma das entidades na nanoescala é da maior importância para a exploração de novos efeitos e propriedades e para o entendimento de dinâmicas ou conceitos atuais ou novos. As pesquisas de N. Seeman (*New York University*) e P. Rothmund (Caltech) lidam com a construção de estruturas arquitetônicas. O trabalho que deu a Seeman o Prêmio Feynman em experimentação em 1995 consiste na construção de andaimes moleculares rígidos, de múltiplos lados e multidimensionais, e sua cristalização final. Ele emprega fragmentos de ADN sintético como matriz e, depois, junções Holliday para unir as extensões de ADN e fazê-lo mais rígido.⁸ Esse projeto envolve ADN sintético e os reagentes corretos para cortar e depois emendar os pedaços ao longo das linhas que se quer. O trabalho começou na década de 1980 e ainda continua. Tem havido grandes dificuldades: prevenir fragilidades na estrutura, que é muitas vezes instável; conseguir os cruzamentos certos, descobrindo como ligá-los; selecionar os pontos de conexão efetivos e então realizar as junções nesses pontos específicos. Para obter um número máximo de lados no objeto e gerar uma arquitetura tridimensional, Seeman começou com objetos de três ou quatro lados. Então ele imaginou uma arquitetura que permitisse um andaime de ADN de seis lados. Atualmente, há nanoestruturas de ADN molecular de 16 lados.

O objetivo aqui é, estrita e puramente, cristalografia em nanoescala. Seeman tem, de fato, muitas patentes baseadas em seu trabalho. Elas, no entanto, são fruto da política administrativa da Universidade de Nova York, que deseja comercializar os resultados das iniciativas de seus pesquisadores e, talvez, particularmente em PNE. Até hoje, todas as iniciativas comerciais ligadas ao trabalho com o ADN falharam miseravelmente,

⁸ Entrevista com N. Seeman por T. Shinn, janeiro de 2008. Uma junção Holliday é uma junção móvel entre quatro sequências de ADN. A estrutura leva o nome de Robin Holliday, que a propôs em 1964 para dar conta de um tipo particular de troca de informação genética em fungos, conhecida como recombinação homóloga.

sugerindo a precária conexão entre aprendizado e capital que ocorre aqui.⁹ O próprio Seeman não está interessado nisso e não expressa preocupação com o que será feito com suas arquiteturas. Ele formulou um problema cristalográfico extremamente difícil para a nanopesquisa e existem, hoje, duas dúzias de laboratórios universitários engajados nesse mesmo tipo de trabalho. Quando ele começou a empreitada, era o único no campo. Para Seeman, então, a finalidade está nos cristais moleculares tridimensionais altamente complexos e estáveis. Não obstante, ele mostrou disposição para aderir aos costumes no mundo da PNE; tendo em vista publicar um artigo recente na *Nature*, no qual o texto original referia-se a uma sequência móvel de material que sinaliza a partir de um segmento de uma sequência de ADN, ele consentiu em referir-se ao objeto como um “braço robô”. Ele se diverte relatando esse incidente para mostrar o que certo grupo demanda, tendo em vista impor uma representação particular do domínio da PNE.¹⁰

O origami¹¹ do andaime de ADN oferece uma segunda ilustração da arquitetura da PNE. As geometrias formadas aqui são sinuosas, de tamanho relativo (acima de 6 nanômetros de comprimento) e complexas. A arquitetura é composta por até 200 segmentos. Uma longa sequência de ADN natural é extraída de um vírus. Ela é, então, dobrada em formas complexas pela imposição de ângulos ou curvas que são fixados no lugar por segmentos muito curtos de ADN sintético. O código dessa sequência de ADN (ACGT) é predeterminado durante a síntese. A geometria resultante é uma forma labiríntica. A dificuldade técnica reside na seleção de posições de âncora apropriadas e na conexão dos laços curtos à longa sequência inicial. O projeto usa ADN como um material-padrão para o controle espaço-temporal de outras moléculas. Em cada junção da arquitetura, elementos adicionais podem ser introduzidos, tais como proteínas ou pontos quânticos (*quantum dots*).¹²

Esse projeto foi conduzido por P. Rothmund¹³ (Caltech), que ganhou o prêmio Feynman com E. Winfree (Caltech) em 2006. Essa arquitetura é informacionalmente muito rica. Ela toma os códigos de ADN que podem ser sequenciados à vontade por meio de uma divisa de inscrição, fazendo, assim, possível expressar uma infinidade de mensagens visadas. Além do mais, pode servir como padrão para a estruturação de um

9 Cf. <<http://www.hotstocked.com/10ksb/nanoscience-tech-inc-NANS-127994.html>>.

10 Entrevista com N. Seeman por T. Shinn, janeiro de 2008.

11 Origami é uma arte chinesa muito antiga, de dobrar uma folha de papel para produzir formas altamente complexas como um animal, uma flor elegante, um delicado inseto etc.

12 Um ponto quântico (*quantum dot*) é um semicondutor cujos éxcitons estão confinados em todas as três dimensões espaciais. Como resultado, eles têm propriedades que estão entre aquelas dos semicondutores e aquelas das moléculas discretas.

13 Entrevista com P. Rothmund por T. Shinn, janeiro de 2008.

âmbito de substâncias diferentes (os *nanodots* ou proteínas mencionados acima) e por causa de suas características biológicas, induzir dinâmicas que permitem a auto-organização (cf., por exemplo, Morange, 2003). Esse sistema arquitetural é capaz de se automontar com 99% de acuidade! A esperança é que essa arquitetura encontrará seu uso, algum dia, na construção de estruturas muito complexas, com aplicações na medicina, na eletrônica e, sobretudo, na computação. Esses horizontes demonstram como a arquitetura flui para os domínios das ferramentas e dos resultados. Aqui a arquitetura não é, necessariamente, um fim em si mesmo, totalmente autônomo e isolado.

Outro exemplo dessa circulação entre arquitetura, ferramentas e resultados é fornecido pelo projeto seguinte de Rothmund e Winfree, no qual a arquitetura foi, mais uma vez, central. O intento foi construir uma simples máquina de calcular, um ábaco. “Telhas” de ADN foram arranjadas para representar 1 ou 0. Operações matemáticas fáceis puderam então ser realizadas. O problema era geométrico porque é a forma da borda da telha que determina o valor da telha. Portanto, a tarefa era outra vez identificar e depois gerar a arquitetura de telhas requerida.¹⁴

3.2 FERRAMENTAS

A construção de ferramentas de PNE é da maior importância enquanto distinta da construção de arquiteturas. Para citar um dos nossos entrevistados, ganhador do prêmio Feynman:

o que fazemos é desenvolver ferramentas, sejam químicas, biológicas ou topológicas, que nos permitam construir moléculas e materiais, controlando seus parâmetros arquitetônicos em uma escala de 1 a 100 nanômetros de tamanho. Penso que esse é o grande desafio da nanociência, não apenas para os próximos anos, mas para o próximo século. Antes de podermos realmente construir muitos materiais úteis e realmente tirar vantagem de todo o potencial desse campo, precisamos ser capazes de construir, rotineiramente, matéria nessa escala de tamanho. E estamos longe de ser capazes de fazer isso agora, de um modo rotineiro... Eu simplesmente acredito que as ferramentas é que dirigem esse campo. Se você pode desenvolver ferramentas que possibilitam novas capacidades, tipicamente, grandes coisas seguem-se... O que não podemos fazer como químicos, o que não podemos fazer como cientistas de materiais, o que não podemos fazer

¹⁴ Entrevista com E. Winfree por T. Shinn, janeiro de 2008.

como biólogos, na nanoescala? Como posso criar ferramentas que me permitam preencher esse vazio? E eu simplesmente acredito que os instrumentos é que dirigem esse campo... Então, o *modus operandi* deste grupo é “desenvolver uma nova ferramenta”, tipicamente baseada em algum novo princípio fundamental e entendendo-se que a estamos desenvolvendo no laboratório.¹⁵

O primeiro Prêmio Feynman de Nanotecnologia conferido ao trabalho teórico em 1993 foi para C. Musgrave, por suas contribuições para o desenho de uma ferramenta de extração de hidrogênio. Depois, trabalhando no Centro de Simulação Molecular e de Materiais, do *Beckman Institute*, Musgrave empregou técnicas de simulação computacional para desenvolver componentes em nanoescala visando construir uma nanoferramenta extratora de hidrogênio (cf. Musgrave *et al.*, 1991). A extração de hidrogênio na PNE continua a ser de interesse entre pelo menos parte da população do Prêmio Feynman por causa de suas implicações como um substituto do petróleo enquanto fonte de energia alternativa limpa e barata.¹⁶

A ferramenta “litografia *dip-pen*” (LDP), desenvolvida por Mirkin, laureado em 2002 em experimentação (e trabalhando na *Northwestern University*), é emblemática da construção de nanoferramentas pelos laureados Feynman. Aqui, a ponta de um AFM, que é usualmente empregada como um “sensor”, é em vez disso usada como uma “caneta” que deposita substâncias químicas em uma superfície que, então, reagem com essa superfície. Essas substâncias químicas podem ser controladas de modo a produzir padrões e então determinar a topologia química e o padrão químico da superfície de toda sorte de substâncias. A “tinta” deixada pelo AFM na superfície pode ser qualquer coisa – podem ser semicondutores, metais, ADN, proteínas – qualquer tipo de molécula pequena. Essa ferramenta permite o estudo de muitos materiais e propriedades que não podiam ser sonhados há poucos anos. A litografia *dip-pen* possibilita o controle arquitetural em uma escala de tamanho inferior a 50 nm, o que agora permite, por exemplo, a redução da informação óptica a uma nanoestrutura da altura de um nanômetro. O que é central para essa ferramenta é o conhecimento do coeficiente de fusão da tinta molecular e quão rápido as moléculas movem-se da ponta do AFM para a superfície.

A litografia *dip-pen* é agora usada como um componente central na construção de resultados e, algumas vezes, de resultados comerciais. Ao mesmo tempo em que retém seu *status* como “ferramenta”, pode-se agora encontrar divisas completas, operando funções e desenvolvendo trabalho (“resultados”). Algumas dessas divisas pro-

¹⁵ Entrevista com C. A. Mirkin por T. Shinn, abril de 2008.

¹⁶ Entrevista com R. Merkle por T. Shinn, fevereiro de 2008.

duzidas pela ferramenta são hoje sucessos comerciais. Essa ferramenta é atualmente usada para construir circuitos semicondutores e bibliotecas de ADN e pode controlar a sedimentação de proteínas e outras moléculas muito pequenas. Usando essa ferramenta, um *chip* de gene de cem mil marcas de ADN pode ser reduzido ao tamanho de uma célula humana. Isso oferece um gene que vai além de buscar por uma solução: essa nova tecnologia permite investigar uma simples célula. Torna-se possível aprender com essa divisa o que está ocorrendo dentro da célula. Além disso, ela pode gerar proteínas que interagem com a superfície de uma célula e indicar como a célula se diferencia e cresce e como move-se e morre. Essas divisas podem ser usadas para caracterizar células cancerígenas. Aqui observa-se uma proliferação crucial de complexificação. A própria ferramenta produz uma variedade de resultados, cada um dos quais incorporando um alto grau de complexidade em domínios diferentes que vão da eletrônica à biologia. Algumas das divisas assim produzidas são capazes de autorreprodução e de desenvolver trabalho rotineiro. A ferramenta é baseada na lógica arquitetônica que impõe efeitos entre átomos e moléculas. Isso resulta em estruturas que contribuem para que os resultados tenham certas funções.

A linguagem e os conceitos de “ferramenta”, “resultado” e “divisa”, por um lado, e de “efeito”, “estrutura” e “função”, por outro, introduzidos nessa configuração em cascata, são altamente problemáticos. As fronteiras e as relações entre esses elementos são muitas vezes vagas e móveis. Confrontamo-nos aqui, na PNE, com a emergência de novas formas de produção e de interação e, possivelmente, com o nascimento de caminhos epistemológicos novos; essa emergência de novas referências e redistribuição de relações entre referências pode, ao contrário, refletir uma perspectiva pós-moderna.

Esse amálgama epistemológico e de trabalho de pesquisa está novamente oscilando entre a independência e a interdependência entre arquitetura, ferramenta, divisa e resultado, o que é, outra vez, capturado na linguagem do químico Mirkin:

Então, sim, trabalhamos pesado o lado biológico. Introduzimos o conceito de usar ADN como um grupo diretor na síntese material e agora isso está sendo usado em todo lugar. Mas a razão para fazer isso não foi somente construir um biomaterial. A razão para fazer foi: “vamos controlar a estrutura”. Se você pode controlar a estrutura, você pode controlar a função. Se você controla a função, pode realizar todos os tipos de novas aplicações e novas capacidades, e muitas delas evoluíram em tecnologias comercialmente viáveis, tecnologias que são encontradas em todo o mundo hoje.

O laureado distingue aqui aspectos específicos da iniciativa da PNE, enfatiza seu caráter linear e inter-relaciona de modo forte aqueles conceitos com frequência re-

presentados fluidamente, tais como estrutura e função; fazendo isso, ele finaliza seu conto com aplicações usuais socialmente concretas. Isso justifica e legitima, de certos modos, o espírito de celebração tal como expressado em seu pronunciamento:

nós precisamos realmente ser o grupo que desenvolve muitas das ferramentas que estão permitindo às pessoas projetarem, construírem e estudarem rotineiramente nessa escala de tamanho. E foi realmente assim que tudo evoluiu...

O significado particular de “construir” na PNE está na continuidade daquilo que os praticantes percebem e desejam buscar como “concebível”. Nas esferas da arquitetura, das ferramentas e das divisas, os pesquisadores da nanoescala muitas vezes identificam o que não foi feito, o que não podia ser concebido, nem na escala material comum, nem na escala atômica, o que agora lhes permite avançar por caminhos não trilhados. Isso representa novas zonas de investigação que implicam graus de liberdade autoconcedida que não foram antes alcançados. Os laureados parecem autorizar a si mesmos simplesmente a exploração de domínios nos quais existam vazios técnicos ou cognitivos, sem temor e livre das noções de impossibilidade. Eles são motivados por “o que não podemos fazer” em oposição a projetar a partir de “o que nós já podemos fazer mais ou menos”. O espírito de expandir na nanoescala aquilo que agora é simplesmente concebível será também explorado em um segundo domínio na próxima seção.

4 INVESTIGANDO — ARTEFATOS, PROPRIEDADES E CONCEITOS

4.1 ARTEFATOS

Uma parte da investigação Feynman é simplesmente movida pela curiosidade: na PNE é possível observar algo nunca antes observado? É concebível fabricar um material inteiramente novo, nunca antes considerado? Há efeitos físicos ou mesmo leis físicas inimagináveis operando na natureza e quais são suas características? Na PNE, essa curiosidade expande-se para um amplo conjunto de elementos e considerações.

Trabalhando para a IBM em meados de 1990, onde o STM foi secretamente inventado e testado pela primeira vez, J. Gimzewski, que logo tornou-se oficialmente associado ao programa de desenvolvimento do STM da companhia, jogava com o aparelho para determinar o que podia fazer com ele — o que a máquina era capaz de observar. No curso dessas investigações, ele “descobriu” uma “roda atômica”. Ele foi o primeiro a insistir que o que rapidamente foi designado “roda atômica” não tem quase

nada a ver com uma roda. Gimzewski insiste continuamente que há na PNE uma tendência perniciosamente a propor “analogias” que são tão incorretas que, na verdade, obstaculizam uma imagem consistente ou o entendimento do que é visto e do que ocorre na nanoescala. Isto posto, Gimzewski observa, à temperatura ambiente, a rotação de um único átomo em uma superfície plana – provavelmente uma consequência do movimento browniano. A “roda” faz uma volta e então para. O átomo precisa ser recolocado antes de repetir a ação.¹⁷

Essa descoberta foi de interesse científico na área porque ela ocorreu na temperatura ambiente e não nas condições criogênicas de perto do 0° Kelvin e porque ela sugere a possibilidade de ações atômicas de rotação mais complexas. Esse laureado com o Prêmio Feynman de 1997 descobriu um artefato na nanoescala cuja principal originalidade reside no fato de nunca ter sido vislumbrado sob certas condições e em uma escala particular. Em si mesmo, ele sugere pouco sobre características da natureza de interesse particular ou geral ou sobre a PNE. Apesar disso, a pesquisa dessa categoria é suficientemente cativante para garantir o prêmio. Por que isso é assim? Primeiro, é preciso percebê-la no contexto de sua ocorrência. Eram aqueles primeiros dias da tecnologia do STM. A observação de átomos e moléculas singulares era ainda uma realização monumental, quase impensável. Gimzewski não viu meramente um átomo. A grande originalidade de sua observação é que ele viu um átomo em um estado “dinâmico” (“pouco mais que um borrão”, para usar suas palavras) e isso convidou à especulação sobre as possibilidades de observação futuras para a nova tecnologia e, possivelmente, sobre como se poderia pensar o comportamento atômico.

4.2 PROPRIEDADES

A entrevista com os dois teóricos computacionais, bem conhecidos por suas descobertas de longo prazo em simulação, S. Louie e M. Cohen, da *Berkeley University*, que receberam o Prêmio Feynman por contribuições teóricas em 2003, demonstra dramaticamente a centralidade e a excitação com a pesquisa de propriedades inteiramente únicas na nanoescala e como essa preocupação com a descoberta de propriedades desconhecidas algumas vezes leva a uma concatenação de novos materiais e a uma nova compreensão física.¹⁸ Os dois cientistas concordam que o prêmio lhes foi concedido por seu trabalho teórico conjunto com nanotubos. A originalidade consistiu em usar primeiros princípios, tais como a teoria quântica, para predizer propriedades e comporta-

¹⁷ Entrevista com J. Gimzewski por T. Shinn, janeiro de 2008.

¹⁸ Entrevista com M. Cohen e S. Louie por T. Shinn, fevereiro de 2008.

mentos dos nanotubos. Essas técnicas, começando com os primeiros princípios e então calculando o comportamento dos materiais, não são recentes, mas apenas muito recentemente seu refinamento tornou-se suficiente para explorar sistemas complexos, nanoestruturas e suas novas propriedades. Se alguém possui o número atômico dos elementos que compõem a estrutura, então ele pode começar desse número atômico e então calcular o comportamento dos elétrons e, portanto, a partir disso, calcular a estrutura, o transporte eletrônico e as propriedades ópticas do sistema, o que lhe dá a capacidade de prever o comportamento existente em alguns novos materiais e o comportamento e a estrutura de um novo material.

Quando nanoestruturas e nanotubos foram introduzidos, tornou-se possível aplicar essa técnica para prever o comportamento de estruturas. Desde que os nanotubos de carbono podem ser metais ou semicondutores, pode-se colocar duas metades de tubos juntas para formar uma junção e essa junção pode ter aplicações de propriedades interessantes e potencialmente importantes. A pesquisa tem perseguido esses cálculos e as novas propriedades têm sido confirmadas. Hoje é rotina olhar além dos nanotubos de carbono. Os nanotubos de carbono foram descobertos experimentalmente, mas pode-se levantar a questão: existem outros materiais lineares que poderiam formar nanotubos? Os cientistas da PNE têm explorado um número de candidatos possíveis e um dos materiais mais promissores para formar uma nova classe de nanotubos é o nitrito de boro, uma combinação de boro, carbono e nitrogênio. Os pesquisadores começaram a olhar para essa nova classe de nanotubos e, de fato, em um ano de cálculos, os experimentalistas foram capazes de sintetizar essa nova classe de materiais. Nos estudos em PNE, pode-se entender novas classes de estruturas e propriedades.

Usando exclusivamente o número atômico do boro e o número atômico do nitrogênio, provou-se ser possível prever a distância exata desse novo nanotubo e tornou-se realizável determinar seu tamanho, sua estrutura e o fato de que poderia ser um semicondutor, não importando como foi formado, contanto que os nanotubos de carbono possam ser semicondutores ou metais e possa-se prever qual é a camada eletrônica vazia.¹⁹ Uma propriedade recentemente descoberta é que, quando excitados, os elétrons somente se afastam do centro, o que não era antecipado – uma propriedade inteiramente nova. Quando se põe um campo elétrico nesses tubos, a propriedade da camada vazia muda.

Com o desenvolvimento do enfoque pseudopotencial, tornou-se possível calcular propriedades estruturais. Isso permite não somente o cálculo de propriedades de estados de base, mas também de propriedades de estados excitados e ópticas. Além

19 No domínio da experimentação, isso refere-se ao que Merkle disse antes acerca da ligação entre os controles da estrutura e da função.

disso, movemo-nos de uma estrutura tridimensional, tal como o diamante ou o silicone com coordenação de quatro lados, para duas dimensões, como, por exemplo, naquele grafite formado pelo empilhamento de camadas de grafite, no qual cada átomo de carbono tem agora três vizinhos. As coisas são diferentes aqui. Em linguagem química, vamos de uma camada “SP³” para “SP²”. A dimensionalidade é reduzida de três para dois e então para um, para um ponto quântico zero, ou uma dimensão para uma linha. As propriedades simétricas, que se supõem na simetria do modo como os elétrons vão se comportar, simplesmente mudam. As investigações das propriedades mostram que em nanotubos de carbono metálico, quando unidos pelas extremidades, ainda que sejam metais, a corrente elétrica pode não passar. Por causa da baixa nanodimensionalidade, quando os elétrons caem para um lado, eles podem não ser capazes de correlacionar-se com o que se passa do outro lado. Assim, há propriedades imprevisíveis, absolutamente novas e estranhas nesses sistemas na mais baixa dimensão.

Tanto na pesquisa dos ganhadores do Prêmio Feynman quanto na de outros praticantes, as propriedades existentes estabelecidas são descobertas em ambientes físicos nunca antes vislumbrados. Alternativamente, o comportamento eletrônico, óptico, magnético ou acústico de propriedades comuns são subitamente descobertos.²⁰ Claramente, a investigação em andamento sobre a mudança de propriedades não transfigura o território da física quântica e da matéria condensada. As mesmas propriedades ocorrem na investigação anterior à PNE. De todo modo, a localização, as interações e a dinâmica dessas propriedades mostraram-se, muitas vezes, surpreendentemente modificadas na PNE, quando comparadas à situação anterior. Com certeza não temos aqui uma nova física de propriedades, mas um território transfigurado e jamais imaginado de propriedades na nanoescala pode, sim, ser visto em numerosos casos. A descoberta é consequência da posse de instrumentação teórica e material mais refinada. Igualmente, é consequência do fato de que a matéria comporta-se diferentemente na nanoescala do que o faz tanto na escala atômica quanto na macroescala.²¹ A dimensionalidade impõe constrangimentos físicos e oferece novas margens para a liberdade física. Não abordado acima, o fenômeno fundamental do “confinamento” constitui uma mudança de propriedade básica do novo ambiente característico da PNE. Em confinamento, um fenômeno físico, tal como um elétron, é compelido a operar em uma escala dimensional menor que seu comprimento de onda característico. O comprimento de onda de um elétron é de cerca de 10 nm. Quando obrigado a operar em uma

²⁰ Entrevista com B. Perrin e B. Jusserand por A. Marcovich e T. Shinn, Instituto de Nanociências de Paris, 2007-2008.

²¹ Na nanoescala, o comportamento de átomos e moléculas é determinado pela posição e interação em um espaço específico, diverso da escala atômica, onde as interações não são restritas e, portanto, seu comportamento pode ser muito diferente.

dimensão menor do que seu comprimento de onda característico, em uma nanodimensão, então, o elétron, tais como incontáveis sistemas físicos alternativos, adota formas de comportamento e assume propriedades nunca antes vistas ou estudadas. O exame das propriedades existentes em um nanoambiente revela assim panoramas totalmente imprevisíveis para a pesquisa científica contemporânea, para aqueles engajados na investigação em PNE. Ao mesmo tempo, velhas entidades continuam presentes, mas funcionando em um novo universo e apresentando novas dinâmicas e possibilidades cognitivas.

4.3 CONCEITOS

Dois recebedores do Prêmio Feynman de Nanotecnologia acreditam que a pesquisa em nanoescala transcende em muito a novidade de artefatos e propriedades. Eles insistem que o fenômeno da PNE exhibe conceitos originais que são novos e específicos ao domínio da PNE. M. Ratner na *Northwestern University* (prêmio em teoria, 2001) e U. Landman no *Georgia Tech Laboratory* (premiado em teoria em 2000)²² são particularmente firmes nessa questão, em especial o último. Ratner é especializado em química. Enquanto ele emprega a simulação algumas vezes, muitos de seus trabalhos são mais propriamente constructos mentais de formas moleculares. De todo modo, sua preferência, tanto no pensamento como na comunicação, é com frequência por modelos materiais tridimensionais, hoje comumente construídos em resina; eles representam átomos ou moléculas em termos de tamanho, distância e posição (cf. Francouer, 2001; Francouer & Segal, 2004; Myers, 2008). Ratner insiste que forças interativas fracas, frequentemente expressas como fricção, ocorrem unicamente na PNE. Esse conceito de forças de ligação fraca marca certas interações químicas moleculares e elas são particularmente correntes e significativas no comportamento biológico na nanoescala. Essas estranhas forças de ligação muito fracas não se expressam fora do mundo nano.

Por sua parte, Landman é um especialista de classe internacional em simulação, e suas descobertas estão baseadas quase unicamente nessa técnica metodológica, epistemológica e teórica. U. Landman argumenta vigorosamente que a PNE tem contribuído de maneira importante para o estoque científico de novos conceitos – conceitos que são o resultado específico da pesquisa inerentemente conectada ao novo campo emergente. Ele aponta três exemplos, todos eles derivados da pesquisa em seu próprio *Georgia Tech Laboratory*. Landman ganhou seu prêmio Feynman em 2000 pela construção do primeiro nanofio de ouro. Ele sublinha que o real significado dessa no-

²² Entrevista com M. Ratner, abril de 2008; entrevista com U. Landman, janeiro de 2008, por T. Shinn.

vidade não está no fio, apesar de sua importância particular, mas, ao contrário, reside mais singularmente no entendimento de que na nanoescala existe uma categoria de forças de fricção não encontradas em nenhum outro lugar. Em suma, as investigações da PNE conduziram a uma nova lei física, anteriormente desconhecida.

Usando técnicas de simulação, Landman perguntou o que acontece quando dois metais diferentes são postos em contato e, então, cuidadosamente separados. De acordo com as leis clássicas da física, a força de fricção é insuficiente e a fina corda que os poderia ligar é quebrada. Landman selecionou os metais ouro e níquel. Em sua simulação, ele introduziu a ponta de um STM em um recipiente de ouro e lentamente moveu a ponta de níquel. A simulação mostrou que, em vez de ruptura, uma nanofio de ouro foi, ao invés disso, produzido. Na nanoescala, as moléculas de ouro surpreendentemente aderiram uma a outra. Isso gerou grande surpresa e foi depois confirmado experimentalmente nos laboratórios de Landman e outros laboratórios independentes.

Essa descoberta é ricamente interessante para a produção de nanofio e pode eventualmente encontrar usos na aplicação. Entretanto, para o teórico Landman, a verdadeira importância de sua investigação reside no fato de que, na nanoescala, opera uma categoria de força de fricção fraca nunca antes observada. Em teoria, a fricção é muito fraca para sustentar a força de ligação requisitada. Já na nanoescala, a força fraca provou ser de fato adequada para sustentar o poder de ligação entre os átomos e as moléculas. Essa nova fricção de ligação fraca é desconhecida, tanto na física newtoniana quanto na mecânica quântica e está provado que a PNE possui suas leis e seus princípios físicos específicos.

Landman oferece outro exemplo que veio à luz em seu laboratório. Trabalhando junto com engenheiros, ele perguntou o que acontece com nanofluidos quando projetados em um jato de *spray*. Será que eles seguem as leis clássicas da equação Navier-Stokes, que descreve as relações entre gradientes de densidade e velocidade dos fluidos há um século e meio? Suas simulações sugerem fortemente que o nanomaterial não se comporta tal como previsto pelas equações clássicas. Primeiro, ele se comporta como uma substância que não se assemelha nem a um líquido, nem a um gás – com efeito, um tipo de *nanospray*. Esse *spray* não está implicado em lugar algum na ortodoxia das formulações Navier-Stokes. No curso da experimentação de engenharia, as previsões da simulação de Landman foram validadas. Pode-se ver aqui outra vez que a teoria clássica é violada pela matéria na nanoescala. É, portanto, necessário modificar o comportamento desse *spray* ou talvez escrever uma nova equação que expresse o recente fenômeno PNE. Landman depois comentou que os engenheiros sugeriram um mecanismo para interagir com o novo nanofluxo. Eles podem direcionar o *spray* por aquecimento seletivo de regiões específicas enquanto o *nanospray* é expelido do bocal do jato.

Finalmente, a pesquisa em simulação de Landman, agora confirmada pela experimentação, demonstra a especificidade da quebra de simetria na nanoescala. Enquanto a quebra de simetria foi um elemento há muito conhecido na física, ela assume particular importância e toma formas únicas na PNE. Segundo Landman, até recentemente, quando se formulava uma descrição de um sistema físico simétrico, dois princípios simétricos eram evocados para dar conta de sua completa simetria. Esse enfoque foi estabelecido na década de 1940 e firmemente mantido pelas de 1950 e 1960, tornando-se a apreciação clássica da simetria. Mesmo nessa época, os químicos entendiam que, sob certas condições, as moléculas não obedeciam rigorosamente a esse princípio, mas os fundamentos dessa lei física foram, apesar disso, sustentados. Por exemplo, em um ponto quântico, os elétrons estão simetricamente confinados dentro do círculo, de acordo com a análise clássica. O domínio da simetria é o círculo e o estado dos elétrons é circular. “Mas a natureza não tolera esse arranjo na escala nanométrica. O único método para manter essa simetria é o de abaixar o nível de energia do elétron”, diz Landman. Entretanto, se isso não é feito, a simetria na nanoescala é quebrada espontaneamente. Assim, enquanto o confinamento continua e mantém-se circular, as configurações do estado do elétron não se mantêm circulares. Uma violação da simetria. Aqui, enquanto o confinamento é simétrico, os elétrons, ao invés disso, passam a assumir fortemente a forma de triângulos e são especificamente localizados. Então passa a surgir o “gás de elétrons” ou “fluidos de elétrons”,²³ ou o que algumas vezes é hoje designado “cristais de elétrons” (cf. Filinov *et al.*, 2001). Essa situação indica, definitivamente, diz Landman, que a quebra da simetria é da maior importância na PNE. Essa quebra espontânea da simetria, de fato, distingue a PNE de outros domínios da física. A assimetria é essencial aqui, diversamente de qualquer outro lugar. A PNE possui, portanto, suas próprias leis específicas, que não são encontradas em outros sistemas físicos. Isso é uma parte da razão pela qual a PNE constitui uma ciência nova e separada que possui seus próprios conceitos e leis físicas.

5 SIMULAÇÃO — TECNOLOGIA, METODOLOGIA, EPISTEMOLOGIA

A ciência computacional compreende a mais ampla técnica singular mobilizada pelos laureados com o Prêmio Feynman. Dos 26 ganhadores primeiramente designados entre 1993 e 2007, 13 indivíduos receberam prêmios que indicavam especificamente des-

²³ Supõe-se que os elétrons de valência estão completamente separados de seus íons (“gás de elétrons”). Como em um gás ideal, as interações elétron-elétron são completamente negligenciadas (elas são fracas por causa do efeito de blindagem).

cobertas baseadas na utilização de simulação. A chave aqui é que a simulação indica possíveis caminhos para futuras investigações ou estipula soluções imediatas específicas para a pesquisa teórica ou experimental em andamento. A centralidade da simulação começou com o trabalho inicial, acima mencionado, de Musgrave sobre a fermentação de hidrogênio em 1993 e continuou até 2006 em uma base regular. Os laureados indicados por contribuições baseadas em simulação no Prêmio Feynman de Nanotecnologia incluem numerosos cientistas bastante conhecidos na comunidade de pesquisa nos Estados Unidos – como se notará imediatamente, a maior parte dos que baseiam a investigação em simulação receberam seus prêmios na categoria de “teoria”, enquanto oposta a “experimentação”: C. Musgrave 1993, teoria; D. Srivastava 1997, teoria; R. Merkle 1998, teoria; W. Goddard 1999, teoria; J. Heath e S. Williams 2000, experimentação; U. Landman 2000, teoria; D. Brenner 2002, teoria; M. Cohen e S. Louie 2003, teoria; W. Hellinga 2004, experimentação; B. Kuhlman 2004, teoria; E. Winfree 2006, teoria; P. Ruthemund 2006, experimentação. O nome de C. Schafmeister 2005, experimentação, também constitui forte candidato para a simulação na PNE, já que ele fica a meio caminho entre técnicas computacionais e bioexperimentação.

Em parte, a simulação tornou-se singularmente importante devido ao ímpeto partilhado pelos pioneiros do movimento da manufatura molecular, K. E. Drexler e R. Merkle. Sua centralidade é fortalecida pelo poder e disponibilidade contínuos de aumentar a capacidade computacional e desenvolver programas e algoritmos de simulação crescentemente sofisticados. As simulações podem dirigir a atenção para possíveis ou mesmo promissores mecanismos, arquiteturas e estruturas de engenharia e podem, alternativamente, sugerir a provável inviabilidade de outros desenhos. Apesar do tempo e da dificuldade que muitas vezes ela envolve, a simulação é frequentemente menos cara e consome menos tempo que os experimentos físicos de laboratório. Isso permite certa exploração, que normalmente não é buscada em um ambiente experimental por falta de tempo e recursos materiais.

Duas considerações adicionais sobre a atual vantagem da simulação na PNE e em outras áreas. Primeiro, ela libera a imaginação científica das restrições estandardizadas de rotina. As simulações podem ser tentativas, se elas falharem, valores ou elementos alternativos podem ser introduzidos em uma nova simulação, com relativamente menos esforço do que é requerido na experimentação de laboratório. Assim, a simulação introduz um novo domínio de epistemologia imaginativa no qual permutação e mutação tornam-se disponíveis. A simulação é um território do “possível”, livre de inibições autoimpostas, com frequência limitadas. O pesquisador está livre para tentar uma variedade de caminhos.

Segundo, assim como no caso da experimentação de laboratório baseada em instrumentos, as imagens são utilizadas na simulação para apontar, demonstrar e deba-

ter seus resultados. O amplo crescimento geral das imagens tanto na experimentação (cf. Galison, 1997) quanto na teoria da simulação é frequentemente de tipo que os resultados da simulação podem ser comparados com achados experimentais. Isso alimenta a comunicação (teórica/experimental) entre os grupos e, eventualmente, a validação. Assim, a “linguagem” da simulação hoje, muitas vezes, se confunde com os dados visuais dos experimentos de laboratório mais tradicionais.

Finalmente, dado que na PNE atual não é viável construir muitas das divisas de manufatura molecular propostas por Drexler e seus aliados, elas podem, entretanto, ser modeladas por simulação. Por exemplo, em 1993, W. Goddard usou a simulação para demonstrar rigorosamente que os desenhos propostos por Drexler para máquinas moleculares são, de fato, mecanicamente concebíveis, se certos erros, por ele indicados no estudo de Drexler, forem corrigidos. Mais uma vez, a simulação sugere caminhos sem necessariamente provar que esses caminhos podem ser seguidos materialmente. A simulação aqui estimula a imaginação e talvez empreendimentos e aventuras, sem comprometer-se com investimento material na direção proposta.²⁴

6 DISCIPLINA, CIRCULAÇÃO, SINERGIA

Para muitas pessoas, a PNE é quase sempre associada com a interdisciplinaridade, mas as práticas de pesquisa dos laureados Feynman sugerem que a situação é muito mais complexa. Em um primeiro nível, é interessante notar que os ganhadores são treinados em uma única disciplina. O maior grupo de laureados foi treinado em química — pelo menos 12 laureados, de uma população de premiados de cerca de 22,²⁵ obteve seu PhD nessa disciplina; um número bem menor em física (3 pessoas). Até agora, um ganhador que obteve seu doutorado em biologia não foi identificado. Mais ainda, não temos laureados treinados em domínios como biofísica ou bioquímica. Finalmente, é importante notar que alguns laureados que iniciaram seu trabalho no doutoramento cruzando linhas disciplinares abandonaram esse esforço, completando seus estudos com um diploma em uma única disciplina. N. Seeman, por exemplo, iniciou seu trabalho de doutoramento em um programa combinado em química e biologia e rapidamente chegou à conclusão de que não conseguiria obter competência nos dois domínios. Ele então abandonou o programa e obteve seu doutorado em química, mais especi-

²⁴ Entrevista com W. Goddard, por T. Shinn, janeiro de 2008.

²⁵ Na maior parte dos anos, foi designado um ganhador do prêmio em teoria e um ganhador em experimentação. Entretanto, ocasionalmente ocorre que o líder da equipe insista que os nomes de todos os participantes do grupo de pesquisa sejam incluídos na lista de ganhadores do prêmio. Por exemplo, em 1997, Srivastava conseguiu que cada membro de sua equipe fosse mencionado. Este estudo focaliza os pesquisadores principais indicados em cada ano.

ficamente, em cristalografia. Estes dados são incompletos, mas indicam uma tendência que demonstra que a disciplina de origem é muito importante, como veremos abaixo.

Em um segundo registro, é essencial observar que todos os laboratórios laureados possuem uma população de praticantes pertencentes a muitas disciplinas diferentes. Dentro dos laboratórios, pode-se contar muitos biólogos e entre eles médicos, e eles estão juntos com físicos, químicos, engenheiros e cientistas de materiais. Teóricos, criadores de instrumentos e experimentalistas são frequentemente encontrados sob o mesmo teto; nenhum dos entrevistados neste estudo trabalha exclusivamente, ou principalmente, com pessoas de sua própria disciplina. Parece que os contatos com pessoas em outras disciplinas tornam-se muito importantes. Cada pessoa contribui com seu conhecimento e habilidades específicos para um projeto comum complexo. Programas estruturados fornecem uma plataforma para a colaboração. Outras interações são associadas com trocas ou consultas intermitentes. Entre os laureados Feynman, a impressão geral é de interação contínua com pessoas de formações multipolares e, igualmente importante, com pessoas que estão interessadas em uma vasta variedade de tipos diferentes de questões. A circulação constitui aqui uma lógica fundamental, com referência tanto a conhecimento e habilidades quanto a variedade de temas explorados. Para os ganhadores Feynman, circulação, sinergia e mobilidade são componentes centrais. Parece que isso contribui para definir a PNE como um domínio. As novas tecnologias associadas à nanoescala, a formulação de questões, as epistemologias mobilizadas e as possibilidades de aplicações bem como os horizontes visados, parecem misturar e, desse modo, confundir as fronteiras entre os muros convencionais do laboratório, as associações profissionais e as disciplinas. Tome-se o exemplo de C. Mirkin, diretor do Instituto Internacional de Nanotecnologia no Departamento de Química da *Northwestern University*: seu grupo reúne químicos teóricos e experimentais, físicos, cientistas de materiais, engenheiros, biólogos, médicos e especialistas em simulação computacional. Esse espectro de competências recobre a complexidade e a amplitude de possibilidades oferecida pela nanoescala. O grupo de Mirkin constrói ferramentas capazes de pesquisa avançada em áreas que se estendem da biologia molecular à pesquisa clínica, ao diagnóstico de saúde pública, à previsão em semicondutores, ao conserto de defeitos de manufatura de semicondutores, ao desenvolvimento de novas nanomoléculas e à investigação de mecanismos de transporte elétrico e forças mecânicas fracas no nível molecular. Parte de seu trabalho levou à invenção de instrumentos ou produtos viáveis comercialmente. O principal interesse é que esse laboratório laureado com o prêmio Feynman vê a nanoescala como uma chave para colocar junto e para induzir a complementaridade em domínios que são fragmentados.

Essas colaborações e trocas são absolutamente espontâneas entre todas as disciplinas envolvidas, e não estruturadas em um programa organizado e decididas por

fazedores de políticas, como o programa *Convergence NBIC*.²⁶ A nanoescala em si mesma produz essa convergência multidirecional que transcende o projeto “nano, bio, info, cogno”, definido pelos que se pretendem arquitetos de uma futura pesquisa. É importante notar que quando Merkle, assim como muitos outros, foi perguntado acerca dessa convergência NBIC, como política e como programa, a reação foi de espanto, surpresa e completa falta de atenção para com tal empresa. Há um gritante contraste entre as determinações disciplinares congeladas dos fazedores de políticas do NBIC e a dinâmica da ação questionadora e de pesquisa característica dos laboratórios laureados com o prêmio Feynman e isso pode caracterizar a pesquisa na escala nanométrica de modo mais geral.

Finalmente, apesar da circulação e sinergia pronunciadas dos praticantes entre muitas disciplinas e envolvendo muitos tipos diferentes de projetos, os ganhadores do prêmio Feynman continuam, entretanto, a identificarem-se com suas disciplinas de origem.²⁷ Isso não constitui uma contradição ou um impedimento em termos de engajamento em áreas alternativas. A disciplina de origem dá uma perspectiva, um filtro pelo qual os praticantes percebem e interpretam as atividades de trabalho dos colegas baseados em campos diferentes. Os praticantes não percebem essa interação como uma ameaça à manutenção e autonomia de sua própria disciplina, bem ao contrário, encontram nisso bases de um contato extradisciplinar para ampliar seu campo de aprendizado e mesmo para reforçar sua disciplina.

7 MATERIAIS BIOLÓGICOS

Desde as origens do prêmio de nanotecnologia Feynman, materiais biológicos têm sido importantes para a pesquisa. Uma distinção precisa ser feita entre pesquisa em biologia *versus* o uso de material biológico em PNE como um material para alcançar objetivos, não necessariamente conectados especificamente à exploração de questões biológicas. Já em 1995, N. Seeman recebeu seu prêmio por construir uma arquitetura molecular complexa e ele fez isso com base em sequências de ADN sintético e junção Holliday. Se bem que, entre 1997 e 2001, os prêmios foram frequentemente concedi-

²⁶ A expressão “tecnologias convergentes” [*“converging technologies”*] (CTs) foi cunhada em 2002 em um documento americano que promovia a convergência das tecnologias nano, bio, informacional e das ciências cognitivas (NBIC) para aprimorar a performance humana (cf. Roco & Bainbridge, 2002). Dois anos depois, a Comunidade Europeia respondeu com um documento intitulado “Tecnologias convergentes para a sociedade de conhecimento europeia” [*Converging technologies for the European knowledge society – CTEKS*], que integrava as ciências sociais nas NBIC (cf. EU-HLEG, 2004; Bensaude-Vincent & Nordmann, 2008).

²⁷ Entrevista com M. Cohen e S. Louie por T. Shinn, fevereiro de 2008.

dos a trabalhos relacionados à pesquisa eletrônica ou mecânica, e largamente baseados em simulação em muitos casos, nos anos que se seguiram, muitos prêmios passaram a estar baseados no uso de substâncias biológicas. O prêmio experimental de 2002 foi concedido para investigações de motores baseados em ADN e, em 2003, um prêmio foi conquistado por uma empresa similar. Em 2004, o prêmio experimental foi para Hellinga pela pesquisa computacional sobre controle molecular de precisão de fragmentos de proteínas e enzimas para fins de bioengenharia. No mesmo ano, Kuhlman recebeu seu prêmio pelo desenho de estruturas proteicas estáveis, o que pode ser usado para a estruturação molecular. Em 2005, síntese de nanopeptídeo foi a base do prêmio de Schafmeister. Em 2006, prêmios em teoria e experimentação foram para Winfree e Rothmund por seu trabalho em calculadoras de ADN e seu origami de ADN.

Para alguns, a nanoescala serve melhor aos biomateriais. Muita pesquisa em átomo, cristais e moléculas pequenas ocorre no intervalo angstrom e isso não se encaixa nas investigações em nanoescala. Essa é a primeira razão para a centralidade dos materiais biológicos. Uma segunda razão está associada à riqueza de informações contida na matéria biológica, que supera infinitamente outras formas de materiais. A terceira razão é a capacidade de autorreprodução inerente a esse tipo de material. E, por último, a abertura para aplicações na saúde – uma vida melhor e mais longa como finalidade última. O biomaterial pode ser visto de duas perspectivas: em um registro, pode constituir um recurso técnico para buscar fins, tais como a construção do computador de ADN. Em outro registro, os fins poderiam ser simplesmente o crescimento do conhecimento em biologia.

A centralidade dos biomateriais é, contudo, certas vezes questionada. Alguns laureados julgam que os materiais químicos virão a constituir a base do desenvolvimento futuro da PNE. Porém, como visto acima, nos últimos dois anos a tendência sugeriu pesquisas vigorosas e resultados promissores baseados em biomateriais.

8 APLICAÇÕES E EMPREENDIMENTOS

É necessário ressaltar que os laureados Feynman estão todos baseados em instituições nos Estados Unidos, com exceção de dois indivíduos, que trabalham na Europa. Quanto à questão da aplicação e das empresas, as atitudes e os comportamentos dos ganhadores do prêmio Feynman são, portanto, estruturados pelas tradições das universidades locais e as transformações que ocorreram intermitentemente ao longo do tempo e estão ligados a diferentes conglomerados de universidades. Enquanto escolas como o MIT e universidades como Stanford estiveram em contato próximo com as empresas, por muitas décadas, isso não é o caso para todas as instituições acadêmicas.

Por exemplo, Berkeley foi indiferente ou mesmo opôs-se às interações entre universidade e empresa. Na visão de Marvin Cohen, ex-presidente da Sociedade Americana de Física, profundas transformações na atitude dos acadêmicos quanto à relação com a empresa começaram há cerca de 10 ou 15 anos. Os acadêmicos americanos agora estão abertos a colaborações com a indústria. Isso é muitas vezes acompanhado por uma preocupação geral com a responsabilidade social e a aplicabilidade da ciência.

Pode-se formular duas questões: é essa atitude particularmente corrente na PNE e entre os laureados Feynman? Em um registro diferente, essa abertura da indústria americana à colaboração com os acadêmicos foi intensificada nos anos recentes e é agora expressa em formas diferentes do que foi no passado? Quanto à PNE: será que a preocupação do campo com o desenvolvimento de novas ferramentas criou novas conexões com empresas em vista do fato de que as ferramentas estão necessariamente conectadas com sua replicação, generalização e a capacidade de produzi-las em um formato padronizado rotineiro? De fato, isso não constitui o centro do projeto de PNE de Mirkin na *Northwestern University* acima descrito.

Entre os laureados Feynman até agora entrevistados, dois estabeleceram firmas. Cohen abriu uma pequena empresa de nanometrologia para medir níveis de dióxido de carbono que ainda não floresceu. Em contraste, Mirkin, na *Northwestern University*, estabeleceu 15 empresas nos últimos cinco anos, entre elas, a *Nanoink* e a *Nanosphere*. A *Nanosphere* fez 110 milhões de dólares de vendas. Ela desenvolve ferramentas de diagnóstico médico baseadas em pequenas partículas de ADN. A *Nanoink* produz instrumentos de nanoimpressão, incluindo o que se chama o enscriptor, já vendido por todo o mundo em mais de 20 países e de uso em uma centena de laboratórios diferentes. Pode-se imprimir qualquer coisa, dos precursores aos materiais no estado sólido, ao ADN e às proteínas. Mirkin insiste que esse grande sucesso empresarial não é generalizável na pesquisa em nanoescala, na qual tende a ser mais propaganda jornalística do que performance industrial realista.

Enquanto os laureados Feynman saem dos padrões em número moderado, um rótulo de sucesso industrial parece muitas vezes ser bastante baixo. Por exemplo, o trabalho de N. Seeman resultou em cinco patentes. O próprio Seeman não está interessado em patente ou indústria. Patentear a PNE é a política da Universidade de Nova York, onde Seeman trabalha. Uma patente resultou na criação de uma companhia. Ela jamais obteve lucro.

Consultorias não ocorrem frequentemente. J. Gimzalski é o único entrevistado engajado nessa atividade. Consultor de quatro firmas, ele é motivado por três considerações: as companhias o recebem calorosamente para trabalhar, pois a presença de um eminente nanocientista no grupo de diretores fornece um bom cartão de visita. Gimzalski está satisfeito em participar porque às vezes é chamado a ajudar na solução

de problemas técnicos difíceis. Esses problemas, por vezes, alimentam sua própria pesquisa acadêmica. Finalmente, Gimzalski enfatiza que a mágica da PNE é que ela se move em muitas direções, que a pessoa está livre para fazer muitas coisas diferentes e que as autorrestrições, frequentes na ciência, não se aplicam na PNE. Uma constante entre os laureados em PNE é um diálogo que emerge entre diversas pessoas e grupos e ocorre entre acadêmicos e pesquisadores industriais. Para os ganhadores, a importância está menos no objetivo da aplicação do que no próprio processo de troca. Isso significa que os pesquisadores da PNE orientada pela curiosidade estão abertos a ideias e objetivos vindos do mundo empresarial e levam-nos a sério como fontes de inspiração. Percebe-se aqui uma relação de reciprocidade e isso pode constituir um motor do desenvolvimento da PNE.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quais são, se existem, as correspondências entre as aspirações e descobertas de Drexler e os laureados do prêmio Feynman? Em seus livros e artigos, Drexler expressa uma visão de uma vida melhor e mais longa para a espécie humana e, além disso, a descoberta e o uso de um novo mundo, de fato, a própria possibilidade de colonizá-lo.

Drexler e seus colegas introduzem a ideia de entidades cognitivas artificiais de autorreplicação, capazes de fazer questões mais penetrantes do que aquelas geradas pelo cérebro humano, com a possibilidade de, efetivamente, responder às questões. A perspectiva manufatureira de Drexler, portanto, abre caminhos e possibilidades em tecnologias que transcendem em muito as ambições convencionais das combinações de pensamento e trabalho da ciência e tecnologia costumeira. Os laureados respondem a esse espírito de abertura e oportunidade ainda que na moldura da investigação científica e técnica. Eles também desejam explorar um novo mundo. Enquanto a busca de Drexler por colonização *pretende criar sua população e explorar* esse mundo, os laureados Feynman saem para explorar e alguns dentre eles para aventurar-se nesse novo mundo. Esse caráter venturoso é, aqui, abertura em relação à possibilidade, plausibilidade e estabelecimento de novas associações que podem se dar entre diferentes disciplinas ou, algumas vezes, entre academia e empresa. É esse sentido inevitável de abertura e aventura que pode distinguir os laureados Feynman de outros praticantes e pode distinguir a PNE de outras áreas do trabalho científico. Pode-se ver aqui um eco dos ideais de Drexler, mas um eco que é fraco e consideravelmente redefinido.

A perspectiva de Drexler é de produção constante de ciência nova para a solução de problemas técnicos e sociais prementes – verdadeiramente, uma percepção de finalização do mundo. Para os cientistas, o novo domínio cognitivo inexplorado é, por

contraste, um convite para novas questões fundamentais, novas tecnologias, metodologias, novos materiais, novas configurações de conhecimento e habilidades por meio da associação e convergência de pessoas de uma diversidade de campos e, algumas vezes, de epistemologias – um novo enfoque de aprendizado oposto aos fechamentos tecnológicos que ainda podem levar a novas soluções tecnológicas, novos processos de manufatura e novos produtos. Não se pode esquecer em nenhum momento que a totalidade do mundo PNE move-se em torno do nascimento inicial e extensão de novas categorias de instrumentações, de materiais, de formas de circulação e sinergia social e a gênese associada de novas formas de representações físicas especializadas e relevantes (cf. Marcovich & Shinn, no prelo).☞

Traduzido do original em inglês por Sylvia Gemignani Garcia

Terry SHINN

Pesquisador do GEMAS (UMR 8598),
Maison des Sciences de L'Homme, Paris, França.
shinn@msh-paris.fr

Anne MARCOVICH

Pesquisadora da Maison des Sciences de l'Homme,
Paris, França.
Anne.marcovich@free.fr

ABSTRACT

This article explores nanoscale research activities with reference to epistemology, changing orientation in research questions, divisions of labour, contact with industry, and whether nanoresearch constitutes or does not constitute a fresh science paradigm. Data has been collected for a sample of laureates of the Feynman Nanotechnology Prize, begun in 1993 for advances in theory and in experimentation. Particular attention is given to the place of disciplines and interdisciplinarity and to the emergence of new forms of work relations. While chemistry comprises the home discipline for most winners, during the last eight years many of the scientists interviewed in our project have employed biological materials in their work, regardless of their disciplinary hub. Epitaxy, nano architecture and structure, and the affects of nano confinement on phenomena emerge as central issues. The epistemology of simulation-based theory and experimentation is increasingly paramount. Images similarly emerge as key to nanoscale epistemology. Industry proves far less central to the activities of this group of scientists than we had initially anticipated. A very thin minority of practitioners believes that nanoscale research represents a new paradigm, yet argument in favor of this interpretation nevertheless often introduces important cognitive and epistemological questions.

KEYWORDS • Nanoscale research. Paradigm. Interdisciplinarity. Division of labour. Epistemology. Simulation. Image. Chemistry. Biology. Epitaxy.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAIRD, M. D.; NORDMANN, A. & SCHUMMER, J. (Org.). *Discovering the nanoscale*. Amsterdam: IOS Press, 2004.
- BENSAUDE-VINCENT, B. & NORDMANN, A. Technological convergence as practice and program: the constitution and role of 'attractive objects' research project to the French ANR, German DFG, Feb., 2008. *Reader Ethic School Summerschool on ethics of converging technologies*, 21-26 September 2008. Dormotel Vogelsberg, Romrod/Alsfeld, Germany.
- CHADAREVIAN, S. & HOPWOOD, N. (Ed.). *Models: the third dimension of science*. Stanford, CA: Stanford University Press, 2004.
- DREXLER, K. E. Molecular engineering: an approach to the development of general capabilities for molecular manufacturing. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 78, p. 5275-8, 1981.
- _____. *Engines of criation: the coming era of nanotechnology*. New York: Anchor Press, 1986.
- _____. Biological and nanomechanical systems: constrasts in evolutionary capabilities. In: LANGTON, C. G. (Ed.). *Artificial life*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1989. p. 501-19.
- _____. *Nanosystems: molecular machinery, manufacture and computation*. New York: John Wiley, 1992.
- DREXLER, K. E.; PETERSON, C. & PERGAMIT, G. *Unbounding the future: the nanotechnology revolution*. New York: William Morrow, 1991.
- EU-HLEG. European Comission High Level Expert Group 'Foresighting the new technology wave'. *Converging technologies. Shaping the future of European socities*. Rapporteur A. Nordmann, 2004.
- FEYNMAN, R. P. There's plenty of room at the bottom. An invitation to enter a new field of physics. *Engineering and Science*, 23, 5, Feb. 1960. Disponível em: <www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- FRANCOUER, E. Molecular models and the articulation of structural constraints in chemistry. In: KLEIN, U. (Ed.). *Tools and modes of representation in the laboratory sciences*. Boston, MA: Kluwer, 2001. p. 95-115.
- FRANCOUER, E. & SEGAL, J. From model kits to interactive computer graphics. In: CHADAREVIAN, S. & HOPWOOD, N. (Ed.). *Models: the third dimension of science*. Stanford, CA: Stanford University Press, 2004. p. 402-29.
- FILINOV, A. V.; BONITZ, M. & LOZOVIK, Y. E. Frozen electrons. *Physycal Review Letters*, 86, p. 3851, 2001.
- GALISON, P. *Image and logic: a material culture of microphysics*. Chicago: The University of Chicago Press, 1997.
- JOHNSON, A. The shape of molecules to come. In: LENHART, J.; KUPPERS, G. & SHINN, T. (Ed.). *Simulation. Pragmatic construction of reality*. Dordrecht: Springer, 2006. p. 25-40.
- KLEIN, U. (Ed.). *Tools and modes of representation in the laboratory sciences*. Boston, MA: Kluwer, 2001.
- LANGTON, C. G. (Ed.). *Artificial life*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1989.
- LENHART, J. Nanoscience and the janus-faced character of simulations. In: BAIRD, M. D.; NORDMANN, A. & SCHUMMER, J. (Org.). *Discovering the nanoscale*. Amsterdam: IOS Press, 2004. p. 93-100.
- _____. Simulation, representation, and cartography: compiling a virtual atlas of nanospace. In: SHINN, T.; BENSAUDE-VINCENT, B. & VINCK, D. (Org.). *Intellectual and laboratory dynamics of nanoscience and nanotechnology. Sociological, anthropological and philosophical investigations*. Maison Suger, Paris, 27-28 April 2007.
- LENHART, J.; KUPPERS, G. & SHINN, T. (Ed.). *Simulation. Pragmatic construction of reality*. Dodrecht: Springer, 2006.
- MARCOVICH, A. & SHINN, T. *Instrumentation, images and materials: the centrality of form in nanoscience and nanotechnology*. No prelo.
- MODY, C. *Crafting the tools of knowledge: the invention, spread, and commercialization of probe microscopy, 1960-2000*. PhD dissertation, Cornell University, 2004a.

- MODY, C. How probe microscopists became nanotechnologists. In: BAIRD, M. D.; NORDMANN, A. & SCHUMMER, J. (Org.). *Discovering the nanoscale*. Amsterdam: IOS Press, 2004b. p. 119-33.
- ____. Corporations, universities, and instrumental communities: commercializing probe microscope, 1981-1986. *Technology and Culture*, 47, 1, p. 56-80, Jan. 2006.
- MORANGE, M. *Histoire de la biologie moléculaire*. Paris: La Découverte, 2003 [1994].
- MUSGRAVE, C.; PERRY, J. K.; MERKLE, R. C. & GODDARD, W. A. Theoretical studies of a hydrogen abstraction tool for nanotechnology. *Nanotechnology*, 2, p. 187-95, 1991.
- MYERS, N. Molecular embodiments and the body-work of modeling in protein crystallography. *Social Studies of Science*, 38, 2, p. 163-99, Apr. 2008.
- PETERSON, C. Nanotechnology: from concept to R&D goal. In: _____. *Intelligent agent*. New York: Hotwired Ventures LC, 1995. Disponível em: <www.islandone.org/foresight/nanorev/index.html>.
- ROCO, M. C. & BAINBRIDGE, W. S. Converging technologies for improving human performance. Integrating from the nanoscale. *Journal of Nanoparticle Research*, 4, 4, p. 281-95, Aug. 2002.
- SHINN, T. When is simulation a research technology? Practices, markets, and lingua franca. In: LENHART, J.; KUPPERS, G. & SHINN, T. (Ed.). *Simulation. Pragmatic construction of reality*. Dordrecht: Springer, 2006. p. 187-204.
- _____. Desencantamento moderno e pós-moderno: diferenciação, fragmentação e a matriz de entrelaçamento. *Scientiae Studia*, 6, 1, p. 43-81, 2008.
- SHINN, T.; BENSUADE-VINCENT, B. & VINCK, D. (Org.). *Intellectual and laboratory dynamics of nanoscience and nanotechnology. Sociological, anthropological and philosophical investigations*. Maison Suger, Paris, 27-28 April 2007.

