

# Ciência para o desenvolvimento sustentável

## O PAPEL DA FÍSICA

---



**Alaor Chaves (editor)**

Adalberto Fazzio (coordenador)  
Peter Alexander Bleinroth Schulz  
Ricardo M. O. Galvão  
Rita Maria Cunha de Almeida



SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

2022

Copyright © 2022 Sociedade Brasileira de Física  
1a. Edição

**Editor** Alaor Chaves (ed.)

**Revisão de texto** Zzero Comunicação (zzerocomunicacao@gmail.com)

**Projeto gráfico e diagramação e tratamento de imagens** Ampersand Comunicação Gráfica

**Capa** Ampersand Comunicação Gráfica

C569

Ciência para o desenvolvimento sustentável: o papel da Física /  
Adalberto Fazzio (Coordenador); Alaor Chaves (Editor) –  
São Paulo, Sociedade Brasileira de Física, 2022.

120 p.

1. Política Científica 2. Educação 3. Sustentabilidade

CDD - 306

Parte ou totalidade desta obra poderá ser reproduzida e distribuída livremente, bastando para isso dar crédito à Sociedade Brasileira de Física.

Impresso no Brasil

Printed in Brazil



Sociedade Brasileira de Física

Tel +55-11-3034.2863 / +55-11-3034-2864

[www.sbf.org.br](http://www.sbf.org.br)

# Ciência para o desenvolvimento sustentável

O PAPEL DA FÍSICA

---



## Diretoria e Conselho

---

### **Presidente**

Débora Peres Menezes - UFSC

### **Vice Presidente**

Rodrigo Barbosa Capaz - UFRJ e CNPEM

### **Secretária Geral**

Susana de Souza Lalic - UFS

### **Secretário**

Caio Henrique Lewenkopf - UFF

### **Tesoureiro**

Gustavo Martini Dalpian - UFABC

### **Secretária para Assuntos de Ensino**

Katemari Diogo da Rosa - UFBA

4

### **Conselheiros Titulares**

Adalberto Fazzio - NNano-CNPEM

Anderson Stevens Leonidas Gomes - UFPE

Andréa Brito Latgé - UFF

Andreia Guerra de Moraes - Cefet-RJ

Luis Carlos Bassalo Crispino - UFPA

Márcia Cristina Bernardes Barbosa - UFRGS

Marcos Assunção Pimenta - UFMG

Olival Freire Junior - UFBA

Paulo Eduardo Artaxo Netto - USP

Ricardo Magnus Osório Galvão - USP

Rogério Rosenfeld - Unesp

Teldo Anderson da Silva Pereira - UFMT

### **Conselheiros Suplentes**

Carolina Brito Carvalho dos Santos - UFRGS

Cristiano Rodrigues de Mattos - USP

Manoel Messias Ferreira Junior - UFMA

Maria Emília Xavier Guimarães - UFF

Marta Feijó Barroso - UFRJ

Thereza Cristina de Lacerda Paiva - UFRJ



## **Autores**

Adalberto Fazzio - CNPEM (coordenador)  
Alaor Chaves - UFMG (editor)  
Peter Alexander Bleinroth Schulz - Unicamp  
Ricardo M. O. Galvão - USP  
Rita Maria Cunha de Almeida - UFRGS

## **Consultores**

Ado Jorio de Vasconcelos - UFMG  
Ana Flávia Nogueira - Unicamp  
Andrea Brito Latge - UFF  
Aquilino Senra Martinez - UFRJ  
Gustavo Martini Dalpian - UFABC  
Harry Westfahl - CNPEM  
Iramaia Jorge Cabral de Paulo - UFMT  
Jean Pierre Henry Balbaud Ometto - INPE  
José Augusto Perrota - IPEN  
José Roberto Castilho Piqueira - USP  
Luiz Davidovich - ABC  
Marcia Cristina Bernardes Barbosa - UFRGS  
Marcia Fantini - USP  
Marcos Pimenta - UFMG  
Mariana Moura - ESAMC  
Paulo Alberto Nussenzweig - USP  
Paulo Eduardo Artaxo Netto - USP  
Roberto Zilles - USP  
Ronald Dickman - UFMG  
Sergio Novaes - Unesp  
Sylvio Accioly Canutto - USP  
Vanderlei Salvador Bagnato - USP  
Virgílio Augusto Fernandes Almeida - UFMG

## **Sociedade Brasileira de Física**

Rua do Matão, travessa R, 187 - Edifício Sede  
Cidade Universitária 05508-090 São Paulo SP

Endereço para Correspondência:

Sociedade Brasileira de Física

Caixa Postal 7545

06298-970 Osasco SP

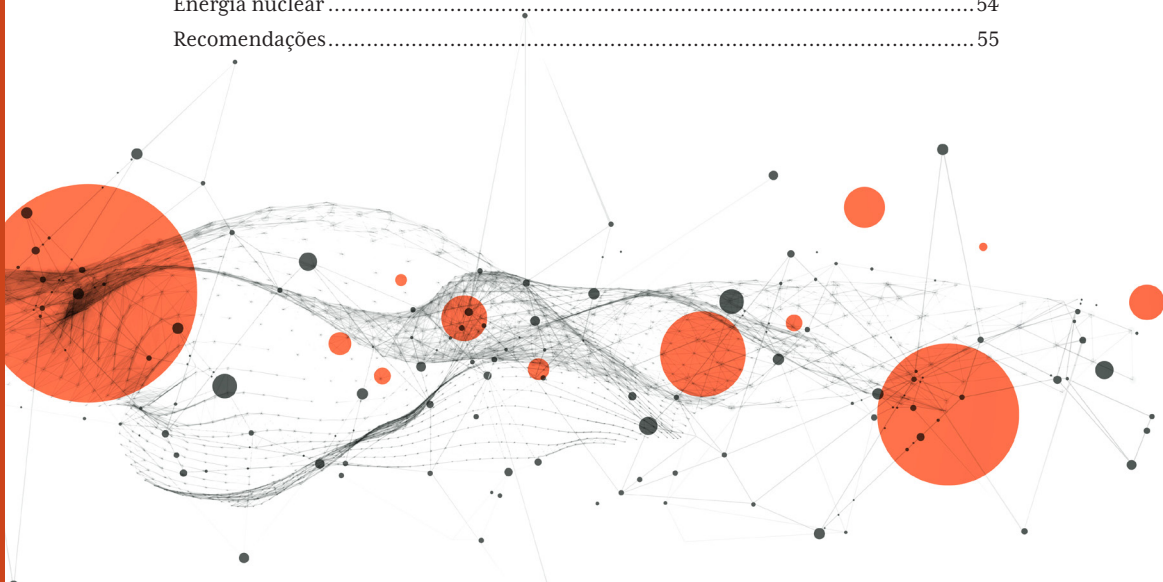
Telefones: +55-11-3034-2863 / +55-11-3034-2864

**Mudanças climáticas: preservação ambiental** 18

Causas das mudanças climáticas.....	19
Bom uso da natureza .....	20
Destruição de biomas.....	20
Aumentar área florestada.....	23
Destinação de terras .....	24
Produção de alimentos.....	25
Alimentos e mudanças climáticas .....	27
Medidas adaptativas viáveis.....	27
Integração lavoura-pecuária-floresta .....	28
Integração, silvicultura e reflorestamento .....	29
Expansão da irrigação .....	31
Tecnologia espacial, meio ambiente e agricultura .....	33
Contribuição da física .....	36
Recomendações.....	37

**Mudanças Climáticas: transição energética** 38

Energia limpa barata .....	39
Lei de Wright, tecnologia e preços .....	40
Brasil: energia elétrica limpa.....	41
Energia eólica no Brasil .....	42
Potencial eólico e tecnologia .....	44
Energia fotovoltaica .....	45
Armazenamento em larga escala.....	47
Redes de transmissão inteligentes.....	49
Biocombustível líquido .....	52
Carros elétricos .....	53
Energia nuclear .....	54
Recomendações.....	55



**Áreas portadoras de futuro 56**

<b>Ciência de dados</b> .....	<b>57</b>
Transformação digital .....	57
Muitas faces da ciência de dados .....	59
Capacitação para a área .....	61
<b>Complexidade</b> .....	<b>64</b>
A maior fronteira .....	64
Ciência dos materiais .....	65
Pesquisa para o agro .....	67
Pesquisa em saúde .....	67
Instrumentação e biologia .....	69
<b>Tecnologias quânticas</b> .....	<b>70</b>
Informação quântica .....	70
Materiais quânticos .....	75
Recomendações .....	77

**Educação básica 78**

Fundamento da prosperidade .....	79
Diversidade e desafios .....	80
Ensino básico livresco .....	84
Déficit de formação adequada .....	85
Recomendações .....	88

**Infraestrutura para o desenvolvimento da ciência 90**

Produção de ciência e tecnologia .....	91
IES e recursos humanos .....	92
Unidades de pesquisa do MCTI .....	97
Centros de pesquisa multiusuários .....	98
Grandes instalações de pesquisa .....	99
Centros temáticos .....	102
Financiamento e infraestrutura .....	104
Conclusões .....	108
Recomendações .....	109

**Ciência: comunicação com e para a sociedade 110**

História, contexto e desafios .....	111
Novo modelo de comunicação .....	114
Comunicação para a física no Brasil .....	115
Observatórios temáticos .....	116
Construção da cultura científica .....	116
Ciência cidadã .....	117
Linguagens híbridas de comunicação .....	117
Relações com novos públicos .....	118
Articulações necessárias .....	119
Considerações finais .....	119

# Apresentação



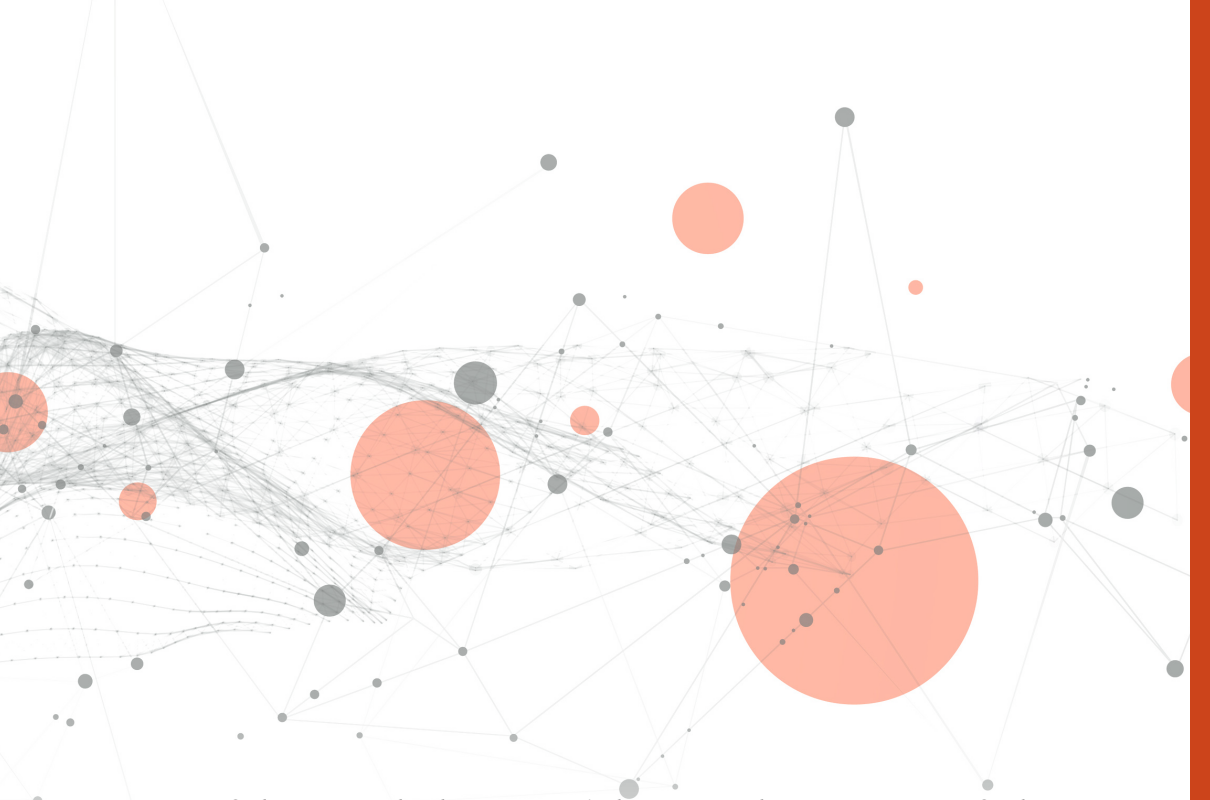
8

**E**ste documento, preparado por autores nomeados pelo Conselho da Sociedade Brasileira de Física (SBF), resultou de longas discussões presenciais e virtuais. Em reuniões virtuais, foram também ouvidos consultores com ampla visão da ciência brasileira e reconhecida competência em suas respectivas especialidades, os quais deram importantes contribuições para o conteúdo do documento, mas a responsabilidade pela interpretação de suas ideias é dos autores.

O documento, de construção reflexiva e caráter propositivo, tem como público-alvo a comunidade científica e acadêmica brasileira (em particular, os sócios da SBF), bem como os formuladores de nossa política científica e educacional, além do público interessado no desenvolvimento sustentável brasileiro.

Como modelo de desenvolvimento e ações sustentáveis, adotamos o documento *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*, aprovado pela Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU), em setembro de 2015.

Valorizamos as palavras que dão início ao documento: “Esta Agenda é um plano para as pessoas, o planeta e a prosperidade. Ela também busca fortalecer a paz universal com liberdade mais ampla. Reconhecemos que a erradicação da pobreza em todas as suas formas e dimensões, incluída a pobreza extrema, é o maior desafio global e um requerimento indispensável para o desenvolvimento sustentável.”

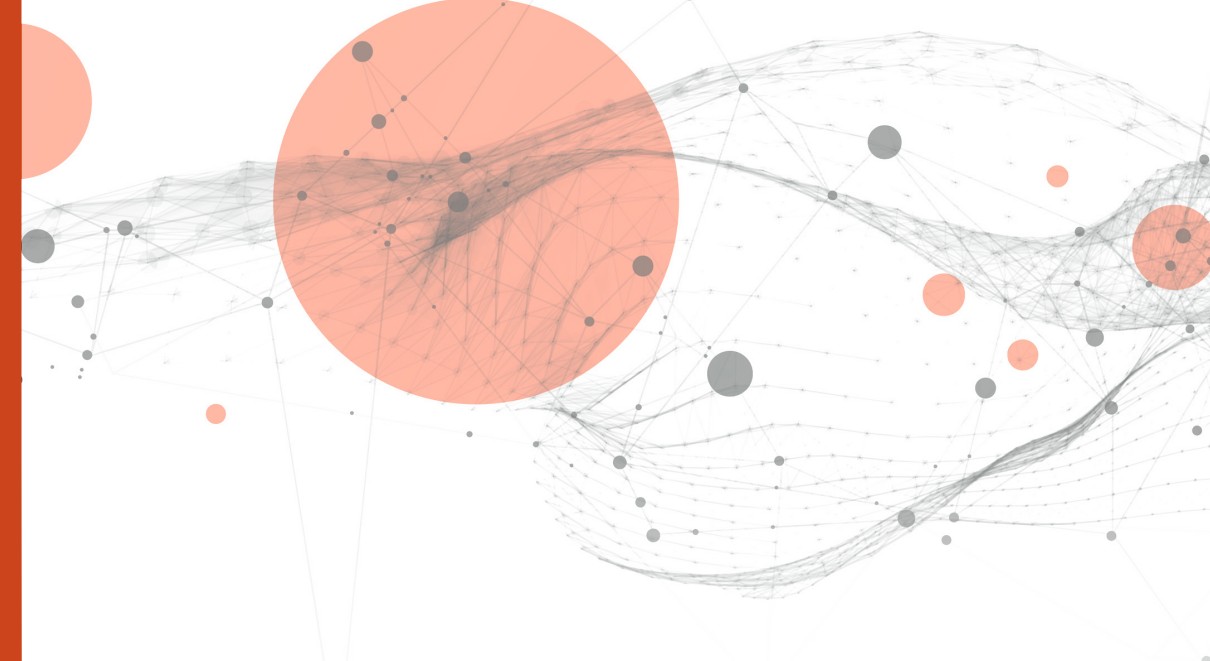


O documento divide-se em capítulos organizados por categorias. Os dois primeiros abordam o enfrentamento das mudanças climáticas. O primeiro, Mudanças climáticas: preservação ambiental, trata das ações necessárias para recuperar nosso meio ambiente e torná-lo menos vulnerável aos extremos climáticos e aos déficits hídricos, que no futuro devem se agravar. Importantes avanços têm de ser feitos para que nossa agricultura se torne mais produtiva e sustentável. Eles incluem boa administração e bom uso de nossos recursos hídricos.

O segundo, Mudanças climáticas: transição energética, aborda a transição energética, cujo objetivo é o banimento dos combustíveis fósseis. O Brasil tem plenas condições de obter sucesso nas duas transformações, e a ciência será fundamental para que isso ocorra.

O capítulo seguinte, Áreas portadoras de futuro, aborda três grandes fronteiras da ciência (ciência de dados, complexidade, informação quântica e materiais quânticos) que terão enorme importância nas próximas décadas e para as quais o Brasil precisa qualificar-se melhor, porque os países líderes do mundo estão fazendo isso com empenho e vigor.

Seria ocioso lembrar que a educação e ciência são os grandes pilares da prosperidade, não fosse a perversa negligência do Brasil com esses fundamentos. Na educação, continuamos muito mal – especialmente, na educação básica, que é a mãe de todas. A histórica omissão do Estado em prover educação básica ampla



de qualidade condena metade da população brasileira à exclusão econômica – e essa injustiça também nos condena ao atraso.

O quarto capítulo, Educação básica, trata da educação nessa fase, e o quinto capítulo, Infraestrutura para o desenvolvimento da ciência, trata de temas que o título não permite antever e, por isso, merecem ser resumidas.

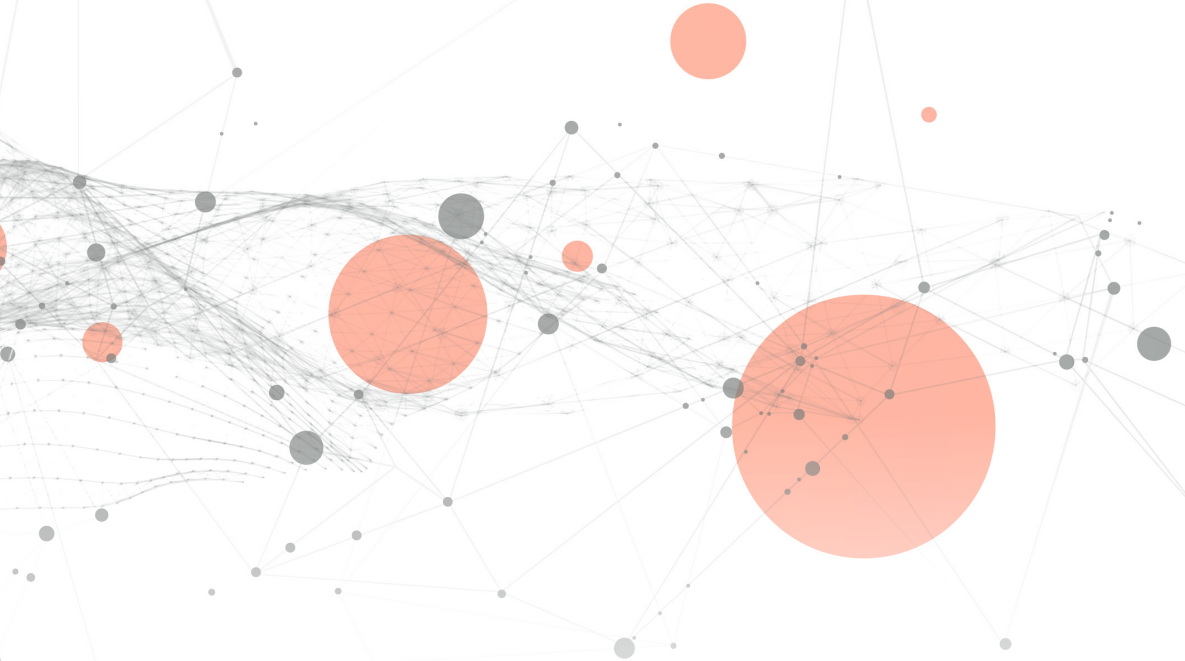
**10**

Com a institucionalização da nossa pós-graduação, em 1968, e a prática de políticas de Estado para o setor, o Brasil construiu considerável qualificação científica e tecnológica, e nossa infraestrutura de pesquisa também se tornou significativa.

A ciência brasileira deu contribuições importantes para nosso desenvolvimento social e econômico, mas elas poderiam ser maiores – e precisam ser. Para isso, ela tem de ser institucionalizada e solidamente fomentada pelo governo federal e pelos governos estaduais, por meio de recursos garantidos por regras legais que os governantes tenham de atender.

As deficiências institucionais e de fomento decorrem de não termos, no Brasil, um plano de desenvolvimento sustentável, baseado na ciência – e, por isso, não termos uma agenda científica. Tanto o plano de desenvolvimento quanto a agenda científica para promovê-lo tem de ser pensado, negociado e formulado pelo conjunto de atores que formam uma sociedade democrática (como a nossa), e cabe ao Estado articular essas ações, embora setores da sociedade, como o científico e empresarial, possam – e devam – levantar questões e propor ações.

Cabe salientar aspectos de uma ciência institucionalizada. Embora ela tenha de ser planejada, é necessário evitar excesso de dirigismo, pois parte significativa dos grandes avanços da ciência nasce fora do plano. Por isso, o financiamento da ciência deve contemplar, com base unicamente no critério da



excelência, desde grandes instalações de pesquisa abertas a multiusuários externos ao apoio a solicitações de pesquisadores que trabalham individualmente ou em pequenos grupos. E é essencial que a disponibilidade dos recursos seja consistente e previsível.

No Brasil, embora o número de cientistas tenha crescido, ele ainda é pequeno se comparado a padrões internacionais. Apenas 0,2% da população brasileira entre 25 e 64 anos tem título de doutor, enquanto, na média da Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômicos (OCDE), esse número é 1,1%.

A física poderá ter papel importante no enfrentamento de todos os desafios descritos neste documento, que só serão resolvidos por trabalho interdisciplinar. Pois a física é a ciência com maior penetração interdisciplinar. Primeiramente, porque é a mais fundamental das ciências; depois, porque a formação do físico inclui o domínio de poderosos métodos de investigação que se aplicam à solução dos mais diversos problemas. Além do conhecimento desses métodos, os físicos estão entre os melhores formuladores de modelos científicos.

Finalmente, mas não menos relevante, tanto para merecer o apoio da sociedade que a sustenta quanto para que se crie no país uma cultura científica, é essencial que os cientistas e as cientistas saibam comunicar-se efetivamente com a sociedade. Não falamos de exposições 'em nome da ciência', em que profissionais explicam a públicos passivos o papel e valor da ciência, mas em interações 'em nome da democracia', na qual cientistas dialogam com o público leigo, para que, dessa interação, construa-se uma ciência cidadã. Esse é o tema do capítulo final, Ciência: comunicação com a sociedade.





# Sumário de recomendações





## Preservação ambiental



13

**Promover** a recuperação de nossas florestas nos termos prometidos no Acordo de Paris: regeneração ou replantio de 12 milhões de hectares nas florestas Amazônica e Atlântica até 2030.

**Ampliar** significativamente nossa área de plantações irrigadas, para dar mais previsibilidade às nossas colheitas e aumentar sua produtividade.

**Realizar** obras de recuperação de nossos mananciais, tais como o reflorestamento das nascentes e plantio de matas ciliares, nos termos previstos no Código Florestal.

**Reduzir** significativamente a área de pastagem extensiva, convertendo parte dela em florestas, e, no restante, adotar práticas de integração com lavouras e florestas (ILPF e IPF), para as quais o Brasil já tem excelente tecnologia.

**Fortalecer** o sistema de observação por satélites do INPE, para monitoramento das florestas e do Cerrado, e dar suporte ao crescimento da agricultura de precisão.

## Transição energética



14

**Fortalecer**, no país, a pesquisa em todos os aspectos da transição energética – principalmente, em tecnologia de placas fotovoltaicas, redes de transmissão e distribuição inteligentes de eletricidade, projetadas para dar estabilidade ao sistema de geração distribuída.

**Promover** a criação ou instalação no país de indústrias capazes de produzir os insumos envolvidos da transição energética.

**Usar** o complexo de grandes barragens hidrelétricas do país, como sistema acumulador de energia capaz de dar estabilidade ao fornecimento de eletricidade.

**Formular** políticas de longo prazo para a geração distribuída de eletricidade, capazes de dar previsibilidade e inspirar confiança em investidores.

## Áreas portadoras de futuro

**Construir** infraestrutura computacional que possa contribuir para a integração interdisciplinar em programas para o desenvolvimento nacional. Criar iniciativa nacional para promover a integração entre física, química, biologia, medicina, agricultura, geologia e engenharias. Essa iniciativa deve contemplar o apoio à formação de recursos humanos.

**Fortalecer** os centros de computação já existentes e criar novos centros tanto de computação de alto desempenho quanto para a produção, gerenciamento e armazenamento de dados essenciais para a segurança da nação. A estrutura do Cenapad poderia ser usada para reestruturar novos centros de computação de alto desempenho.

**Além do oferecimento** de supercomputadores, esses centros devem aprofundar-se no entendimento das demandas dos usuários, auxiliando no desenvolvimento de soluções. Os avanços fundamentais estão relacionados a *big data*, inteligência artificial e aprendizado de máquina, relacionados intimamente à computação de alto desempenho e dependentes de centros de computação de ponta. É importante ter a estrutura física e o capital humano formado por pesquisadores de excelência nessas áreas.

**No campo** das tecnologias quânticas, incentivar, por meio de programas, a criação de centros de informação quântica e materiais quânticos em nossas faculdades de engenharias, institutos de física e unidades de pesquisa dos ministérios.

**Promover** programas em parcerias academia-indústria. Indústrias têm que estar abertas a novas abordagens, pondo recursos em pesquisa e desenvolvimento na área das tecnologias quânticas.

**Incluir** mecânica quântica nos estágios iniciais do ensino de física, química, engenharias – e mesmo no ensino médio. A SBF está disposta a – e tem competência para – colaborar nessa iniciativa. Nos cursos de introdução às tecnologias quânticas, há necessidade de contratação de professores que dominem o tema.





## Educação básica

**Reformular** a BNCC, de forma a garantir que estudantes do ensino médio cursem pelo menos uma versão simplificada dos principais conteúdos de biologia, física e química, oferecendo versões mais aprofundadas dessas disciplinas para os que optarem por seguir carreiras que requeiram conhecimento mais especializado.

**Manter** a política atual de formação de professores em biologia, física e química, separadamente, mas incorporando, na estrutura curricular de cada especialidade, pelo menos, um curso de conceitos básicos das outras duas, para facilitar a interlocução necessária na formulação de propostas de atividades multidisciplinares.

**Reformular** o sistema de competências e habilidades da BNCC, para que os conceitos básicos das disciplinas de ciências da natureza sejam apresentados de modo pedagogicamente lógico, progredindo suavemente dos tópicos de maior facilidade de compreensão para os mais complexos. É importante seguir o princípio de que a pedagogia eficaz constrói sobre o aprendizado e a experiência anterior do aluno, ou seja, 'a melhor maneira de ensinar um conceito novo é misturar muito do que o aluno já sabe com um pouco do que ele desconhece'.

**Incluir** explicitamente na BNCC proposta curricular de um curso mais aprofundado de física, em dois anos, voltado para estudantes que optarem por seguir carreira em ciências exatas ou engenharia.

**Inserir** explicitamente atividades experimentais nas competências específicas e habilidades para ciências da natureza.

**Apoiar** e ampliar o Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), visando a sanar a grave deficiência de professores de física no país.



## Infraestrutura para o desenvolvimento da ciência



**Incentivo** à formação de físicos experimentais, por meio de política sobre a concessão de bolsas de pós-graduação no Brasil e exterior.

**Fortalecimento** das Fundações de Amparo à Pesquisa em todos os estados do país.

**Foro permanente**, liderado pela Academia Brasileira de Ciências, SBF e outras sociedades científicas, em colaboração com representantes da indústria de inovação, com os seguintes objetivos:

**delineamento** da organização desejável das instituições de ensino superior, para promover a formação de recursos humanos em ciência e inovação;

**contribuição** para as decisões do Ministério da Educação em relação à distribuição de recursos para a educação;

**elaboração** de uma agenda científica e industrial para o país;

**construção** de um plano para o parque nacional de pesquisa e inovação, com a colaboração de cientistas e representantes da indústria; tal iniciativa deve contemplar os centros de pesquisa necessários para isso, formando um conjunto complementar e coerente;

**divulgação** das potencialidades da ciência de inovação para o avanço do país.

An aerial photograph of a dense forest with a winding river and a clearing. The text is overlaid on a semi-transparent dark rectangle in the center.

**Mudanças  
climáticas:  
preservação  
ambiental**



## Causas das mudanças climáticas

O aquecimento global antropogênico, que na era industrial elevou a temperatura média do globo em  $1,1^{\circ}\text{C}$ , é oriundo do aumento da concentração, na atmosfera, de gases de efeito estufa (GEE) – principalmente,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ , nesta ordem de importância.

O crescimento da economia e população mundial contribui para o aumento da concentração desses gases de duas maneiras. A primeira (e mais importante) é a emissão de enorme quantidade de gases pela combustão de fósseis. O  $\text{CO}_2$ , principal GEE, teve sua concentração, na atmosfera, aumentada de 280 ppm (partes por milhão) para 410 ppm, e esse aumento foi principalmente gerado pelos combustíveis fósseis usados na geração de eletricidade e propulsão de veículos.

Mas o aumento populacional – com cada pessoa consumindo mais alimentos e proteína animal – tem exercido pressão enorme e crescente no sentido de expandir terras cultiváveis, obtidas em grande parte por desmatamento. Essas áreas desmatadas, antes absorvedoras de  $\text{CO}_2$ , passaram a emitir GEE (principalmente,  $\text{CH}_4$ ) cujas moléculas são 50 vezes mais poderosas como gás estufa do que o  $\text{CO}_2$ .

O desmatamento também provoca aumento local diferenciado da temperatura – principalmente, nos trópicos, onde também se desmata mais. As florestas tropicais úmidas estão desaparecendo, e 50% das restantes estão na floresta Amazônica. Além do aquecimento local, o desmatamento gera redução de águas das nascentes, o que afeta significativamente os mananciais.

Diante do exposto, as mudanças climáticas – o maior problema com que a

humanidade defronta-se – serão abordadas em dois capítulos. Um deles trata da necessária transição energética em que fontes limpas ou renováveis sejam usadas para gerar energia; o outro, da preservação ambiental, conjunto de ações que inclui cessação do desmatamento, reflorestamento, bom gerenciamento da água, ganhos da produtividade agrícola e práticas menos emissoras de GEE.

Como, no Brasil, 70% das emissões de GEE são decorrentes do desmatamento e uso inadequado da terra, começaremos pela abordagem da preservação ambiental, o tema deste capítulo.

## Bom uso da natureza

Temos 8,5 milhões de km<sup>2</sup> de território com boa topografia, ou seja, onde não existe um só vulcão ativo, não ocorrem terremotos e que nunca foi assolado por furacões. Em nossos rios, fluem 20% da água doce do planeta. Além disso, temos dois dos maiores aquíferos mundialmente conhecidos, e nossas temperaturas ficam quase sempre na faixa entre 5° C e 35° C. Nossa flora e fauna estão entre as mais diversas da Terra. Não há, em nosso país, um único deserto, e o sol brilha forte em nossos céus.

Somos um dos maiores produtores de alimentos do mundo. Nossa agricultura alimenta, incluindo o Brasil, cerca de 630 milhões de pessoas no mundo – número que deve aumentar.

Cerca de 66% de nosso território ainda está coberto pela vegetação original – cobertura que vem se reduzindo rapidamente. É possível manter – e até mesmo ampliar – essa vegetação e, ao mesmo tempo, aumentar nossa produção agrícola para alimentar não só nossa população, mas também um mundo que demanda cada vez mais comida.

Aumentar nossa produção agrícola usando menos terra é meta que devemos assumir como dever.

## Destruição de biomas

O Brasil tem seis biomas principais (figura 1) – as fronteiras entre eles não são tão abruptas como sugere a figura. Em suas divisas, há áreas de transição e ilhas de um bioma dentro do outro.



Grande parte de nossa cobertura vegetal natural foi destruída. A mata Atlântica – que, com a floresta Amazônica, são as florestas com maior diversidade biológica do mundo – começou a ser destruída desde o início da colonização.

Como a mata se estende ao longo de nossa costa marítima (região mais povoada do país), o desmatamento foi muito intenso, e, hoje, restam apenas 12,5% da cobertura arbórea primária. As florestas sobreviventes concentram-se quase inteiramente em áreas acidentadas das montanhas costeiras e da serra da Mantiqueira ou parques florestais protegidos.



**Figura 1. Biomas brasileiros, como eles eram em 1500** CRÉDITO: IBGE

O Cerrado, a savana mais biodiversa do mundo, foi pouco desmatado até 1970, pois seu solo era considerado imprestável para a lavoura. A partir de 1970, descobriu-se que, após correção da acidez por calagem, seu solo torna-se produtivo, e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) desenvolveu tecnologia para sua exploração agrícola, com avanços, hoje, considerados a maior revolução agrícola desde a Revolução Verde, da década de 1950.

Além de relativamente plano, o Cerrado tem solo poroso que favorece a absorção da água de chuva, que retorna em abundância à superfície como nascentes.

Atualmente, esse bioma é a grande fronteira agrícola do Brasil e do mundo. O custo ecológico disso foi alto, pois metade do Cerrado foi desmatada neste meio século. Segundo a Embrapa, em 2020, 4,7% do Cerrado desmatado estavam cobertos por vegetação natural secundária (rebrotas), e 28,9%, cobertos por pastagem, na qual estão 36% de nosso gado bovino.

O desmatamento prossegue e é mais intenso do que o da Amazônia. A exploração do Cerrado avançou por todo o Centro-oeste e alcançou o Pantanal, cuja ecologia está comprometida. O cerrado já produz 50% dos grãos do Brasil, e esse percentual tende a aumentar.

A chamada Amazônia Legal tem metade das florestas úmidas tropicais do mundo. No total, cobre área de 5,5 milhões de km<sup>2</sup>, contida em uma bacia de 7 milhões de km<sup>2</sup>. A floresta em território brasileiro tem área de 4.196.943 km<sup>2</sup>.

A floresta Amazônica influencia o regime de chuvas de enorme área que inclui ela própria, o Centro-Oeste, Sudeste, Sul do Brasil e a bacia Platina em nossos países vizinhos. Climatologistas renomados acreditam que, sem a floresta Amazônica, o Brasil e esses vizinhos seriam um semiárido, como a Caatinga ou o Cuyo da Argentina.

Independentemente de nosso grau de convencimento sobre essa teoria, parece inquestionável que as abundantes chuvas de verão (de outubro a abril) sobre grande parte do Brasil, Paraguai, Uruguai e leste da Argentina devem-se principalmente aos rios voadores originários no oeste da Amazônia, os quais só ocorrem porque a floresta existe.

A Caatinga – bioma frágil por ser semiárido e, portanto, incapaz de se regenerar naturalmente – também foi devastada ao longo dos séculos. Tanto sua cobertura inicial quanto seu nível pluviométrico são espacialmente variáveis. O índice de precipitação varia de 300 mm a 800 mm, sendo mais elevado no agreste – a área de transição entre a mata Atlântica e o interior seco, que os nordestinos chamam sertão.

O próprio sertão contém biomas distintos: seridó, curimataú, carrasco e o cariri – que é a caatinga de vegetação menos rústica. A Caatinga é o único bioma exclusivamente brasileiro. Parte de suas plantas só aparece ali – e elas são mais diversas do que se pensava.

## Aumentar área florestada

A Constituição Federal de 1988 impôs, ao poder público, o dever de cuidar do meio ambiente, nos seguintes termos: “Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.”

O desmatamento, na escala já atual, foi o maior dano que causamos a nosso meio ambiente. Em 2000, foi criado, pelo Decreto n. 3.240, o Programa Nacional de Florestas (PNF), cujos princípios, se realmente implantados, resolveriam grande parte do problema, pois prevê o fim do desmatamento e a reposição de parte das florestas destruídas.

No presente, as medidas preconizadas pelo PNF tornaram-se urgentes, por duas razões: i) inclui a preservação e recuperação da floresta Amazônica; ii) o aquecimento já ocorrido tem causado grandes problemas ao Brasil e a seu povo – e eles irão aumentar dramaticamente, mesmo que o aquecimento global não ultrapasse 2° C neste século.

O Brasil vem se aquecendo mais do que a média global, e no Centro-oeste o aquecimento já foi maior do que 2° C. Esse aquecimento pode chegar a 3° C, com máximos de temperatura ameaçadores a nosso povo, nossa fauna e flora. Grandes oscilações climáticas, como longas secas e períodos de chuvas excessivas – os quais já vivenciamos – vão se exacerbar.

Em 2015, o Brasil e muitos países fizeram o Acordo de Paris, comprometendo-se com medidas ambientais capazes de assegurar que o aquecimento não ultrapassasse 2° C, o qual se limitaria idealmente a 1,5° C até o final deste século. A presidenta Dilma apresentou medida com a contribuição espontânea do Brasil ao enfrentamento do problema. Segundo esse ato, criaríamos, até 2030, por replantio ou regeneração de florestas desmatadas, 12 milhões de hectares de florestas, equivalentes a área de quase metade do estado de São Paulo.

A presidenta Dilma não avaliou o custo do empreendimento. Posteriormente, essa estimativa foi feita: para fechar e deixar regenerar 70% dessa área na Amazônia e replantar 30% da mata Atlântica, seriam gastos cerca de R\$ 52 bilhões, distribuídos ao longo de 14 anos – parece muito, mas essa é de longe a maneira mais barata de retirar carbono da atmosfera.

Há, no Brasil, enorme potencial de aumento da silvicultura. Visando a promover esse setor, foi formulado, em 2018, o Plano Nacional de Desenvolvimento

de Florestas. Não é por falta de bons planos e programas que as ações efetivas não ocorrem. No governo, há quadros técnicos qualificados que se esforçam no estudo de nossos problemas ambientais e na proposição de soluções para eles.

Mas, nos últimos dez anos, houve clara desorganização da governança no Brasil, e, em anos mais recentes, ocorreu desmonte do Ministério do Meio Ambiente (MMA), que, por enquanto, torna impossível qualquer ação positiva de preservação de nossos biomas.

## Destinação de terras

O conhecimento que temos da situação de nossas terras é deficiente e varia de um bioma para outro. Sobre a Amazônia, dada sua enormidade e suas dificuldades de acesso, os dados mais valiosos vêm de imagens de satélite, monitoradas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que tem quadros científicos qualificados para essa função. Mas é importante investir mais em sua infraestrutura de monitoramento, para aumentar a precisão de seus dados.

Cerca de 20% da floresta foi desmatada, e cerca de um quarto desta está abandonado. Provavelmente, boa parte dessa área abandonada está em regeneração florestal, mas faltam dados sobre esse quadro. No Cerrado, segundo a Embrapa (2020), 49,4% da área primária estavam preservados; 29,9%, cobertos de pastagem; e 4,7%, cobertos de vegetação secundária (rebrotada).

O quadro mais amplo das pastagens plantadas no Brasil foi feito pela MapBiomas, rede colaborativa formada por organizações não governamentais (ONGs), universidades e *startups* de tecnologia. Segundo essa rede, as áreas de pastagens plantadas, em milhões de hectares (Mha), nos diversos biomas eram: Amazônia, 56,6; Cerrado, 47,0; mata Atlântica, 28,5; Caatinga, 20,0; Pantanal, 2,4.

Nos Pampas gaúchos, não há pastagens plantadas: a vegetação campestre é satisfatória para pastoreio. As frações desse bioma ocupadas por usos da terra foram detalhadas pelo MapBiomas em 2020: agricultura, 41%; vegetação campestre, 31%; floresta nativa, 13%; floresta plantada, 2%; rios, lagos, lagoas, 10%.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2017, nosso território era ocupado assim: vegetação natural, 66%; pastagem, 21%; agricultura (grãos, horticultura, fruticultura, silvicultura), 9%; áreas urbanas, 3,5%.

O exagero óbvio está na quantidade de terra destinada à pastagem. O qua-

dro dessas terras, segundo a MapBiomas, é mais atualizado (2020) e detalhado. Há, no Brasil, 154 Mha de pastagens plantadas, além de 46 Mha de campinas naturais dos pampas e do pantanal usados para pastoreio.

A boa notícia é que essa área tem diminuído e está hoje em melhor estado. Em 2000, 70% das pastagens tinham sinais de degradação, e esse percentual caiu para 53% em 2020. O pastoreio extensivo é o mais antieconômico uso da terra. Há outras formas mais produtivas e ambientalmente sustentáveis de se praticar a pecuária, como veremos.

## Nossa produção de alimentos

A produção de carne no Brasil aumentou incrivelmente no último meio século. Em 1975, ela era de apenas 3,4 Mt (milhões de toneladas) e destinada a uma população interna menor que consumia menos carne.

Essa produção subiu para 29,4 Mt no ano passado, distribuída assim: aviária, 14,3; bovina; 10,4; suína, 4,7. A população brasileira consome mais carne que a média de outros países, e o Brasil é o maior exportador de carne do mundo.

O aumento da produção de carne aviária e suína é sustentado por nossa produção de grãos, e, hoje, nosso setor granjeiro tem tecnologia no estado da arte. Já a produção de carne bovina é baseada em regime de pasto. A qualidade das pastagens melhorou, e sua área aumentou absurdamente – embora essa elevação venha perdendo força ultimamente.

A produção de carne bovina e de leite contribui desproporcionalmente para o aquecimento global, pois a digestão dos ruminantes produz grande quantidade de  $CH_4$ , cujas moléculas – vale enfatizar – são 50 vezes mais poderosas em sua contribuição para o efeito estufa do que as de  $CO_2$ , com a atenuante de que permanecem menor tempo na atmosfera.

A produção brasileira de carne de boi é feita por número excessivo de reses. Produzimos 10,4 Mt de carne e temos 218 milhões de cabeças de gado, enquanto os EUA (o maior produtor mundial) produzem 12,6 Mt e têm 93,8 milhões de cabeças. Parte importante dessa diferença está na qualidade genética do rebanho norte-americano; outra parte, na alimentação de seu gado – hoje, quase toda à base de grãos, o que acelera a produção de carne.

Em princípio, o regime de pasto é melhor, pois a alimentação bovina por grãos tem externalidade importante, a saber: os GEE emitidos na produção dos grãos que os alimentam. Por isso, no Brasil, governo e pecuaristas divulgam-

nosso produto como 'carne verde'. Isso, por enquanto, é falso, mas a perspectiva é a de que se torne verdade inegável, como consequências de ações já em andamento e economicamente viáveis, que discutiremos mais adiante.

Não menos expressivo foi nosso aumento na produção de alimentos vegetais – principalmente, a de grãos. Segundo a Embrapa, de 1977 a 2017, nossa produção de grãos saltou de 47 Mt para 237 Mt, enquanto a área plantada aumentou 60%. Ano passado, essa produção foi de 268 Mt, em uma área de 71,8 Mha.

A tecnologia agrícola no Brasil tem sido há bom tempo a que avança mais rapidamente no mundo. O grande marco desse avanço foi a criação da Embrapa em 1973, que desenvolveu *ab initio* tecnologias agrícolas para os trópicos e o nosso solo poroso. Pesquisadoras como Ana Maria Primavesi (1920-2000) e, principalmente, Johanna Döbereiner (1924-2000) foram pioneiras importantes nessas tecnologias.

A pesquisa de Primavesi contribuiu decisivamente para a tecnologia do plantio direto (sem aração do solo), e Döbereiner é mundialmente reconhecida por suas contribuições à ciência e à técnica de fixação biológica de nitrogênio no solo, que, no clima e solo brasileiros, é mais eficiente do que em qualquer lugar do mundo.

Um exemplo ilustra isso. Os EUA são reconhecidos por sua tecnologia de produção de grãos. Mas cada tonelada de milho produzida no Brasil consome 28% menos adubo nitrogenado (o mais caro) do que a nos EUA.

No caso da soja, essa diferença é ainda maior e crescente. A produtividade dessa planta no Brasil é mais alta do mundo (média de 3,3 t/ha), com produtores chegando a 5 t/ha em escala comercial.

A produtividade média do milho nos EUA é de 8,48 t/ha, mais alta do que a no Brasil (5,53 t/ha). Mas, em nosso país, ainda há produtores que usam tecnologia antiquada, e 75% de nosso milho são produzidos na segunda safra (a safrinha), quando há menos sol e chuva.

Além do mais, o milho é cultivado no Brasil em todo o território, enquanto nos EUA só é plantado no *corn belt*, região de terras caras e férteis. Fora qualquer outra consideração, cada hectare no Brasil produz mais grãos por ano do que em qualquer parte do mundo, pois temos duas safras por ano.

Em lavoura irrigada, produzimos três safras por ano ou cinco delas a cada dois anos, em sistemas de rodízio ecologicamente saudáveis. O plantio direto nunca deixa nossos solos expostos ao sol e à chuva. Isso poupa cerca de um quarto da água em comparação com outros métodos, bem como reduz a erosão e preserva a biologia do solo.

## Alimentos e mudanças climáticas

O aquecimento global terá efeito negativo na produção de alimentos de quase todo o mundo. Alguns, de clima temperado, ganharão, com destaque para a Ucrânia, que, com seu solo incrivelmente fértil, pode voltar a ser o celeiro de grãos da Europa.

Nas regiões tropicais, a previsão é de que as temperaturas se elevem acima da média. Em locais como o Mato Grosso e outras partes da franja sul da floresta Amazônica, a temperatura durante parte do dia pode superar o tolerável para cultivares atuais, o que inviabilizaria sua produção. A Embrapa e os climatologistas apontam que, se não forem tomadas medidas adaptativas, a produção de alimentos no Brasil pode reduzir-se 30% em poucas décadas.

O aviso está dado: medidas adaptativas, enérgicas e continuadas são necessárias para garantir a sustentabilidade da agricultura brasileira por causa das mudanças climáticas.

Mas a expectativa é a de que nos adaptaremos bem a essas mudanças – pelo menos, em seus cenários mais prováveis – e que nossa produção de alimentos irá crescer. Essa expectativa é compartilhada não só pela Embrapa e pelo Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), mas também por organizações internacionais, como a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO).

Nas próximas décadas, haverá grande aumento na demanda de alimentos, decorrente do crescimento populacional e aumento da renda dos países pobres e emergentes. A expectativa (aqui e no exterior) é a de que o Brasil possa atender fração considerável dessa demanda adicional.

Ambientalistas e ONGs voltadas para a defesa do meio ambiente têm posições de reserva diante desse quadro e temem que ele leve a pressões de parte dos agricultores para expansão das áreas de cultivo na Amazônia e outras áreas sensíveis. A preocupação é justificada, e temos de ficar atentos.

## Medidas adaptativas viáveis

O nível de aquecimento global atual tem trazido extremos climáticos, como ondas de calor intenso e períodos de excesso ou escassez de chuva, os quais trazem tanto inundações quanto déficits hídricos. Esses extremos tendem a se agravar.

Essa expectativa leva à necessidade de medidas que envolvem investimentos, tecnologia e vigilância ambiental, com penalidades a infratores.

Independentemente do aquecimento global, o excessivo desmatamento já feito reduziu o número e vigor das nascentes de água, com redução e falta de firmeza do fluxo de nossos mananciais. Nosso Código Florestal prevê reflorestamento às bordas das nascentes e replantio de matas ciliares às margens de nossos cursos de água, mas a adoção dessas medidas tem sido ou postergada, ou ignorada. A pressão da bancada ruralista no Congresso é forte, e nem sempre tem posições ambientais positivas.

Órgãos do governo e o empresariado agrícola de maior visibilidade pública têm plena consciência de que o aumento de nossa produção de alimentos tem de se basear em práticas agrícolas intensivas, com as quais passemos a produzir mais em menor área.

A pastagem extensiva é o destino menos produtivo e lucrativo que se pode dar à terra, e aponta-se, com fundamento e lógica econômica, que devemos transformar grande parte de nossas pastagens em florestas ou em áreas de cultivo mais produtivo –por exemplo, áreas de integração lavoura-pecuária-floresta que abordaremos a seguir.

## **Integração lavoura-pecuária-floresta**

A integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) é uma estratégia de produção que se adapta bem a nosso clima e solo e que traz resultados positivos. Ela começou a ser investigada pela Embrapa na década de 1990, e os primeiros resultados chamaram a atenção de agricultores e empresas privadas, que passaram a colaborar em seu desenvolvimento tecnológico.

Em 2012, foi criada a Rede ILPF, associação da Embrapa com setores empresariais. Na página dessa rede, a ILPF é definida como “uma estratégia de produção que integra diferentes sistemas produtivos, agrícolas, pecuários e florestais dentro de uma mesma área”. A integração pode envolver lavoura-pecuária (ILP), pecuária-floresta (IPF), lavoura-floresta (ILF) ou integração total (ILPF).

Ano passado, já havia, no Brasil, 17 milhões Mha com produção em sistemas integrados (80% dos quais ILP), e o objetivo da rede é que essa área seja de 35 Mha em 2030.

O ganho de produtividade com o sistema ILP é enorme. Em dada área, produz-se safra de verão de milho ou soja por plantio direto. Quando a área de cul-



tivo atinge certa maturidade, semeia-se nela uma ou duas variedades de capim, que, na entressafra, pode alimentar até nove vezes mais cabeças de gado do que a área igual de pastagem convencional, pois o capim usa os restos de adubo da lavoura e se beneficia de outros efeitos da lavoura, como o arejamento do solo.

Esses dados referem-se a experimentos da Embrapa, mas, em áreas de cultivo comercial, os resultados não ficam longe desse limite técnico.

## Integração, silvicultura e reflorestamento

A silvicultura no Brasil é bastante desenvolvida. Começou com o cultivo do eucalipto trazido da Austrália, que aqui se tornou mais produtivo do que em sua região de origem. Segundo o IBGE, em 2017, havia, no Brasil, 9,85 Mha de florestas comerciais plantadas, que respondem por três quartos de nossa produção de madeira.

Nossa silvicultura concentra-se principalmente no cultivo de eucalipto (75,2%) e pinus (20,6%), ambos usados principalmente na produção de carvão vegetal (12,4%) e celulose. Esse plantio concentra-se nas regiões do Cerrado e da mata Atlântica.

Em 2016, o Brasil foi o 2º maior produtor mundial de celulose, mas ficou em 8º lugar na produção de papel. A alta produção de celulose reflete vantagem da produtividade de nossa silvicultura, resultante de nosso clima. Tanto o pinus quanto o eucalipto permitem o primeiro corte entre os seis e sete anos após o plantio – tempo menor do que aquele de outros grandes países silvicultores.

Mas nossa produção relativamente baixa de papel é mais um exemplo de nossa tradição de vender *commodities* sem lhes agregar valor. O Brasil poderia ser grande produtor de papel, e, com isso, gerariamos emprego e riqueza.

Como resultado do esforço, tanto de empresas privadas quanto órgãos públicos, a silvicultura brasileira é tecnologicamente avançada. Tem havido trabalho bem-sucedido de melhoramento genético convencional e clonagem dos melhores espécimes. Mas a criação de espécies arbóreas geneticamente modificadas será realidade futura, e o Brasil não pode ficar esperando o futuro acontecer, pois nossos concorrentes irão desenvolver árvores mais adaptadas aos climas deles, não ao nosso.

Portanto, é importante fazermos pesquisas para a criação de árvores geneticamente modificadas adaptadas a nosso clima.

A integração fruticultura-floresta é prática antiga no Brasil. Todo o cacau

produzido na Bahia é cultivado sob áreas da mata Atlântica, depois da retirada da vegetação subarbórea. O cultivo do cacau naquele estado entrou em crise por causa da vassoura-de-bruxa e teve de ser reiniciado depois do desenvolvimento de variedades da planta resistentes à praga. Nesse ínterim, seu cultivo teve início na floresta Amazônica, que se transformou na nova fronteira do cacau.

O Pará é o maior estado produtor de amêndoas de cacau, e essa produção pode aumentar. O climatologista e conservacionista Carlos Nobre vem, há longo tempo, pregando o que ele chama Amazônia 4.0. Nesta, o desenvolvimento da região seria feito com base na industrialização local dos produtos da floresta, o que lhes agregaria grande valor.

Sobre o cacau, é oportuno citar literalmente o que ele escreveu em 2020: “Mas a produção é feita no modo *commodity*, em que o valor aproximado de 1 quilo da amêndoa gira em torno de R\$10, enquanto o quilo do chocolate fino, de amêndoa fermentada, sai a R\$ 200 ou R\$ 300.”

Afirmção semelhante se poderia fazer sobre o açaí. Hoje, a exportação de sua polpa rende US\$ 2 bilhões. Quanto produto fino pode ser produzido com essa polpa e quanto a Amazônia e o Brasil ganhariam com todo ele? É bom lembrar que o cupuaçu, nativo da Amazônia, também produz chocolate apreciado.

O café é outra fruta importante que se desenvolve bem sob sombreamento e, nessas condições, produz café mais fino, porque o amadurecimento dos frutos é mais sincronizado. A Embrapa desenvolveu variedades de café adaptadas ao clima amazônico, e elas têm sido cultivadas em Rondônia.

Há duas espécies de café, o arábica, que produz bebida mais fina, mas não se adapta a altas temperaturas, e o conilon, apto para locais quentes. Depois de desenvolver o conilon para plantio na sombra da floresta amazônica, a Embrapa teve sucesso também em desenvolver o arábica apto para esse tipo de cultivo.

A IPF também demonstrou ser estratégia de integração ecológica e lucrativa. Em nossas regiões mais quentes e iluminadas, as gramíneas desenvolvem-se bem em área parcialmente sombreada. A experiência mostrou que o plantio de árvores em até um terço do terreno não compromete a produção do pasto.

Esse consórcio traz benefício para as duas culturas e também melhora a saúde e produtividade do gado, que fica protegido do vento, impacto direto das chuvas fortes e das grandes oscilações de temperatura. A figura 2 mostra área de pasto com faixas plantadas de eucalipto.



**Figura 2. A floresta dá conforto térmico ao gado** CRÉDITO: SENAR.ORG.BR

## Expansão da irrigação

O Brasil irriga pouco, embora sejamos o país do mundo mais rico em água, e a irrigação seja capaz de nos trazer benefícios insuperáveis. Segundo a FAO, os países que mais irrigam no mundo são: China, 70 Mha; Índia, 70 Mha; EUA, 26,7 Mha; Paquistão, 20 Mha; Irã, 8,7 Mha; Brasil, 8,2 Mha.

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) elaborou o *Atlas da Irrigação: uso da água na agricultura irrigada* (2ª edição, 2021), trabalho detalhado sobre a irrigação em várias regiões do Brasil, com as culturas irrigadas em cada um deles.

A obra contém também levantamento de áreas propícias à irrigação no país, informação útil para a ampliação de nossa área irrigada, essencial para nossa adaptação às mudanças climáticas.

As áreas adicionais irrigáveis nas cinco regiões brasileiras, sem abertura de novas áreas agrícolas, são mostradas na tabela 1. Como efetivas para irrigação são consideradas áreas com: i) aptidão do solo alta ou média; ii) aptidão do relevo alta ou média; iii) alta qualidade logística (infraestrutura, escoamento, energia elétrica).

## ÁREA ADICIONAL IRRIGÁVEL (em Mha)

REGIÃO	TOTAL	EFETIVA
Norte	11,287	0,294
Nordeste	3,321	0,279
Sudeste	12,938	2,593
Sul	8,599	4,293
Centro-Oeste	19,707	6,227
<b>Brasil</b>	<b>55,851</b>	<b>13,687</b>

**Tabela 1. Área adicional irrigável no Brasil, segundo a ANA** CRÉDITO: ANA

Vê-se que, com a logística existente, há, no Brasil, 13,687 Mha com solos irrigáveis de aptidão alta ou média. Ou seja, sem outros investimentos em infraestrutura e com disponibilidade local de energia elétrica, nossa área de plantações irrigadas poderia saltar de 8,2 Mha para 21,9 Mha, o que nos tornaria o 4º maior país do mundo em área de agricultura irrigada – com investimento em infraestrutura, o aumento da irrigação seria bem maior.

Vale destacar o enorme ganho de produtividade obtido com a irrigação, bem como a segurança que ela dá em caso de escassez hídrica. No caso da soja, a irrigação aumenta a produção em 1,2 t/ha a 1,8 t/ha (de 36% a 54%). Para o milho, o aumento varia de 3 t/ha a 5 t/ha (57% a 95%). Há produtores em sistemas comerciais que produzem até 15 t/ha de milho em lavoura irrigada por pivô central.

O custo do hectare de lavoura irrigada é bem mais alto do que o de lavoura de sequeiro, mas o ganho de produtividade supera com sobra a diferença. Portanto, a irrigação dá lucro e justifica-se por lógica puramente econômica.

No caso do arroz (planta semiaquática), a irrigação traz aumento singular de produtividade. Os melhores resultados são obtidos pela irrigação por inundação. No Brasil, a produtividade média do arroz obtido por esse método de plantio é 7,13 t/ha, enquanto a do arroz de sequeiro é de apenas 2,35 t/ha. O Brasil planta 1,3 Mha de arroz irrigado, sendo 72,9% (936 mil ha) no Rio Grande do Sul, 11% em Santa Catarina e 8,4% no Tocantins.

A decomposição da vegetação morta inundada emite grande quantidade de metano. Melhor manejo – que inclui retirada de parte dessa vegetação antes de

se inundar – reduz essa emissão de carbono. Mas, mesmo na Índia, país que mais investiga esses avanços desse cultivo, na prática, essa técnica é pouco usada.

Ambientalistas costumam criticar nossa irrigação do arroz. Porém, essa postura tem de ser vista em contexto mais amplo. O Brasil não é vilão nesse campo. Enquanto plantamos 1,3 Mha de arroz irrigado, a Ásia planta 90 Mha. O Brasil só planta arroz para consumo interno, e esse cereal é uma das bases da dieta do brasileiro, como ocorre também na Ásia.

No Brasil, há outras práticas que geram mais emissão de metano que o cultivo do arroz. Por exemplo, em nenhuma de nossas hidrelétricas, a vegetação foi retirada antes do enchimento dos lagos represados. Caso emblemático: o lago da hidrelétrica de Tucuruí, inaugurada em 1984, inundou 285 mil ha de floresta Amazônica, e, até hoje, os restos dessa massa verde seguem emitindo esse gás.

A irrigação do arroz no Rio Grande do Sul afetou os cursos d'água e as lagoas da região. Isso poderia ser evitado, pois o rio Uruguai, próximo da região dos arrozais, tem água que não é usada para outro fim a jusante da região. Quanto custaria canalizar água desse rio para a região dos arrozais?

## **Tecnologia espacial, meio ambiente e agricultura**

A preservação ambiental depende do monitoramento de nossos biomas e do uso de tecnologias modernas na agricultura. Ferramenta essencial para atingir esses objetivos é a utilização de sistemas baseados em satélites.

O emprego dessa ferramenta pelo INPE, para monitoramento do desmatamento e das queimadas na Amazônia, vem sendo feita há 40 anos e tem recebido atenção ultimamente. Mas, embora satélites de monitoramento tenham também sido empregados pela Embrapa em aplicações para a agricultura, seu uso para automação e aperfeiçoamento da atividade agrícola ainda é incipiente no país.

No programa espacial europeu, satélites rastreiam o gado com alta resolução, dirigem máquinas agrícolas com precisão e de forma autônoma no campo e ajudam agricultores a reduzir o uso de agroquímicos.

A atividade do INPE no monitoramento da floresta Amazônica é reconhecida nacional e internacionalmente por sua independência na divulgação de dados de alta qualidade e confiabilidade. Em artigo publicado em 2015 na *Environment Research Letters*, sobre as necessidades de medida e monitoramento para

cumprir os compromissos – acordados na Conferência de Paris – de redução de emissões por causa do desmatamento e da degradação de florestas, Scott Goetz e coautores afirmam:

“Uma série de programas nacionais baseados em satélite para monitoramento da perda de cobertura florestal já está operacional. O padrão até o momento para monitoramento nacional é o Projeto de Monitoramento do Desmatamento da Amazônia (PRODES) do Brasil, e dados associados produzidos e distribuídos pelo seu Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O INPE fornece atualizações anuais de desmatamento para os estados da Amazônia legal, incluindo mapas digitais espacialmente detalhados. Enquanto outros países também têm programas de mapeamento de desmatamento baseado em satélite (por exemplo, Austrália e Índia), eles não fornecem mapas para o público como o INPE faz.”

De fato, o INPE começou a se capacitar na recepção, no tratamento e na utilização de imagens já na década de 1970, sendo o Brasil o 3º país do mundo a receber e processar imagens dos primeiros satélites de sensoriamento remoto – em particular, o Landsat-1.

O desenvolvimento do sistema Prodes foi iniciado no fim da década de 1980, e, a partir de 2004, o INPE desenvolveu o sistema Deter de alertas diários de degradação e desmatamento da floresta Amazônica. A partir de 2015, esse instituto federal expandiu o monitoramento por satélite para os outros cinco biomas, começando pelo Cerrado, com recursos de projeto financiado pelo Fundo Amazônia.

Além desses programas de monitoramento, o INPE desenvolveu o importante programa TerraClass para acompanhamento da ocupação e destinação das áreas desmatadas na Amazônia. Infelizmente, esse programa foi descontinuado em 2016, por falta de recursos orçamentários. Característica importante dos programas do INPE é o desenvolvimento nacional dos métodos e instrumentos usados nessas atividades, de códigos de processamento de imagens a satélites utilizados em sua coleta.

Em 1988, o INPE celebrou acordo com a Chinese Academy of Space Technology (CAST), para desenvolvimento de satélites de monitoramento da Terra – os famosos satélites CBERS (China-Brazil Earth Remote Satellites). O programa teve grande êxito: seis satélites foram lançados, e dois ainda estão em operação (CBERS 4 e CBERS 4A). Esse programa foi relevante não só para o domínio soberano das imagens de monitoramento de nossos biomas, mas também para alavancar a indústria espacial brasileira.

Infelizmente, a capacidade de monitoramento de nossas florestas e diferentes biomas está seriamente ameaçada. Os recursos orçamentários e de pessoal para o INPE desenvolver essas atividades têm diminuído nos últimos anos. Com a denúncia unilateral do Projeto Amazônia pelo governo brasileiro, a principal fonte de recursos não orçamentários foi estancada. Isso ocasionou o término do programa de monitoramento do Cerrado.

Além disso, o governo federal não renovou o acordo de colaboração com a China para dar continuidade ao Programa CBERS e não aprovou recursos o programa de desenvolvimento do satélite Amazônia 2, projetado e construído pelo INPE.

O governo federal pretende transferir toda a atividade de monitoramento da Amazônia para novo organismo, sob a liderança do Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (Censipam). Mesmo reconhecendo seus bons serviços com relação ao sistema de vigilância da Amazônia, deve-se apontar que esse centro é órgão militar – vinculado ao Ministério da Defesa – que não tem como missão o monitoramento amplo de desmatamento; não prioriza o desenvolvimento de tecnologia nacional; não disponibiliza abertamente seus dados; e não tem a respeitabilidade internacional auferida pelo INPE.

Portanto, caso essa medida se concretize, os dados sobre o monitoramento de nossos biomas provavelmente deixarão de ter divulgação aberta, ampla e irrestrita, como ocorre atualmente. Com isso, o Brasil perderá seu protagonismo internacional em monitoramento do meio ambiente – o qual, infelizmente, vem decrescendo nos últimos anos.

Para preservação do meio ambiente e produção sustentável de alimentos, é essencial usar tecnologias modernas na agricultura – em particular, sistemas de satélites para monitoramento e plantio de precisão.

Felizmente, as primeiras iniciativas nessa direção já vêm sendo tomadas no país. Cientistas da Embrapa desenvolveram metodologia para o monitoramento por satélite (de forma remota e automática) da expansão das áreas com sistemas integrados de produção agropecuária – em particular, áreas com duplo cultivo e ILP, anteriormente mencionada.

Essa metodologia está sendo ajustada para as demais modalidades: IPF, ILF e ILPF. Mas o uso de satélites na agricultura de precisão – tanto para planejamento da distribuição de fertilizantes quanto controle remoto de máquinas agrícolas – ainda está distante do que vem sendo feito em outros países com agricultura bem desenvolvida. Além disso, não há articulação proativa entre órgãos do governo que atuam no setor.

Na Índia, por exemplo, em 2012, o Departamento de Agricultura estabeleceu centro para operacionalização da tecnologia espacial desenvolvida na Indian Space Research Organization para previsão da produção agrícola. Segundo a revista britânica *Farmers Weekly*, cerca de 60% das terras agrícolas da Grã-Bretanha já estão sendo gerenciadas por sistemas de sensores, análises, câmeras e drones. Nessa iniciativa, satélites têm papel importante a desempenhar no que foi aclamado como a “ascensão da fazenda inteligente” – mudança para o controle preciso da produção de alimentos, permitindo que agricultores produzam mais com menos.

A redução da emissão de gases do efeito estufa, a preservação do meio ambiente (em particular, a redução drástica do desmatamento e exploração predatória da floresta Amazônica) e o desenvolvimento de agricultura ainda mais moderna são ações integradas que devem fazer parte da política de desenvolvimento sustentável do país.

Tecnologias baseadas em sistemas de satélite estão ganhando importância nessas atividades. De fato, com o desenvolvimento de satélites de pequeno porte (menos que 100 kg, dimensões de poucas dezenas de cm e câmeras multiespectrais de alta resolução), o custo desses sistemas tem se reduzido nas duas últimas décadas. Isso representa enorme janela de oportunidades para o Brasil.

Mas, para que isso seja viabilizado, é crucial resgatar o papel do INPE, não só no que diz respeito ao monitoramento de nossos biomas, mas também relativo ao desenvolvimento da tecnologia espacial, em parceria com empresas brasileiras do setor, como a Visiona.

Além disso, é preciso pôr em prática estratégia integrada de uso civil da tecnologia espacial, envolvendo diferentes ministérios, como Ministério da Ciência Tecnologia e Inovações, Ministério do Meio Ambiente, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, bem como Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços.

## Contribuição da física

A preservação de nosso meio ambiente requer instrumentação diversa para monitoramento de desmatamento, incêndios e enchentes, bem como mapeamento de nossos aquíferos.

A interconexão subterrânea de rios e outros mananciais pode ser feita por meio de marcadores radioativos. Para irrigação otimizada, é preciso medidores



do perfil de umidade do solo. Grandes avanços na agricultura podem ser alcançados pela investigação da estrutura do solo, campo desafiador e ainda incipiente. A administração dos recursos hídricos envolve modelagens complexas.

O trabalho de físicos – na maioria das vezes, em colaboração com especialistas de outras áreas – é importante para o enfrentamento de todas essas questões. Dois exemplos ilustrativos são a colaboração de pesquisadores do CBPF com a Embrapa Alimentos – para desenvolver dispositivo de detecção de feijão transgênico – e a Embrapa Solos, para o desenvolvimento de dispositivo de medidas de condutividade hidráulica do solo.

## RECOMENDAÇÕES


**Promover** a recuperação de nossas florestas nos termos contemplados pelo Acordo de Paris: regeneração ou replantio de 12 Mha nas florestas Amazônica e Atlântica até 2030.

**Ampliar** significativamente nossa área de plantações irrigadas, para dar mais previsibilidade às nossas colheitas e aumentar sua produtividade.

**Fazer** obras de recuperação de nossos mananciais, como reflorestamento das nascentes e plantio de matas ciliares, nos termos previstos no Código Florestal.

**Reduzir** significativamente a área de pastagem extensiva, convertendo parte dela em florestas, adotando, no restante, práticas de integração com lavouras e florestas (ILPF e IPF), para as quais o Brasil já tem excelente tecnologia.

**Fortalecer** o sistema de observação por satélites do INPE para monitoramento das florestas e do Cerrado e dar suporte ao crescimento da agricultura de precisão.



# Mudanças climáticas: transição energética

## Energia limpa barata

O aquecimento global acelera-se, e a gravidade de suas consequências vem se mostrando mais severa do que o previsto. Mas a divisão do mundo em nações soberanas competindo entre si tem inviabilizado as soluções para esse problema planetário, pois o custo destas últimas – parte das quais já disponíveis – é mais alto do que os governos querem pagar.

Felizmente, o avanço tecnológico está nos trazendo a solução (e, com ela, a esperança), a qual só políticas desastrosas podem frustrar. Ocorre que o custo da eletricidade limpa, produzida pela luz do sol ou força do vento, vem caindo rapidamente. Hoje, ele já está abaixo do custo da eletricidade gerada por energia fóssil, e a queda de custo segue incessante.

Tudo se deu tão rapidamente que não se percebeu o que estava ocorrendo. Entre 2010 e 2020, o custo da energia fotovoltaica caiu por um fator de cinco, e o das baterias eletroquímicas usadas em carros elétricos, mais rapidamente, por um fator de nove na década.

A energia elétrica é a que pode ser transformada em movimento ou trabalho mecânico com maior eficiência e menor custo. Em 2024 ou 2025, um carro elétrico custará menos do que outro de combustão interna, movido a petróleo ou biocombustíveis, e a diferença de custos irá crescer.

Com esses avanços o aquecimento poderá ser revolido, em prazo, talvez, menor do que o previsto, não por racionalidade política, mas, sim, por lógica econômica: poluir ficou mais caro do que não poluir. E essa mudança trará ainda outros benefícios: maior crescimento econômico e geração de postos de trabalho bem pagos. A solução da crise climática não irá gerar estagnação, mas, sim, mais prosperidade.

A geração de energia envolverá enorme número de produtores, alguns produzindo eletricidade apenas para consumo próprio. Nesse sistema, complexo e dinâmico, o custo da eletricidade dependerá do balanço entre oferta e demanda a cada momento, o que vai requerer medidores de consumo e redes de distribuição mais inteligentes, redundantes e monitorados, para que o abastecimento fique estável.

Legislações específicas terão também de ser pensadas, negociadas e estabelecidas, o que exigirá ação do poder público. Iniciativas ágeis e criativas dos governos, tanto no fomento às mudanças quanto nos campos jurisdicional e de controle do sistema energético, agilizarão essas mudanças e as tornarão mais harmoniosas.

A geração distribuída de energia, de produção intermitente, exigirá seu armazenamento em larga escala, para estabilizar o fornecimento.

Por fim, vale ressaltar que a produção, estabilização, transmissão e distribuição dessa energia elétrica será problema complexo e sensível cuja solução demandará ferramentas da ciência dos dados e inteligência artificial.

## Lei de Wright, tecnologia e preços

40

O preço de quase todas as coisas (exceto o do trabalho) cai com o tempo. Alimentos, aço, cimento, produtos químicos, televisores, geladeiras etc., tudo tem preço decrescente.

Isso é mais perceptível em produtos recentes e de maior conteúdo tecnológico. Por exemplo, em processadores digitais, a queda é dramática e chama a atenção. O número de transistores de um circuito integrado duplica a cada dois anos, fato conhecido como lei de Moore – referência ao engenheiro norte-americano Gordon Moore.

A lei desconsidera aspecto essencial do fenômeno, o de que o custo dos circuitos, até recentemente, variou pouco no tempo. Assim, o desempenho dos processadores eletrônicos cresceu exponencialmente com o tempo, mas seu custo (normalizado pelo desempenho) caiu exponencialmente.

Crescimento exponencial só pode ocorrer em um transiente, pois, se continuado indefinidamente, leva a divergência. A lei de Moore está chegando a seu limite. Mas há lei mais fundamental, mais sustentável no tempo e que se aplica a todo produto tecnológico. Estamos falando da lei de Wright, formulada, em 1936, pelo engenheiro aeronáutico Theodore Wright: a cada duplicação acumulada do número fabricado de um modelo de aeronave, seu custo cai 15%.

Essa lei, redescoberta depois da lei de Moore, revelou-se válida para muitos produtos e, hoje, é assim enunciada: o custo de dado produto cai por um fator fixo cada vez que sua produção acumulada duplica.

A lei de Wright não relaciona o custo dos produtos ao tempo, mas, sim, à produção acumulada. Ela descreve o que se denomina curva de aprendizado. O fator fixo citado na lei é específico e característico de cada produto. Estudos envolvendo mais de 60 produtos mostram que ele varia de 0,75 a 0,90.

Consideremos um produto para o qual o fator de redução seja 0,80. Nesse caso, se o custo da 1.000ª unidade produzida foi X, o da 2.000ª será 0,80X; o da 4.000ª, 0,64X; e assim por diante.

A lei de Wright tem caráter quase universal. A lei de Moore decorre dela se a produção acumulada crescer exponencialmente com o tempo – como parece ter ocorrido com os microprocessadores. No fim da década de 1960, quando pisamos na Lua, havia, no mundo, centenas de computadores cujo tamanho era proporcional ao de uma geladeira e o custo estava na casa US\$ 1 milhão da época.

Hoje, há, no mundo, bilhões de computadores pessoais e um número maior de telefones móveis com custo que vai de centenas a milhares de dólares. Um telefone móvel modesto já supera em ordens de grandeza o poder de memória e processamento do maior computador comercial daquela época.

Isso tem levado a um círculo de retroalimentação em que a produção acumulada cresce em resposta à demanda, o que derruba o custo – como prevê a lei de Wright – e, por sua vez, aumenta o mercado.

## **Brasil: energia elétrica limpa**

A energia elétrica produzida no Brasil é uma das mais limpas do mundo. Sua matriz por fonte é mostrada na tabela 1. Esses dados foram obtidos na Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) em 30 de agosto do ano passado. Vê-se que 74,55% da energia elétrica brasileira vêm de fontes renováveis. Esse valor está subestimado, pois, na fatia das usinas termelétricas, está incluída a energia produzida pela queima do bagaço e outros resíduos de cana.

Segundo o portal Canal Energia, em 2020, as usinas de açúcar e álcool distribuíram, no Sistema Integrado Nacional (SIN), 4,77% da energia elétrica consumida no país. Somada essa contribuição, as energias renováveis respondem por mais de 79% da eletricidade consumida no Brasil.

## ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL EM GW

Valores outorgados e fiscalizados por tipo de fonte

TIPO	POTÊNCIA OUTORGADA	POTÊNCIA FISCALIZADA	NÚMERO	% DA POTÊNCIA FISCALIZADA
UHE	103,39	103,03	233	58,12%
PCH	7,14	5,50	540	3,10%
CGH	0,84	0,86	753	0,49%
UFV	29,69	3,50	4966	2,05
EOL	31,81	19,12	1090	10,79%
Total Renovável	172,87	132,01	--	--
UTN	3,34	1,99	3	1,12%
UTE	54,24	43,11	3191	24,32%
<b>TOTAL</b>	<b>230,45</b>	<b>177,11</b>	<b>--</b>	<b>100%</b>

42

**Tabela 1. Potência elétrica outorgada e fiscalizada no Brasil por tipo de fonte. Siglas: UHE (central geradora hidrelétrica); PCH (pequena central hidrelétrica até 5 MW); CGH (central geradora hidrelétrica de 5 MW a 30 MW); UFV (central geradora fotovoltaica); EOL (energia eólica); UTN (usina termonuclear) UTE (usina termelétrica) CRÉDITO: ANEEL**

A participação de energia renovável na produção de eletricidade brasileira tende a aumentar, pois a produção de energia fotovoltaica e eólica vem crescendo aceleradamente.

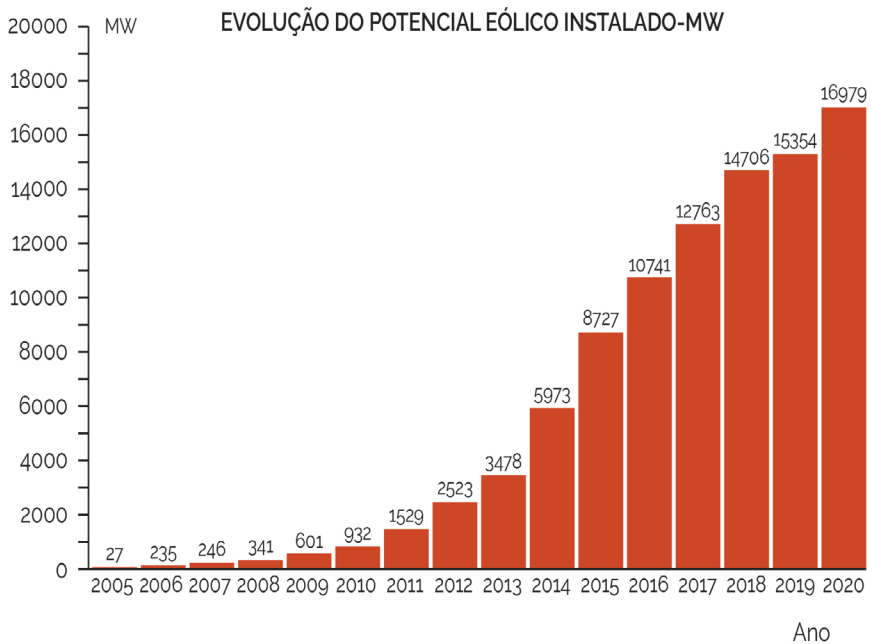
## Energia eólica no Brasil

Até recentemente, em termos mundiais, a energia do vento era pouco usada para gerar eletricidade. Mas a situação mudou na última década, como se vê na figura 1 para o caso do Brasil. A potência instalada cresceu de 932 MW, em 2010, para 16.979 MW, em 2020, o que é mais do que a potência instalada na Usina de Itaipu.

Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), a potência eólica instalada deve alcançar 28 GW até 2024. A potência outorgada pela Aneel já era 31,81 GW em agosto do ano passado, como mostrou a tabela 1.

O potencial eólico do Brasil é grande. Segundo estimativa da ABEEólica, o potencial em terra (*onshore*) é de 500 GW, e no mar (*offshore*) é maior, mas a instalação e manutenção de aerogeradores em água é cara.

É importante considerar que as fontes eólicas e fotovoltaicas são aleatoriamente intermitentes, com variações diárias e sazonais de potência. Os números mencionados sobre a potência instalada se referem à potência de pico dos geradores. A relação entre a potência média fornecida por ano e aquela instalada é denominada fator de capacidade (FC).



**Figura 1. Crescimento do potencial eólico instalado no Brasil**

CRÉDITO: ABEEÓLICA

O mapa dos ventos em terras brasileiras é mostrado na figura 2. Vê-se que os bons ventos (mais intensos) ocorrem principalmente na região costeira e no Centro-oeste – bons ventos varrem também todo o Rio Grande do Sul. Hoje, 80% da potência eólica instalada concentram-se no Nordeste.



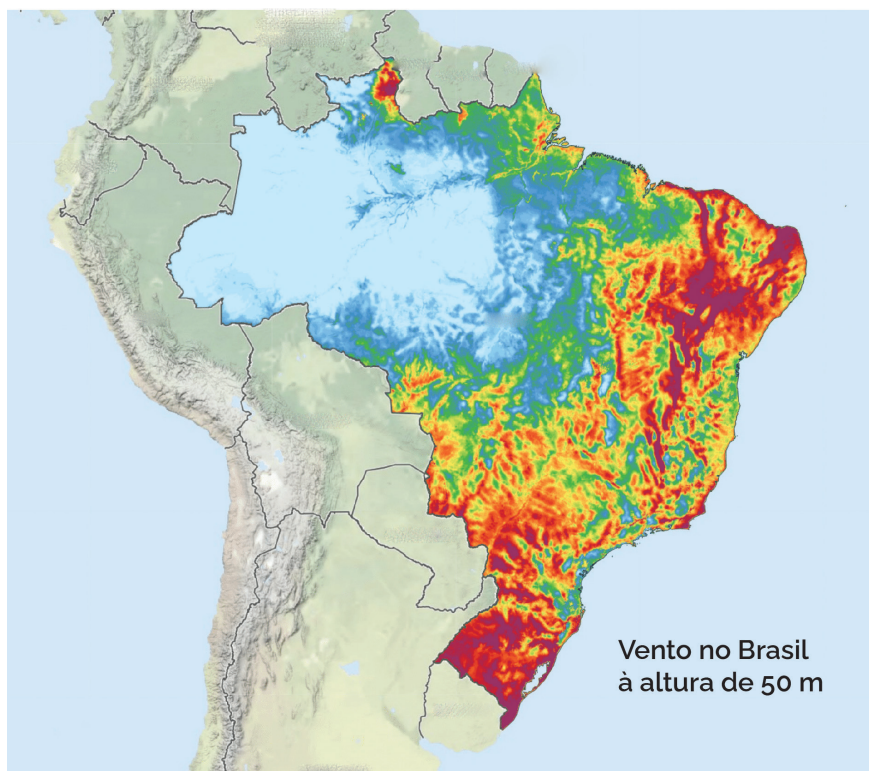


Figura 2. Mapa dos ventos no Brasil à altura de 50 metros; vermelho indica vento forte; azul, vento fraco FONTE: ADAPTADO DE WORLD WIND ATLAS

## Potencial eólico e tecnologia

Enquanto a tecnologia de eletricidade eólica avança, o potencial eólico cresce. Isso ocorre por duas razões. Novos aerogeradores operam sobre torres mais altas, onde o vento não só é mais intenso, mas também menos turbulento – e, por isso, aproveitável com maior eficiência.

A altura das torres e o comprimento das hélices do cata-vento atingiram novo patamar, com o uso recente de fibras de carbono para essas estruturas. Há também avanços na otimização da eficiência dos aerogeradores à medida que a velocidade do vento muda.

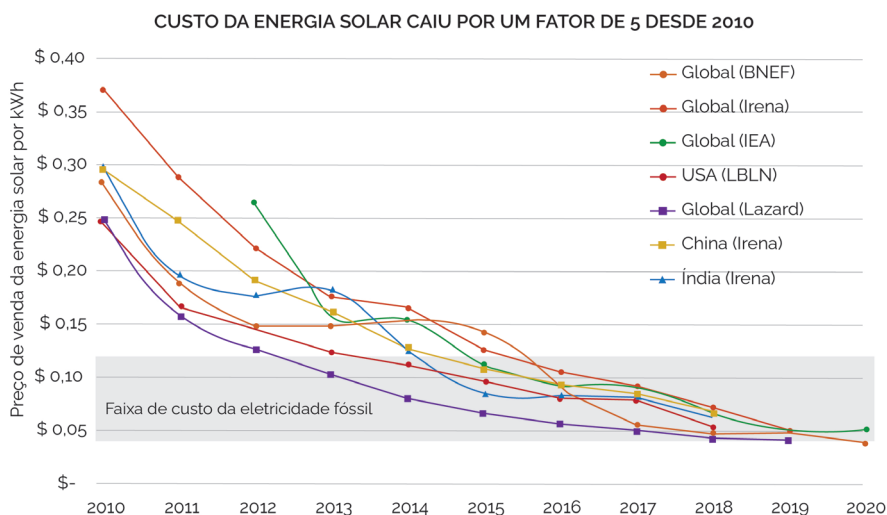
A estimativa do potencial eólico brasileiro em terra está ultrapassada e deve continuar crescendo. Também cresce o fator de capacidade: no Brasil, ele está



acima de 0,45. Para termos de comparação, o FC histórico de Itaipu é 0,80, e o de Belo Monte, 0,40. No caso das hidroelétricas, o FC não está associado a variações intermitentes diárias, mas, sim, sazonais e operacionais.

## Energia fotovoltaica

O custo da energia fotovoltaica – cuja evolução entre 2010 e 2020 é mostrada na figura 3 – reduz-se em ritmo inigualável no setor energético. Hoje, ela custa menos do que a energia eólica, e as duas custam menos do que a eletricidade de fonte hidráulica, fósil ou nuclear.



**Figura 3. Queda do custo da energia solar entre 2010 e 2020; na média (fontes diversas), o custo caiu por um fator de cinco e ficou igual ao menor custo verificado de eletricidade de fonte fósil** CRÉDITO: RAMEZ NAAN /HTTPS://BIT.

LY/3KZHPOM

Mas o Brasil, país enorme e de altíssima incidência solar, ainda é o 13º país produtor de energia fotovoltaica. Precisamos ter, no país, empresas produtoras de células fotovoltaicas para evitar a dependência de importação dessa *commodity*, que usaremos cada vez mais. Os países com maior potência instalada (em GW) são: China, 253; EUA, 73,8; Japão, 68,6; Alemanha, 53,7; Índia, 38,9; Itália, 21,5; Austrália, 17,3; Vietnã, 16,5; Coreia do Sul, 13,5; Reino Unido, 13,4; Espanha, 11,8; França, 11,2; Brasil, 11,0; Países Baixos, 10,2.

O Brasil deveria estabelecer como meta estar entre os três maiores produtores de energia fotovoltaica do mundo até 2040.

As células fotovoltaicas de silício dominam o mercado atual. Mas há pesquisas em busca de outras opções. Por exemplo, o uso de perovskitas, materiais atualmente mais estudados na busca da substituição das células de silício, por terem alta eficiência na conversão de luz em eletricidade.

A pesquisa na Coreia do Sul está avançada, e lá consegue-se, em laboratório, células de perovskitas com eficiência energética de aproximadamente 26%. O Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL), dos EUA, certificou célula com eficiência de 25,5%.

Cabe observar que células fotovoltaicas de perovskitas foram capazes de reter em média 90% de sua eficiência inicial, depois de 500 h sob iluminação padrão. Grupos de pesquisa no mundo vêm tendo sucesso em seus estudos. O Instituto Suíço de Tecnologia de Lausanne (EPFL) e o Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), nos EUA, alcançaram eficiências de 25,6% e 26,2%, respectivamente.

Essa é área de pesquisa importante para físicos e químicos atuarem. No Brasil, temos grupos nas universidades e nos institutos de pesquisa que já alcançaram eficiência superior a 18%.

As células de perovskitas, além de terem eficiência superior à do silício, são mais baratas e fáceis de produzir. As de silício precisam de alto grau de pureza desse elemento, o que acarreta consumo alto de energia em sua fabricação. A pureza do silício é importante, porque defeitos ou impurezas tornam-se armadilhas de elétrons que diminuem a eficiência.

Nas células solares de perovskitas, os defeitos não reduzem a eficiência. O processo de produção de perovskitas despende pouca energia, enquanto a produção de silício, muita.

Mas essas células não têm só vantagens, e há necessidade de pesquisa básica fundamental para vencer barreiras para disputar o mercado das células fotovoltaicas. O principal problema é sua baixa durabilidade, causada principalmente pela sensibilidade à água, que causa sua degradação.

Como em qualquer mudança, sempre encontramos barreiras a vencer. Nas células de perovskitas, temos desafios enormes. Para isso, precisamos formar contingente de recursos humanos dedicados a essa área.

## Armazenamento em larga escala

A energia termelétrica tem conveniências. Se quisermos, as usinas podem sempre operar com 100% da potência instalada, e a energia pode ser produzida no lugar e momento em que precisamos dela – desconsiderado o transiente envolvido na ativação das usinas. Pode também ser produzida próximo ao local de consumo.

Com a adoção das eletricidades eólica e fotovoltaica, essas vantagens são perdidas, o que tem de ser reparado. Linhas de transmissão (às vezes, extensas) têm de levar a eletricidade da usina ao local de consumo. Esse é problema para o qual o Brasil já se capacitou, pois a hidroeletricidade responde pela maior parte de nosso abastecimento.

Nossa extensa malha de redes de transmissão tem deficiências que geram frequentes quedas de energia – e isso deve ser resolvido. Mas EUA, Europa e China também têm enormes malhas de redes de transmissão e já encontraram as soluções para esse problema. No Brasil, as malhas podem ser adaptadas à nossa realidade sem tanta dificuldade – embora o investimento possa ser elevado.

A intermitência também ocorre com nossa energia hidrelétrica – nesse caso, as oscilações são compensadas com energia termelétrica, que queremos banir no longo prazo. A solução se dará por meio da acumulação em larga escala de energia.

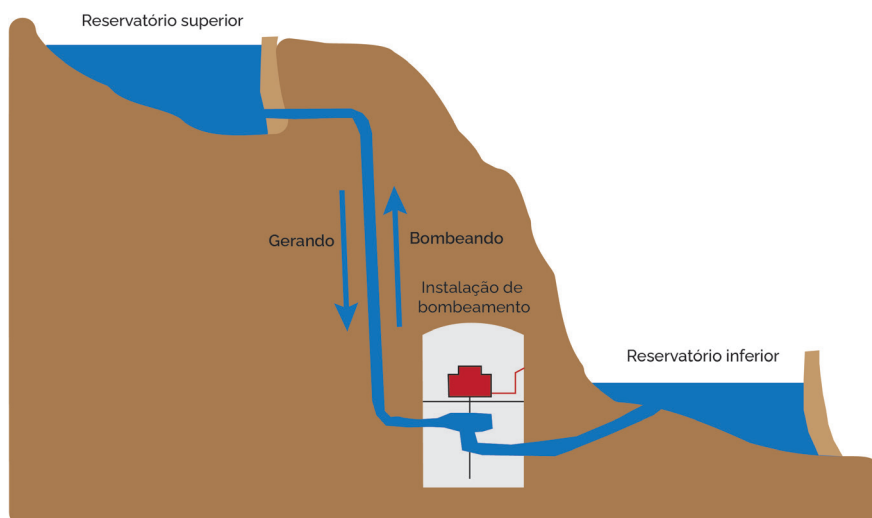
Os padrões de oscilação na produção das duas energias (eólica e fotovoltaica) limpas são distintos. No Brasil, os bons ventos vêm do Atlântico e são mais fortes à noite, quando a temperatura do continente diminui, à medida que a do oceano não se altera. Por isso, nossa produção de eletricidade eólica é maior à noite, quando o consumo é muito menor – e isso é ruim.

Há também variação com as estações. No Nordeste – região que, hoje, produz 80% da eletricidade eólica do Brasil –, os ventos são melhores no período junho-dezembro, quando a produção de energia hidrelétrica se reduz – e isso é bom. E a eletricidade solar só é produzida de dia, quando o consumo é maior – outro fator favorável. Portanto, no ciclo de 24h, as duas se complementam de modo a dar estabilidade na geração de energia.

Há duas maneiras conhecidas de acumular energia em larga escala. Uma é produzir hidrogênio pela eletrólise da água e reconvertê-lo em eletricidade em células de combustível. Esse procedimento envolve riscos, e nele perde-se fração elevada da energia elétrica inicial.

A Europa tem valorizado essa opção – talvez, por razões específicas: o Saara, próximo ao continente, tem insolação intensa. Então, é compensador fazer eletrólise da água por eletricidade fotovoltaica naquela região, transportar o hidrogênio para a Europa e convertê-lo em eletricidade – embora a perda de energia no ciclo completo exceda 60%.

Segunda maneira: acumulação de energia na forma de energia potencial da água, bombeada para reservatórios elevados. As Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) são o aparato usado para esse fim. Seu esquema de operação é mostrado na figura 4.



**Figura 4. Esquema de uma usina hidrelétrica** CRÉDITO: ENCYCLOPÉDIE DE L'ÉNERGIE

Quando há excesso de eletricidade na rede, a água é bombeada do reservatório inferior para o superior; quando há falta, deixa-se a água descer, gerando hidroeletricidade.

As UHR funcionam como baterias hidráulicas, que transformam energia elétrica em energia potencial gravitacional da água. No ciclo de bombeamento e descida da água, perde-se de 15% a 20% da energia puxada da rede. Mas como ela é puxada quando a eletricidade está a custo baixo, a operação tem sido não só economicamente viável, mas também gerado lucro para empresas que a exploram.

O uso de UHR tem crescido no mundo, e, em 2020, a capacidade global instalada era 127 GW. No Brasil, ela ainda não é usada, embora nosso potencial seja

grande nas montanhas do Sudeste. Seu uso tem de ser iniciado com urgência, porque a capacidade de nossas usinas termelétricas é pequena – e o propósito é bani-las, não aumentá-las.

Em termos mundiais, as UHR foram em geral projetadas para acumular energia por períodos curtos. Para armazenar energia por tempo mais longo, é necessário que o reservatório superior da usina tenha grande capacidade de acumulação de água.

Nesse sentido, o Brasil já está à frente. Nossas hidrelétricas têm reservatórios que somam enorme capacidade de armazenamento. Como nossas outras fontes de eletricidade são reduzidas, esse sistema tem sido usado de forma predatória. Nas secas – e, principalmente, em períodos de anos seguidos de pouca chuva –, o nível dos reservatórios de energia abaixa (às vezes, drasticamente), com inúmeros efeitos desastrosos.

A água de nossos rios tem sido encarada como fonte de eletricidade, mas ela tem outros usos, e é equívoco pensar que sua utilidade hidráulica seja a mais nobre. Exemplo extremo ocorreu no projeto de transposição do rio São Francisco. Previu-se a transposição de apenas 1,4% de sua vazão, pois se considerou necessário reservar o restante para geração de eletricidade nas usinas de Paulo Afonso, Xingó, Luiz Gonzaga e Apolônio Sales, que somam potência instalada de 8,92 GW.

Hoje, esse projeto de transposição é anacrônico. A eletricidade limpa produzida no Nordeste já supera a dessas usinas e será aumentada nos próximos anos. Fração bem maior da água do rio poderia ser transposta para essa região, o que traria enormes benefícios sociais e econômicos para mais de 50 milhões de pessoas.

Os reservatórios de nossas hidrelétricas convencionais podem ser usados como poderoso sistema para balancear oferta e consumo de eletricidade ao longo das estações e nos anos de escassez de chuva. Essa questão parece não ter sido investigada ainda, mas parece possível que todo o sistema possa ser operado de maneira a tornar as oscilações nos níveis dos lagos e no fluxo dos rios pequenos.

## **Redes de transmissão inteligentes**

A geração distribuída de energia elétrica exige alterações estruturais e tecnológicas das redes de distribuição e transmissão. O sistema tradicional,

com fontes grandes e localizadas, é referido como sistema vertical. A energia é produzida em grandes usinas geradoras que usam geradores síncronos como transdutores eletromecânicos, em tensões da ordem de dezenas de kV, e a tensão é elevada, na própria subestação de geração, a centenas de kV, por meio de transformadores.

Essa alta tensão alimenta as linhas de transmissão que transportam a potência elétrica para as subestações dos sistemas primários de distribuição, onde a tensão é reduzida para valores médios (normalmente, entre 10 kV e 30 kV).

Finalmente, nos transformadores de ponta das redes de distribuição, a tensão é baixada para os níveis utilizados pelos usuários, 127 V, 220 V ou 380 V, no caso do Brasil. Portanto, no sistema convencional a potência ativa flui em um só sentido (do gerador para o consumidor), e as redes de transmissão e distribuição têm caráter de elementos passivos no sistema elétrico.

No Brasil, as diferentes redes de transmissão estão interligadas no SIN, sistema com fontes geradoras primárias e tensões que vão de 138 kV a 750 kV (corrente alternada) e, ainda, duas redes de 600 kV e 800 kV (corrente contínua). Em um sistema de tamanha complexidade, é importante garantir tanto a estabilidade da tensão no caso de falhas imprevistas (por exemplo, causadas por descargas elétricas) quanto a estabilidade da frequência.

50

Nas últimas décadas, o advento de fontes distribuídas de potência alterou essa estrutura convencional. Normalmente, as fontes distribuídas – geradores convencionais de baixa potência (de 50 a 100 MW) ou fontes intermitentes (geração eólica ou fotovoltaica) – são ligadas às redes de distribuição. Mas, a partir de 2009, com o grande avanço da eletrônica de potência, fontes fotovoltaicas também passaram a ser consideradas para inserir potência diretamente nas redes de transmissão.

Essa geração distribuída significa a transição para um sistema ‘mais horizontal’ de distribuição de potência elétrica, pois, além de a potência fluir de alta para baixa tensão, pode também fazê-lo a partir de um circuito de média ou baixa tensão para outro de mais alta tensão ou de um gerador para uma carga no mesmo circuito.

Portanto, em sistemas modernos com geração distribuída, a potência ativa pode fluir tanto de alta para baixa tensão quanto no sentido oposto. Nesse cenário, as redes de transmissão e distribuição passam a ter caráter de elemento ativo no sistema elétrico – e assegurar sua estabilidade ficou mais complexo.

Os sistemas eólicos e os fotovoltaicos usam interfaces eletrônicas para conexão à rede. Mas há diferença com relação à inércia das entradas e saídas, porque os aerogeradores têm rotores com inércia mecânica média, e os sistemas



fotovoltaicos geram energia elétrica a partir da luz solar, sem utilizar máquinas rotativas – ou seja, não têm inércia.

Isso significa que a inserção de grandes sistemas fotovoltaicos reduz a inércia efetiva do sistema elétrico, de modo que, na ocorrência de perturbação, a diferença de fase das máquinas síncronas pode se tornar grande, exigindo intensa força restauradora para trazê-las de volta ao equilíbrio – isso pode levar a problemas de estabilidade.

As fontes fotovoltaicas também têm nível de flutuação superior ao das fontes eólicas, o que causa impacto na regulação de flutuações de tensão. Por essas razões – e outras aqui não mencionadas –, a questão da estabilidade de sistemas elétricos de transmissão e distribuição com alto grau de inserção de geração distribuída tem recebido atenção na literatura da área. Esses estudos procuram investigar a estabilidade do sistema em função do grau de inserção, que pode chegar a 50% e superar esse valor.

Embora a literatura especializada seja extensa – e haja questões a serem investigadas –, soluções e recomendações técnicas para casos específicos têm sido encontradas. Em particular, requerimento essencial para uso em larga escala de fontes eólicas e fotovoltaicas é o estabelecimento do código de operação de rede para cada sistema elétrico, ou seja, dos requisitos que essas fontes distribuídas têm que satisfazer para fornecimento seguro e confiável de energia elétrica.

No caso da geração fotovoltaica, exemplo típico é o do código espanhol, apresentado por M. García-Gracia e colegas, no periódico *IEEE Transactions on Energy Conversion* (v. 27, p. 792, 2012). Embora trabalhos tenham sido feitos no Brasil, não há estudo aprofundado e abrangente sobre a estabilidade do SIN com alta inserção de fontes eólicas e fotovoltaicas, tampouco código de operação.

A geração elétrica distribuída é regulamentada pela Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Nela não se encontra referência a estudos de estabilidade da rede para inserção de fontes distribuídas. As solicitações de acesso ou aumento de potência devem ser submetidas à Aneel, por meio de formulários específicos – e neles não há referência a requisitos que devem ser atendidos.

Aparentemente, todo o sistema de geração distribuída no país está pensado em termos de inserção apenas nas redes de distribuição, o que limita a potencialidade de uso dessas fontes para uma transição energética mais radical.

Essas considerações indicam que é urgente fortalecer, no país, o estudo, a modelagem e os testes de redes inteligentes – principalmente, as com alto grau de inserção de geração eólica e fotovoltaica distribuída. Essa atividade pode ficar enfraquecida com a concretização da privatização da Eletrobras.

De fato, a mais capacitada instituição nessa área é o Centro de Pesquisas de

Energia Elétrica (Cepel), da Eletrobras, que inaugurou, em dezembro do ano passado, o Laboratório de Smart Grids. Segundo o Ministério de Minas e Energia:

“o laboratório permitirá a definição e a avaliação experimental de requisitos de conexão que possibilitem integrar, de forma otimizada, elevados níveis de recursos energéticos distribuídos, como geração solar fotovoltaica distribuída, geração eólica, armazenamento com baterias e veículos elétricos plugáveis.”

Ocorre que a Lei n. 14.182, de 12 de julho do ano passado, que dispõe sobre a desestatização da Eletrobras, estabelece a “manutenção do pagamento das contribuições associativas ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), pelo prazo de 6 (seis) anos, contado da data da desestatização”.

Esse prazo é inaceitável para ações de longo prazo, e não há garantia de que a administração privada da Eletrobras tenha interesse na manutenção do Cepel. Mais: além de estabelecer a prorrogação dos contratos do Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) por 20 anos, a lei não menciona outra obrigatoriedade com relação ao desenvolvimento tecnológico e à implementação dessas fontes – o que, novamente, compromete a transição energética no grau pretendido.

**52**

Julgamos premente: i) estabelecimento de política clara sobre o papel das fontes eólicas e fotovoltaicas na transição energética do país; ii) estímulo ao estudo, tanto em universidades quanto em centros de pesquisa e empresas do setor, da estabilidade e dos requisitos para aumento substancial da inserção dessas fontes no SIN – considerando até a inserção direta nos sistemas de transmissão; iii) determinação da continuidade do Cepel, instituição que, há 48 anos, vem prestando serviços relevantes ao país e terá papel fundamental na política de transição energética.

## **Biocombustível líquido**

O Brasil é pioneiro e protagonista no uso de biocombustíveis. Duas iniciativas governamentais recentes devem promover ainda mais o uso desses combustíveis: o RenovaBio, apoiado em leis avançadas, e o Programa Combustível do Futuro – este lançado ano passado.

Passo importante é a viabilização econômica do etanol e biodiesel celulósico – ou de segunda geração (2G) –, a partir de resíduos agroindustriais abundantes no Brasil. Para isso, é preciso vencer gargalos.

Na transformação de celulose em etanol ou biodiesel, são usados micro-organismos e enzimas que o Brasil tem de importar, porque não domina sua tecnologia de produção. Para dominá-las, temos de formar cientistas especializados e criar infraestrutura para seu trabalho. Bolsas de pós-doutorado e de doutorado-sanduiche, conjugadas à contratação de cientistas estrangeiros, podem agilizar esse avanço.

Com o aumento da produção de biocombustíveis, o Brasil deveria promover seu uso no transporte aéreo, marítimo, fluvial e rodoviário por veículos pesados – principalmente, para cobrir grandes distâncias.

## Carros elétricos

Os carros elétricos são silenciosos e não emitem gases de efeito estufa. Seus motores são leves, baratos e exigem pouca manutenção. Com maior potência de reserva, possibilitam arrancadas e retomadas de velocidade mais ágeis.

Mas, em sua infância, eram caros – o que os inviabilizava. O componente caro do carro elétrico é a bateria eletroquímica, a qual armazena energia elétrica que move seus motores – no caso, são baterias de íons de lítio, as que mais acumulam energia com maior densidade.

A partir de 2009, em parte como resposta a estímulos fiscais dos governos, os carros elétricos ganharam espaço no mercado, e aí a lei de Wright começou a derrubar o custo das baterias de íons de lítio. De 2010 a 2020, ele diminuiu de um fator de 9 – e continua a cair. Em 2024 e 2025, um carro elétrico custará menos do que um de combustão interna.

E há outros avanços. A quantidade de energia que uma bateria armazena por kg cresceu na última década por um fator de 2,7. Com isso, uma bateria que antes pesava 110 kg, hoje pesa 40 kg – e, com baterias mais leves, é possível ter carros com autonomia de 450 km.

Não bastasse isso, as novas baterias podem ser carregadas com fontes de maior voltagem, o que reduz o tempo de carregamento. Hoje, na Europa e nos EUA, cresce o número de pontos de abastecimento com voltagem de 380 V, que carregam uma bateria em 2 h. Em casa ou nos hotéis, a bateria pode ser carregada mais lentamente, à noite, quando a eletricidade é mais barata.

A rapidez da adoção de carros elétricos dependerá da instalação de postos de recarga. Nos EUA e na Europa, isso está sendo feito agilmente. Uma vez que até

as recargas com 380 V são demoradas (2 h), os postos de gasolina terão que se adaptar, criando áreas amplas para que os carros estacionem.

Por isso, as recargas têm sido feitas principalmente em estacionamentos convencionais e hotéis. No Brasil, a solução será mais lenta, por causa de questões específicas de nosso território e nossa malha rodoviária.

## Energia nuclear

Na década de 1950 e 1960, prevaleceu a visão otimista de que os reatores de fissão nuclear de urânio seriam capazes de fornecer eletricidade farta e barata para a humanidade. Em 2000, só nos EUA, haveria 1 mil reatores com potência total superior a 1 mil GW, cifra impressionante quando se considera que o fator de capacidade de um reator nuclear é cerca de 90%.

Mas a sociedade nunca aceitou bem a ideia da energia nuclear. Primeiramente, porque o imaginário popular associou reator nuclear a armas nucleares; depois, porque os reatores nucleares eram vistos como sujeitos a alto risco de acidentes graves.

54

Na verdade, a energia nucleoeleétrica demonstrou ser a forma mais segura de eletricidade. O número total de fatalidades humanas ocorridas até hoje é de 45 – todas elas resultantes do acidente de Chernobyl, em 1986, impossível de ocorrer em reatores de água pressurizada (PWR), tecnologia adotada por 60% dos reatores em operação atualmente. Mas o *marketing* da energia nuclear foi enorme fracasso, e, hoje, temos, em todo o mundo, 443 reatores em operação, com potência instalada de 391 GW.

Problema real e grave na produção de energia nuclear: ela gera rejeitos radioativos de vida longa (dezenas de milhares de anos), cujo armazenamento seguro é desafiador – as soluções propostas são dispendiosas e só paliativas.

A estagnação do crescimento do uso da energia nuclear teve como grave efeito paralisar a redução do custo dos reatores resultante da curva de aprendizado (lei de Wright) referente à experiência acumulada no desenvolvimento da tecnologia para o setor. O custo dos reatores não caiu; na verdade, aumentou com as medidas necessárias para maior segurança. Hoje, um reator de terceira geração custa US\$ 5 mil/kW, o que torna a energia nuclear cara, com preço acima da energia eólica ou fotovoltaica.

Atualmente, há quase consenso de que a Europa, a China e o Japão serão incapazes de descarbonizar a geração de energia nas próximas décadas sem uso

de energia nuclear. A China – que pode tomar decisões desse tipo sem concordância da população – planeja construir, nos próximos dez anos, 150 reatores com potência média de 1,5 GW, o que soma potência de 225 GW. É provável que a discussão sobre uso de energia nuclear seja retomada, em escala mundial – talvez, a guerra na Ucrânia abrevie seu início na Europa.

O Brasil tem melhores condições de fazer a transição energética sem uso intenso de energia nuclear. O Programa Nacional de Energia (PNE 2050) – ainda não oficializado – leva em conta as condições brasileiras. Nele, é apontada a necessidade de o país manter capacitação tecnológica no setor – em especial, a capacidade de dominar todo o ciclo de produção de combustível nuclear.

Além do término do complexo de Angra, com potência instalada de 3,4 GW, o PNE prevê a construção de mais seis a oito reatores, com potência somada de 10 GW. Com isso, a energia nuclear responderia por 3% da eletricidade produzida no Brasil em 2050.

## RECOMENDAÇÕES

**Fortalecer**, no país, a pesquisa em todos os aspectos da transição energética – principalmente, em tecnologia de placas fotovoltaicas, redes de transmissão e distribuição inteligentes de eletricidade, projetadas para dar estabilidade ao sistema de geração distribuída.

**Promover** a criação ou instalação, no Brasil, de indústrias capazes de produzir insumos envolvidos da transição energética.

**Usar** o complexo de grandes barragens hidrelétricas do país como sistema acumulador de energia capaz de dar estabilidade ao fornecimento de eletricidade.

**Formular** políticas de longo prazo para a geração distribuída de eletricidade, capazes de dar previsibilidade e inspirar confiança em investidores.





# Áreas portadoras de futuro



### Transformação digital

---

**A**té a década de 1970, só fenômenos descritos por equações diferenciais lineares ou aproximados por essas equações podiam ser resolvidos, mas fenômenos importantes não caem nessas categorias.

Com o crescimento do poder de cálculo e memória dos computadores, bem como o desenvolvimento de *softwares* mais inteligentes, gama cada vez maior de fenômenos e sistemas não lineares (complicados ou complexos) passou a ser tratável computacionalmente.

Além disso, o número de pessoas com acesso a processadores cresceu exponencialmente. Hoje, há, no Brasil, mais *smartphones* do que pessoas, e cada um deles tem mais poder de processamento do que a NASA inteira tinha quando, em 1969, lançou a Apollo 11, levando os primeiros humanos à Lua.

Muitos dos primeiros desenvolvimentos no uso do computador empregaram técnicas antes adotadas para análises lineares, como diagonalização de matrizes e cálculos por meio de funcionais. Mas, logo, ficou claro que sistemas nunca imaginados como tratáveis podiam ser descritos matematicamente.

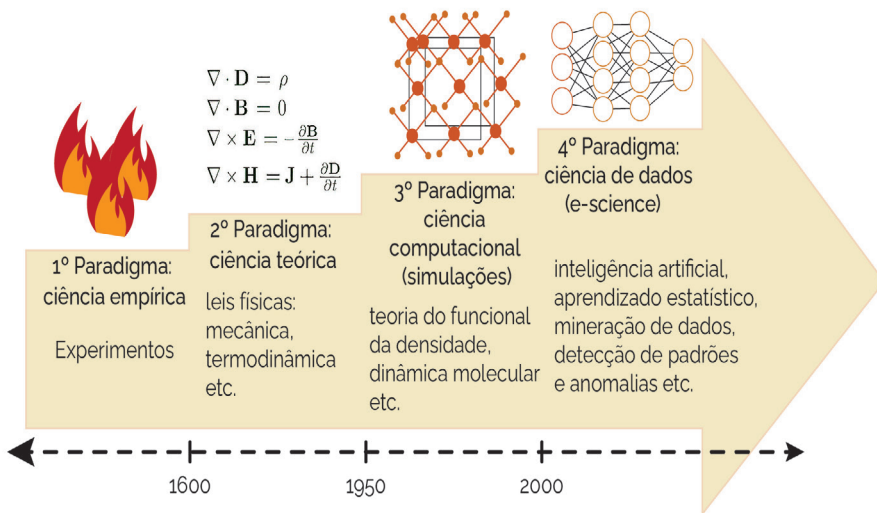
Para isso, foi necessário desenvolver novas metodologias de análise e novas formas de quantificação e caracterização dos fenômenos por meio de outras teorias e técnicas matemáticas.

Embora muitas dessas técnicas já tivessem sido propostas no início de século passado por matemáticos e físicos, como Georg Cantor (1845-1918) e Henri Poincaré (1854-1912), seu desenvolvimento na forma de teorias que conhecemos atualmente, como geometria fractal, caracterização de sistemas caóticos,

simulações de dinâmica molecular ou cálculo estocástico, só tornou-se realidade por meio do uso intensivo da computação.

Com essas novas técnicas matemáticas e metodológicas, fenômenos que antes não se cogitava modelar matematicamente, como clima ou fenômenos sociais, passaram a entrar na agenda científica. Hoje, além do tratamento de fenômenos com dinâmica não linear e compostos de muitos agentes, a própria descoberta de fenômenos pode ser obtida pelo uso dessas novas técnicas matemáticas. Em um processo de retroalimentação, a consequência dessa ampliação do horizonte dos fenômenos modeláveis matematicamente foi uma explosão tecnológica.

Atualmente, a transformação digital – que envolve análise de massas enormes de dados com emprego de computadores cada vez mais poderosos e novos tipos de algoritmos (por exemplo, para mineração de dados, aprendizado de máquina e inteligência artificial) – levou à criação da ciência dos dados, novo paradigma científico, pois é nova maneira de fazer ciência. A evolução dos paradigmas da ciência é ilustrada na figura 1.



**Figura 1. Os quatro paradigmas da ciência: experimental, teórica, computacional e baseada em dados** CRÉDITO: ADALBERTO FAZZIO E COLABORADORES

Grandes transformações (às vezes, profundas) que vêm ocorrendo no mundo contemporâneo estão associadas à transformação digital, que engloba técnicas matemáticas não analíticas e poder de processamento, além de produção e compartilhamento de dados e informação por toda a sociedade – tanto a cientí-

fica quanto a não especializada. A transformação digital está alterando o modo como vivemos e a forma de fazermos ciência.

A integração das tecnologias digitais da ciência de dados com a física, química, biologia, medicina e as engenharias seguirá impactando nossas vidas. Como nação que ambiciona ser relevante científica e tecnologicamente, devemos nos capacitar para as mudanças, qualificando-nos em ciência de dados, em áreas como inteligência artificial, aprendizado de máquina, *deep learning*, *high throughput*. Em resumo, tudo envolvido nessa nova ciência e nas ciências do *big data*.

A ciência de dados é ampla e tem caráter inter/transdisciplinar. Aplica-se a problemas climáticos, meio ambiente, agricultura, saúde, segurança pública, melhorias na educação, transportes urbano e de cargas etc.

A logística para o funcionamento de sociedades cada vez mais complexas dependerá de forma crescente da ciência de dados. Entendemos que o avanço nesse campo, prioritário para o desenvolvimento nacional, demanda apoio à formação de recursos humanos e à criação de infraestrutura específica para seu trabalho de pesquisa.

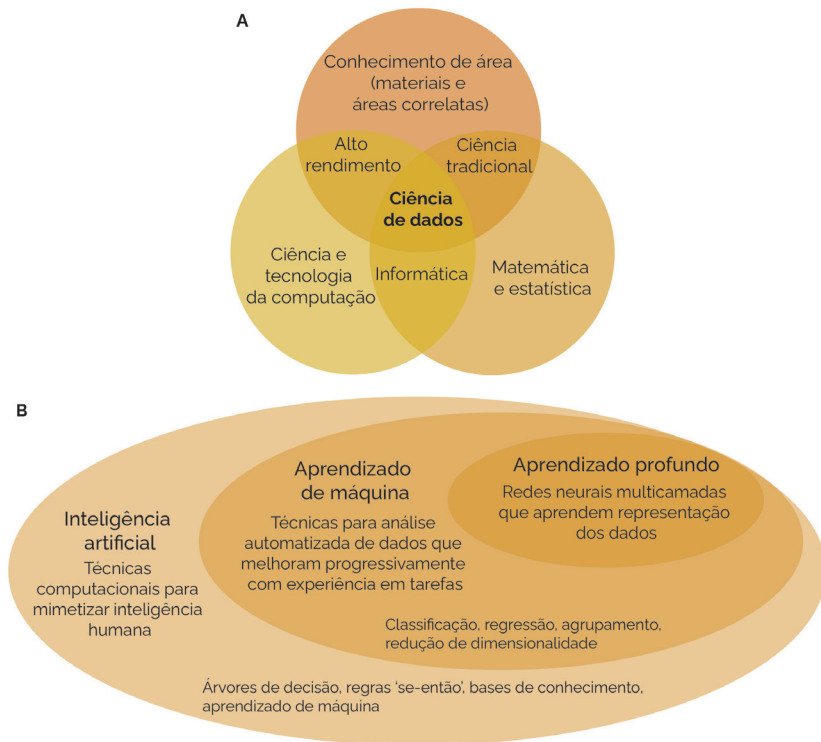
O progresso nesses campos impactará nossa capacidade de inovação e forma de produção, revitalizando nossa indústria e criando novos setores de inovação tecnológica.

## Muitas faces da ciência dos dados

---

Pesquisas em inteligência artificial devem focar tanto a ciência fundamental quanto suas diversas possibilidades de aplicação. A parte fundamental inclui teoria e métodos em áreas como aprendizagem de máquina; abstração e inferência necessárias para comportamento inteligente; arquiteturas gerais para inteligência, agentes inteligentes integrados e sistemas multiagentes.

As pesquisas em inteligência artificial devem cobrir também aspectos éticos e sociais, como a explicação de decisões, confiabilidade, validação de sistemas habilitados para inteligência artificial, segurança, proteção e privacidade (figura 2).



**Figura 2. Em A, ciência de dados como disciplina integrativa; em B, descrição hierárquica** CRÉDITO: ADAPTADO DE THE ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY.

O uso de inteligência artificial na empresa deverá estar voltado para aumento da produtividade, e esse esforço competitivo trará avanço em vários setores da economia.

O processo de análise na ciência de dados é desafiador, pois novas técnicas estão sendo criadas. O foco da análise são grandes massas de dados, estas últimas diferentes dos tradicionais conjuntos de dados (estáticos e rígidos) e analisados com base em hipóteses pré-definidas por algoritmos deterministas.

A distinção dos dados tradicionais é decorrente da maior abundância, exaustividade e variedade de *big data*, acervo mais dinâmico, confuso, incerto e altamente relacional. Por exemplo, sabemos que a reprodução da vida baseia-se em moléculas de DNA, resultantes de processo de evolução natural.

Mas não conseguimos entender o suficiente para decidir se muitas partes do DNA são essenciais ou se são elementos supérfluos da evolução. A inteligência artificial pode, nesse caso, ser usada para encontrar padrões relevantes que podem levar ao reconhecimento do que é ou não essencial.

A possibilidade de superar esses tipos de desafio passou a ser vislumbrada

como decorrência de avanços na computação de alto desempenho e da invenção de novas técnicas analíticas desenvolvidas para lidar com a complexidade e vastidão dos dados.

Originalmente, essas técnicas surgiram em campos de inteligência artificial e sistemas especialistas. Seu objetivo era produzir algoritmos de aprendizagem capazes de minerar dados e neles reconhecer padrões, para, em seguida, construir modelos preditivos e otimizar os resultados.

O número de algoritmos diferentes que podem ser aplicados a um conjunto de dados é enorme, o que possibilita comparações de desempenho e, portanto, a escolha do melhor modelo ou explicação – ou combinação destes (abordagem de conjunto).

Essa abordagem difere da seleção tradicional baseada no conhecimento específico da técnica e dos dados. Assim, a união de *big data* e ciência de dados (ou, simplesmente, *big data analytics*) pode ser vista como nova abordagem epistemológica, em que os *insights* podem ‘nascer dos dados’.

## Capacitação para a área

---

A disponibilização de recursos de *hardware*, *software* e grandes massas de dados para os laboratórios de pesquisa e as universidades é essencial para o avanço da pesquisa científica em inteligência artificial no país.

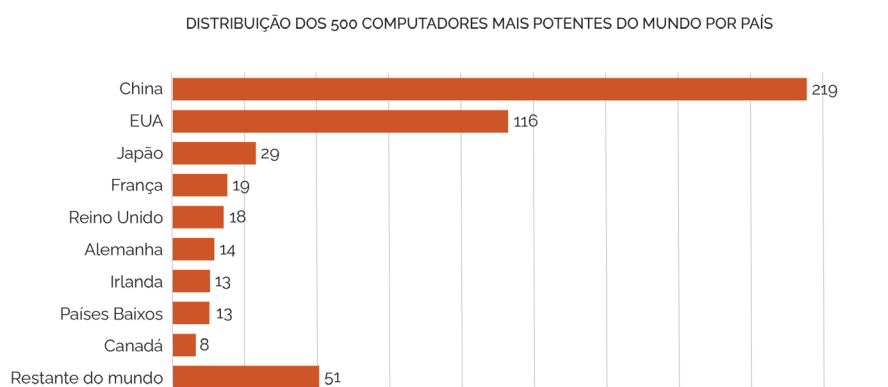
Mas, para que esse avanço possa ocorrer, temos que ter política científica que analise e desenvolva a infraestrutura de pesquisa com base em dois pilares: i) formação de cientistas e técnicos de dados com conhecimento de metodologias mais modernas; ii) fortalecimento dos centros existentes e criação de novos, voltados para a computação de alto desempenho, bem como daqueles dedicados à produção, ao gerenciamento e armazenamento de dados essenciais para a segurança nacional.

O Brasil já conta com centros desse tipo, como o LNCC, o INPE e o Cemaden, mas outros serão necessários. Nota-se a falta de instituição dedicada a dados de genomas de nossa população e biomas, informação importante para a segurança sanitária, ambiental e alimentar.

A identificação das predisposições genéticas dos indivíduos para certas doenças está levando a uma era de cuidados médicos personalizados, baseados no genoma do paciente. Os centros a que nos referimos devem estar capacitados para simulações complicadas, e um dos desafios nacionais é a criação de infraestrutura adequada para realizar essas simulações.

Centros de computação de alto desempenho estão espalhados pelo mundo, tendo diferentes tamanhos e focos específicos de atuação (figura 3). Para mantê-los aptos ao cumprimento de suas funções, é preciso planejamento e atualização constante, pois o tempo de vida de seus equipamentos costuma não passar de seis ou sete anos.

Depois desse tempo, os processadores têm de ser substituídos por outros mais rápidos e menos dispendiosos de energia. A obsolescência dos equipamentos de computação de alto desempenho é rápida, porque o avanço técnico dos processadores é veloz. Além disso, a manutenção se torna inviável, visto que peças de reposição param de ser produzidas.



**Figura 3. Distribuição, por países, dos 500 computadores mais potentes do mundo até junho de 2019** CRÉDITO: TOP500.ORG

O principal centro de computação brasileiro é o Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC), em Petrópolis (RJ), que tem o supercomputador Santos Dumont. Esse equipamento – em operação há cerca de 5 anos – contou recentemente com um *upgrade*, levando-o a ter mais de 36 mil núcleos e colocando-o atualmente na lista dos Top500 supercomputadores no mundo. Apesar desses números expressivos, o tempo médio na fila de espera é longo, por causa da demanda.

O Brasil tem poucos centros nacionais com infraestrutura atualizada para a área de computação de alto desempenho. Além dos centros Cenapad, do sistema Sinapad (Sistema Nacional de Processamento de Alto Desempenho), temos pequenos *clusters* em instituições de ensino superior e institutos de pesquisa.

O Cenapad-SP foi por anos referência como laboratório nacional para com-

putação de alto desempenho. A combinação de fontes de financiamento – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) e Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) –, bem como de recursos humanos bem treinados, fez dele o ponto nevrálgico do Sinapad.

Mas o centro passou por período sem atualização de equipamentos competitivos. Esse cenário mudou ano passado, quando se instalou o novo *cluster* Lovelace, financiado pela Finep, com cerca de 7,5 mil núcleos, além de nós de GPU.

Além de saturado em termos de infraestrutura, os Cenapad não têm suprido o fundamental mencionado aqui: prover ambiente para o desenvolvimento de ferramentas de computação de alto desempenho e de ter corpo científico e técnico alinhado com esses objetivos.

Não existe, no Brasil, plano estratégico de longo prazo para substituir os equipamentos computacionais disponíveis, nem para montar novos supercomputadores equiparáveis a máquinas existentes no exterior. Há, portanto, a necessidade de se pensar na instalação de novos equipamentos com base em plano de médio e longo prazo.

Entendemos que a estrutura dos Cenapad poderia ser usada para estruturar – ou reestruturar – novos centros de computação de alto desempenho no Brasil, aptos a atender de forma mais robusta a demanda nacional. Se a instalação de bons centros de computação intensiva é dispendiosa, mais dispendioso é não investir na transformação digital, que condena ao atraso.

Há inúmeras iniciativas para construir novos supercomputadores pelo mundo, que incluem computadores de 100 petaflops, instalados por consórcios europeus e iniciativas nos EUA, na China e no Japão. Os recursos envolvidos chegam à casa de € 7 bilhões, em iniciativa europeia conjunta de governos e indústrias.

Nos exemplos citados, além do enfoque em *hardware*, há dois importantes itens que devem ser mencionados. O primeiro é o desenvolvimento de *software* para utilização específica dessas máquinas, bem como o de ferramentas para análise de grande quantidade de dados gerados. O segundo é a reunião de cientistas de diferentes áreas (física, química, biologia e ciência de materiais) usuários dessas ferramentas, bem como de cientistas de computação, engenheiros e matemáticos aplicados, para racionalizar e otimizar o uso das instalações.

A criação de um laboratório nesses moldes teria papel estratégico: ampliar o ecossistema de ambientes desse tipo no Brasil. Sendo nosso país uma das maiores economias do mundo, é estratégico ter laboratórios com perfis complementares, que ofereçam serviços semelhantes. Essa é a estratégia empregada em todas as iniciativas internacionais.



É importante que, além do oferecimento dos supercomputadores, esses centros se aprofundem no entendimento das demandas dos usuários, auxiliando no desenvolvimento de soluções. Os avanços fundamentais são relacionados a *big data*, inteligência artificial e aprendizado de máquina, todos relacionados à computação de alto desempenho e dependentes de centros de computação de ponta. Nesse sentido, é essencial ter estrutura física e capital humano formado por cientistas de excelência nessas áreas.

Aspecto relevante de um novo centro são os recursos humanos, tanto para a manutenção do *cluster* quanto o desenvolvimento de pesquisa na área de computação de alto desempenho. Por isso, a contratação de cientistas, além da de técnicos, é fundamental, os quais devem estar alinhados com a ideia de desenvolvimento de aplicações para a pesquisa computacional em áreas estratégicas portadoras de futuro para o desenvolvimento nacional.

A crescente capacidade de cálculo e a crescente capacidade de obtermos informação dos sistemas por invenção de técnicas de quantificação, leva a novo cenário epistemológico: de um lado, há a matemática, com seus modelos e sua capacidade de cálculo; do outro, a natureza, com seus fenômenos a serem modelados.

## Complexidade

### A maior fronteira

---

A maior fronteira da ciência é a complexidade. Os tradicionais métodos experimentais e analíticos – com sucesso na construção de grandes teorias da física e suas aplicações ao estudo de sistemas mais simples – são impotentes para a investigação da maioria dos sistemas com que lidamos na vida prática.

Esses sistemas podem ser tangíveis (caso dos organismos vivos, biomas e da atmosfera) ou, pelo menos, em parte, abstratos (sociedade humana e logística que a permite funcionar). São sistemas complicados, e uma classe deles forma os sistemas complexos, que, além das complicações, podem ter memória do passado e serem capazes de evoluir.

É simplificação útil denominar complexos todos os sistemas complicados, pois podem ser investigados com a mesma metodologia: ciência de dados – é isso que faremos aqui. Como mencionado, essa ciência apoia-se na transformação digital e, mais do que metodologia, é toda nova epistemologia.

Sistemas complexos naturais são frequentemente resultado de dinâmi-

ca em que várias trajetórias teriam sido possíveis, mas apenas uma ocorreu. A trajetória desse sistema passa por pontos onde houve escolhas, cujos efeitos representam a informação necessária para a descrição do estado posterior dele.

Tipicamente, sociedades, biomas e organismos biológicos seguem essa lógica. Em estudos, essa característica é contornada ao se investigar os componentes necessários do sistema. Exemplo: entender que, para uma floresta ser sustentável, é preciso ter organismos que transformam  $\text{CO}_2$  em matéria orgânica (fotossíntese, por exemplo) e aqueles responsáveis pela decomposição da matéria orgânica.

Mas esses estudos não possibilitam diferenciar florestas nem o manejo adaptado a cada uma delas. A engenharia reversa precisa ser detalhada, a ponto de permitir o manejo e, nesse caso, a quantidade de detalhes pode ser grande.

Assim, é inadequado o tratamento de sistemas cuja trajetória é o resultado de infinitas escolhas estocásticas, por meio das técnicas usadas para estudar sistemas simples, cujas trajetórias e estado final são determinados por princípios gerais (minimização de energia, maximização de entropia, por exemplo).

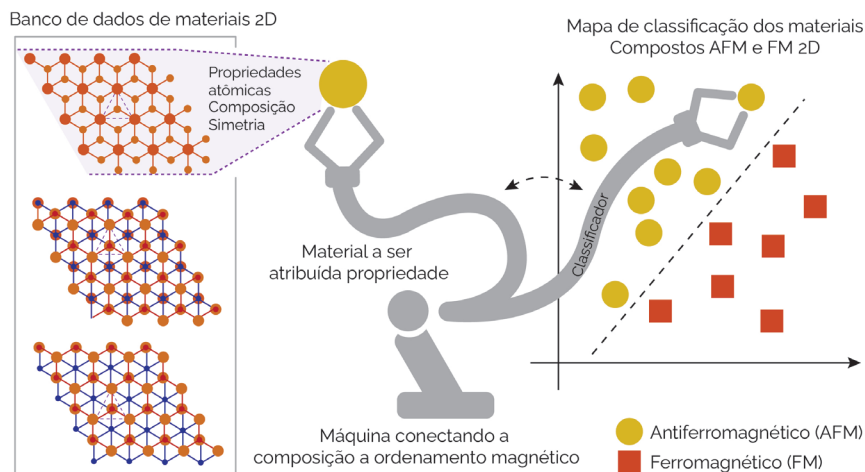
No caso desses sistemas complexos, é imprescindível a determinação de cada detalhe, sem o conhecimento *a priori* de quais deles investigar. Esses detalhes são definidos *a posteriori*, com busca sistemática por padrões. A estratégia que se apresenta é o *big data*, que fornece a informação e as técnicas de análise padrões.

## Ciência dos materiais

---

Aqui, o objeto é a descoberta de novos materiais. Sabemos que, desde a Idade da Pedra, avanços tecnológicos foram impulsionados por descobertas de novos materiais e sua funcionalização. Bronze, aço, polímeros sintéticos e silício dopado são exemplos de materiais responsáveis por grandes transformações da humanidade.

Essas descobertas podem levar décadas de pesquisa, necessárias para identificar e otimizar o material mais adequado a dada aplicação tecnológica. O governo dos EUA lançou, em 2011, o programa Materials Genome Initiative, cooperação entre cientistas para desenvolver metodologias computacionais para prever, filtrar e otimizar descobertas de materiais com novas propriedades. Um esquema de como isso é feito está na figura 4.



**Figura 4. Representação para a descoberta de novos materiais** CRÉDITO:

ADAPTADO DE C. M. ACOSTA ET AL./*APPL. MAT. & INTERFACE* 14, 9418 (2022)

Essa iniciativa decorreu do reconhecimento de que inovações tecnológicas baseadas em novos materiais têm sido chave para o enfrentamento de desafios econômicos e sociais. Mas ela também levou a grande aumento na capacidade computacional e formou grupos de pesquisas dedicados à montagem de centros de armazenamentos de dados e à descoberta e funcionalização de novos materiais.

Essa ação do governo norte-americano foi adotada em moldes semelhantes pela União Europeia e China, para agregar valores aos materiais, visando ao desenvolvimento de suas respectivas indústrias.

Ferramentas de aprendizagem de máquina e inteligência artificial têm aplicações inúmeras na ciência dos materiais. Avanços em materiais complexos são usados para produção de novos dispositivos termoelétricos, novas ligas com alumínio para manufatura aditiva, vidros especiais e novos materiais magnéticos – materiais magnéticos estão presentes em aplicações tecnológicas modernas, como armazenamento de dados, coleta de energia e transporte eletrônico.

O desenvolvimento dos chamados materiais quânticos irá impactar a eletrônica, com prováveis aplicações em computadores quânticos. O Brasil precisa ter seus programas e fazer parte dessas iniciativas multinacionais, atuando como parceiro e protagonista na construção de bancos de dados e dominando metodologias e técnicas – principalmente, em áreas de nosso interesse. Para isso, é preciso investimentos em infraestrutura e formação de pessoal qualificado.

## Pesquisa para o agro

---

Trabalhos na literatura mostram como a agricultura se beneficiará das tecnologias de aprendizado de máquina e inteligência artificial. No Brasil, a pesquisa voltada para a agricultura está avançada em relação à de outras linhas, no sentido de que ela tem gerado aumento no valor agregado de nossa produção.

Essa pesquisa é desenvolvida em grande parte pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) em colaboração com universidades e elevou a produtividade brasileira a níveis que – além de ser a iniciativa que mais contribui para o Produto Interno Brasileiro – tornaram o Brasil um dos principais produtores de alimentos do mundo.

Para consolidar nosso protagonismo no setor agrícola, é importante nos empenharmos na pesquisa sobre o solo, sistema vivo. Ele não é só mistura de minerais, mas, sim, enorme diversidade de plantas, fungos, bactérias e invertebrados que habitam esse substrato.

O solo é dinâmico, e a compreensão dessa característica é grande desafio. Os solos tropicais e subtropicais são diferentes e mais dinâmicos do que os das regiões de clima temperado, porque são mais palpitantes de vida. Ser líder na investigação dos solos tropicais nos trará retorno econômico. E essa investigação, para ser feita em alto nível, dependerá do emprego da computação intensiva.

A agricultura tem impacto no meio ambiente, o que a torna fundamental, entre outras coisas, para a gestão do uso da água e do solo. Neste último, organismos de várias escalas interagem de forma não linear, compondo microbioma que só se sustenta em sua integridade como superorganismo vivo que afeta a produtividade da terra.

Os físicos podem contribuir para o entendimento da dinâmica desses ecossistemas e seu impacto na agricultura. Centros dedicados à biologia quantitativa aplicada a plantas e animais espalham-se pelo mundo. Eles devem ser multidisciplinares, dispor de recursos computacionais de alto nível e ter acesso a bancos de dados com informação sobre as espécies de maior interesse. Nelas são necessários físicos capazes de modelar sistemas complexos, lidar com métodos computacionais (simulações, inteligência artificial e aprendizado de máquina) e propor modelos dinâmicos para sistemas que sustentam a vida.

## Pesquisa em saúde

---

Com os antibióticos e cirurgias em geral, as mortes de pessoas passaram a se dar principalmente por causa de falhas no projeto genético do organismo. Por

isso, os óbitos mais frequentes em países desenvolvidos resultam de problemas cardíacos, acidentes vasculares e câncer – e não em consequências de acidentes físicos ou doenças infecciosas.

Exemplos de falhas no projeto do organismo são os tumores malignos que podem surgir quando a célula sofre alteração no DNA não detectada pelos mecanismos de correção de erro intracelulares ou que evade o sistema imunológico. Essas alterações genéticas estão sempre acontecendo, o que leva ao aparecimento de tumores.

As doenças relacionadas à idade são outro exemplo de falha de projeto dos organismos. Praticamente, todas nossas células são renovadas em meses. Assim, um organismo não deveria ser mais velho que esse tempo.

Então, por que envelhecemos?

Porque foram naturalmente selecionados organismos que impuseram limites na duplicação celular, para evitar que células com alteração no DNA multipliquem-se sem controle e formem tumor. O lado ruim dessa seleção é que, depois de certa idade, não conseguimos repor todas as células necessárias para nos manter jovens. E a consequência é a velhice, que, em princípio, com base nos avanços atuais da medicina, pode ser tornada mais lenta.

O resumo dessa história é que precisamos atuar no projeto de corpo humano para nos vermos livres de câncer, retardar o envelhecimento e reduzir doenças típicas do sistema imunológico – lembremos que a covid-19 mata pela desregulação do sistema imunológico causada pelo vírus e não pelo vírus em si.

Por que isso acontece com certas pessoas e não com outras?

Falta ainda entender a dinâmica do corpo humano, empreitada de dimensões ainda não compreendidas. Observe que dentro de uma célula há infinidade de reações bioquímicas não lineares. Uma proteína típica contém milhares de átomos e pode estar (ou não) ligada a radicais, como metil ou fosforil.

Há, em nosso organismo, fenômenos em várias escalas, as quais não se separam: mudanças bioquímicas em nível celular geram efeitos em todo o organismo. Portanto, além de ser não linear, a dinâmica que sustenta o corpo humano tem de ser considerada simultaneamente em múltiplas escalas.

Não há como atacar esse problema sem que sejam feitos modelos quantitativos, isto é, sem proposição de modelos matemáticos e de medidas adequadas com seus devidos protocolos, experimentos e simulações numéricas. Para essas tarefas, a física tem seus métodos, e a colaboração de físicos é essencial em pesquisas que envolvam a modelagem quantitativa do organismo humano.

A física não é apenas uma disciplina; é também poderosa fonte de métodos e base de qualquer projeto reducionista.

Para esse tipo de modelagem, é imprescindível a coleta, o armazenamento e gerenciamento de dados em grande escala. Mas ainda não sabemos ainda o que procurar neles: padrões ali escondidos precisam ser trazidos à luz – o que será feito provavelmente pela aplicação de inteligência artificial e aprendizado de máquina. O contingente humano necessário é diretamente proporcional ao tamanho e à importância das tarefas a serem executadas.

Para melhorar a eficiência da pesquisa, o compartilhamento de dados, métodos e *softwares* tornou-se o modo normal de funcionamento da pesquisa em biologia quantitativa. Assim, os bancos de dados precisam de interfaces amigáveis aos usuários que possibilite diferentes organizações e cruzamentos de informações.

A infraestrutura necessária para essa pesquisa demanda instituições com diferentes propósitos: bancos de dados; hospitais que colem e armazenem dados adequadamente; desenvolvimento de formas de imageamento e explorações não invasivas do corpo humano; laboratórios de pesquisa que façam explorações do organismo e análises dos resultados; recursos computacionais de alto desempenho; centros multidisciplinares que incentivem e promovam a interação entre cientistas de diferentes formações; gerenciamento desses recursos materiais e humanos de forma adequada; compartilhamento dos resultados e formação constante de recursos humanos.

A boa notícia é que, mesmo antes de compreensão mais completa do corpo humano, já são sentidos efeitos dessa pesquisa na melhoria da saúde humana. A engenharia de tecidos e órgãos é uma das novas áreas que emergem nesse cenário.

Em realidade, o avanço dos recursos necessários para a pesquisa em saúde humana e suas aplicações propiciou o desenvolvimento de novas frentes de investigação e desenvolvimento em áreas distintas, e estas levaram à pesquisa voltada para a saúde humana, fechando-se, assim, círculo virtuoso.

Algumas dessas áreas já são realidade no mundo, mas, no Brasil, ainda são incipientes.

## Instrumentação e biologia

---

A descrição quantitativa da dinâmica celular tem impacto tanto nas aplicações no agro quanto na saúde. Exemplo é a pesquisa em biologia estrutural, que vem sofrendo profundo impacto com o avanço de instrumentos de visualização e medida, como a auxiliada por microscopia eletrônica – especialmente, a técni-

ca de criomicroscopia na investigação da estrutura de macromoléculas biológicas e células.

A criomicroscopia proporciona a visualização do objeto biológico em seu estado vivo. Na atual pandemia, a criomicroscopia foi importante para desvendar a estrutura da proteína S (alvo das vacinas anticovid). Hoje, é a técnica mais importante para desenvolvimento de fármacos e biofármacos.

O aprendizado de máquina e *big data* contribuem para o processamento de imagens, pois enormes massas de dados são geradas nesses criomicroscópios (ordem de terabytes/dia), e seu processamento usa técnicas de aprendizado de máquina não supervisionado para a construção de imagens.

No Brasil, há necessidade de mais cientistas qualificados para o processamento de imagens, e a análise dessa massa de dados demanda enorme infraestrutura computacional. Armazenamento, compartilhamento e processamento de dados têm que fazer parte de uma política nacional que, hoje, é discutida mundialmente.

Centros de excelência em microscopia eletrônica multiusuário usam técnicas de criomicroscopia e contam com a presença de físicos.

O atual momento demanda investimentos para que esses centros possam expandir suas atividades e permitir que mais cientistas, bem como pessoal da indústria, tenham acesso a essas técnicas.

É desejável que haja investimentos para fomentar tanto a criação de redes de microscopia em que grupos de pesquisa em biologia estrutural tenham acesso à capacitação nessas técnicas quanto a infraestrutura básica de criomicroscopia eletrônica.

Como em outras áreas, a fuga de cérebros é sério problema que só poderemos compensar com a formação de jovens cientistas.

## Tecnologias quânticas

### Informação quântica

---

A ciência da informação quântica busca novos conhecimentos e tecnologias alicerçadas na teoria quântica, a qual unifica dois conceitos, o da mecânica quântica e o da teoria da informação. Ambas sustentarão a futura tecnologia.

Esse novo campo tem como objetivos buscar o melhor entendimento dos princípios da mecânica quântica e impactar positivamente a aquisição, transmissão e processamento de informações.



Os países desenvolvidos já estão empenhados no desenvolvimento desse campo, tanto por parte dos governos quanto do setor industrial. E, sem dúvida, o avanço do Brasil em ciência de informação quântica se faz urgente, para buscar competitividade industrial neste século.

Informação quântica tem quatro pilares: i) computação quântica; ii) simulação quântica; iii) comunicação quântica; iv) sensores quânticos.

O surgimento da computação digital clássica na década de 1950 teve – e tem – sucesso, por aumentar nossa capacidade para resolver problemas. A partir da década de 1980, cientistas começaram a considerar a abordagem de cálculos numéricos por nova perspectiva: usar os fundamentos da mecânica quântica para solução de cálculos difíceis, ou seja, a computação quântica.

Desde os primeiros computadores operados por válvulas, as regras fundamentais de operação não mudaram. Os transistores de efeito de campo (transistores de estado sólido), baseados na configuração MOS (metal-óxido-semicondutor), tiveram grande avanço na construção dos chips, que foram ficando mais rápidos e menores – hoje, eles podem ter mais de um bilhão de transistores. Mas esses dispositivos obedecem às mesmas leis de processamento de informações, realizado por operações em *bits*.

Os computadores quânticos manipulam *qubits*. Com base no princípio da superposição, o emaranhamento de estados fornece *qubits*, e seu uso torna os computadores quânticos mais rápidos que os atuais (ditos, clássicos), além de menos vulneráveis à ação de *hackers*.

“A ciência é precoce e um computador quântico multifuncional ainda não existe. Mas isso não impede os investidores de pôr dinheiro em *startups* quânticas”, escreveu E. Gibney, no periódico *Nature* (v. 574, p. 22, 2019). A figura 5 traz essas cifras.

A verdade é que o avanço nesse campo é extraordinário. Há uma década, seria difícil prever o que sabemos hoje, quando já se prevê que teremos computadores quânticos úteis antes do que imaginávamos.

A China está comercializando fortemente tecnologias quânticas, incluindo comunicações seguras. Mas informações sobre financiamento privado são escassas e, quando vêm a público, não costumam revelar cifras.

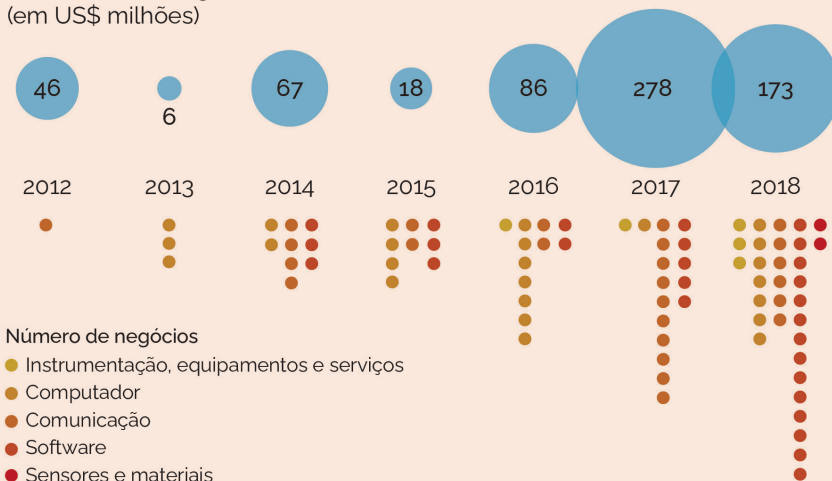
Na informação quântica, a criptografia é a ciência dos segredos, a qual possibilita a troca de informação a longas distâncias com segurança. Os computadores quânticos serão importantes para o envio de informação segura por governos, bem como instituições financeiras e militares.

Por exemplo, os métodos criptografados modernos dependem de proble-

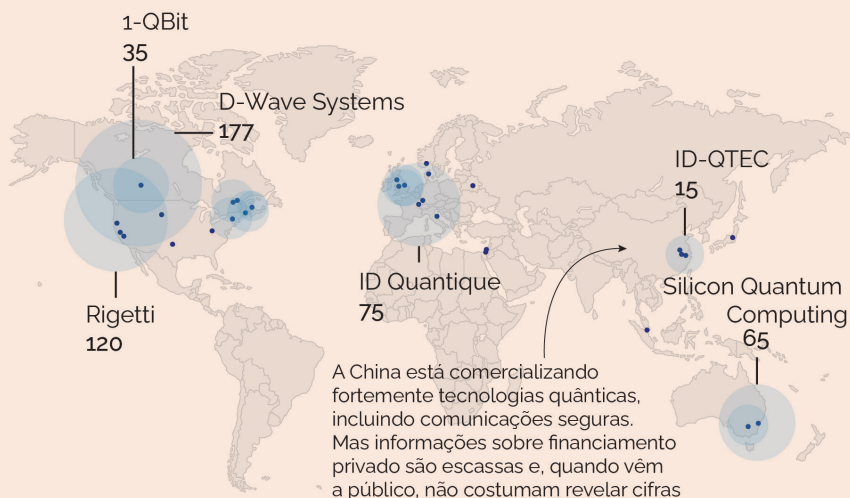
## DINHEIRO PARA QBITS

Número crescente de empresas de tecnologia quântica está arrecadando verbas de investidores privados – particularmente, no setor de computação e softwares quânticos

Valor total dos negócios  
(em US\$ milhões)



Localção dos investimentos 2012-2018



**Figura 5. Mapa dos principais centros investidores (2012-2018)** CRÉDITO: E. GIBNEY,

NATURE 574, 22 (2019)

mas de fatoração, e estes últimos são difíceis de serem resolvidos. As chamadas chaves quânticas usam criptografia baseada em princípio quântico que mantém informações seguras.

Atualmente, existem empresas vendendo ‘chaves quânticas’ (*Quantum Key Distribution* ou QKD) que são usadas por governos e organizações privadas. De modo simples, a técnica funciona assim: uma pessoa envia *qubits* em certos estados quânticos para outra, que os observa ou mede. Qualquer pessoa que tente ‘espionar’ deve medir esses *qubits*, o que deixa rastro detectável. Isso é consequência da mecânica quântica, que diz que não podemos medir um estado sem perturbá-lo.

Outro pilar da informação quântica é o da simulação quântica, alvo de pesquisas adiantadas e com aplicações. Esses estudos têm como foco sistemas complexos (quânticos por natureza) que dificilmente poderiam ser tratados com o auxílio de computadores ‘digitais-clássicos’.

Para tratar esses sistemas com computadores clássicos, precisamos primeiramente entender e modular as interações quânticas entre os componentes, ou seja, ensinar mecânica quântica a nosso computador – tarefa árdua.

Uma simulação quântica parte de outro enfoque. Simula-se o sistema quântico usando outro sistema quântico, o qual ‘não precisa aprender’ mecânica quântica, pois funciona com as mesmas regras.

Hoje, se buscam aplicações em diferentes áreas para essa ferramenta, como doenças de Parkinson e Alzheimer. Contribuem para esta última o acúmulo, nos neurônios, de duas proteínas com enovelamento incorreto, a tau e beta-amiloide. A simulação poderia nos ajudar a entender esse enovelamento e, portanto, contribuir para a cura da doença.

Meio ambiente é outro tema importante. Por exemplo, os simuladores quânticos podem encontrar catalisadores químicos para remoção de CO<sub>2</sub> da atmosfera. Simulações quânticas são também aplicadas no desenvolvimento de novos materiais para spintrônica. Há equipes de físicos trabalhando em simulações quânticas para entender o modo como as partículas interagem no nível mais fundamental, visando a explicar fenômenos resultantes do *Big Bang*, como o porquê de haver mais matéria que antimatéria.

Outra pesquisa adiantada e promissora é a que envolve defeitos pontuais em diamantes. Essas pedras, quando dotadas de impurezas de nitrogênio, podem alterar absorções e emissões de fótons quando estão próximas a campos magnéticos fracos. Portanto, diamantes com essa propriedade poderiam ser usados na obtenção de imagens 3D de pequenas moléculas e moléculas biológicas.

Exemplo interessante de simulação quântica e uso de sensores quânticos é o trabalho de cientistas da Quantum Technology Hub Senses and Timing (Reino Unido). Eles estão desenvolvendo um gravímetro (medidor de gravidade) extremamente sensível. Esses sensores poderiam ser usados para ajudar a monitorar grandes estoques de CO<sub>2</sub> ou explorar águas sob a superfície de planetas (inclusive, Terra), detectando variações do campo gravitacional sem que vibrações possam interferir.

A informação quântica abriu nova era de expansão tecnológica. E o Brasil precisa ter iniciativa nacional, ou seja, programa sólido para construir base estruturada e dedicada a essa área. Todos os países desenvolvidos estão empenhados na conquista dessa tecnologia emergente.

No momento, a supremacia quântica é disputada entre os EUA e a China, Também estão envolvidos nessa corrida países como Canadá, Japão, Coreia do Sul, Reino Unido, bem como a própria União Europeia, pesquisando aspectos do problema com recursos do governo e setor privado.

Nos EUA, mais de mil patentes na área de computação quântica foram concedidas nos últimos 10 anos – vale lembrar que muitas delas foram solicitadas por entidades de fora dos EUA – indicação de mercado atraente. Mas, nos últimos dois anos, o escritório de patentes chinês ultrapassou os dos EUA nesse quesito (figura 6).

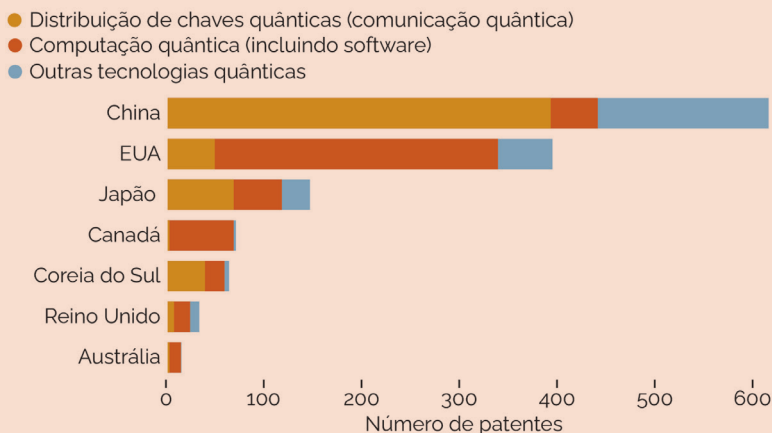
Hoje, os EUA têm parque tecnológico de desenvolvimento e ecossistema de pesquisa ricos em computação quântica. Eles são formados por Google, Microsoft, IBM e outras empresas, além de quase uma centena de *startups*.

Em 2019, a Google criou seu computador quântico, para resolver problemas específicos mais rapidamente do que um computador clássico. Essa conquista já foi superada pela China, que construiu computador mais rápido que o da Google.

O sucesso dos países líderes nessa área (em particular, China) deve-se ao apoio governamental a programas das tecnologias quânticas. Nos EUA, em 2018, foi aprovada, no Congresso, a Estratégia Nacional para Computação Quântica, com financiamento US\$ 1,2 bilhão – somem-se, a esse montante, verbas de agências com programas nesse campo. Por exemplo, o Departamento de Energia (DOE) destinou US\$ 625 milhões para cinco centros de pesquisas em informação quântica. A China está investindo US\$ 10 bilhões em um laboratório nacional de ciência da informação quântica.

## PATENTES QUÂNTICAS

Análise das patentes globais em tecnologia quântica desde 2012 mostram a China dominando comunicação quântica, mas os EUA estão à frente em computação quântica



**Figura 6. Distribuição de números de patentes em tecnologias quânticas**

CRÉDITO: ADAPTADO DE NATURE

## Materiais Quânticos

Vimos exemplos de como a tecnologia quântica pode ajudar nossa vida. Além da informação quântica, a tecnologia quântica inclui o uso de materiais quânticos, aqueles dotados de propriedades de natureza quântica que podem ser exploradas em aplicações especiais.

No futuro, teremos computadores que farão tarefas um milhão de vezes mais rapidamente que os supercomputadores atuais – e com baixo custo energético. Outro campo das novas tecnologias quânticas são sensores ultraprecisos que nos manterão informados sobre o que está acontecendo em certo local.

Esses dispositivos seriam úteis para, por exemplo, detectar concentração de patógenos e seriam compostos de materiais que podem alterar suas propriedades para fazer a tarefa desejada.

Provavelmente, ainda este século, essa ampla gama de materiais se tornará tão familiar como o silício é hoje. O conceito de materiais quânticos unifica campos da ciência e engenharia, do átomo frio à ciência dos materiais e computação quântica. Segundo classificação do DOE, materiais quânticos são todas

as plataformas de materiais versáteis que nos possibilitam explorar fenômenos quânticos emergentes, bem como seus usos potenciais em tecnologia futura.

Na história, os grandes avanços na tecnologia sempre foram acompanhados por revolução nos materiais. E, hoje, não é diferente: vemos avanços disruptivos em materiais quânticos aplicados à ciência da informação quântica, desenvolvimento de sensores, armazenamento de informações e em comunicação.

O campo de materiais quânticos tem evoluído por causa da descoberta de novos materiais e novos fenômenos que neles ocorrem. À nossa frente, vemos desafios, como a fabricação em escala econômica, o controle de interfaces, a operação de sistemas em temperatura ambiente (ou de nitrogênio líquido) e sua integração com a eletrônica convencional baseada no silício.

No passado, a área de materiais quânticos incluía basicamente supercondutores não convencionais e sistemas de férmions pesados. Hoje, com novas descobertas, o conceito e o âmbito dessa área são mais amplos e englobam pesquisa em propriedades topológicas da matéria, materiais 2D, fenômenos de *quantum spin Hall* etc.

Essa é área estratégica para desenvolvimento de nossas indústrias. No momento, há necessidade de formação em recursos humanos – em particular, pessoal de engenharia e física experimental com base sólida no conhecimento de novos materiais que apresentam na forma macroscópica fenômenos quânticos.

## RECOMENDAÇÕES

**Construir** infraestrutura computacional que possa contribuir para integração interdisciplinar de programas voltados ao desenvolvimento nacional. Criar iniciativa nacional para promover integração entre física, química, biologia, medicina, agricultura, geologia e engenharias, a qual deve apoiar formação de recursos humanos.

**Fortalecer** centros de computação já existentes e criar outros voltados para computação de alto desempenho, bem como produção, gerenciamento e armazenamento de dados essenciais para a segurança nacional. A estrutura do Cenapad poderia ser usada para reestruturar novos centros de computação de alto desempenho.

**Além** do oferecimento de supercomputadores, esses centros devem se aprofundar no entendimento das demandas de usuários, auxiliando no desenvolvimento de soluções. Os avanços fundamentais estão relacionados a *big data*, inteligência artificial e aprendizado de máquina, todos relacionados à computação de alto desempenho e dependentes de centros de computação de ponta. É importante ter estrutura física e capital humano formado por cientistas de excelência nessas áreas.

**No campo** das tecnologias quânticas, incentivar, por meio de programas, a criação de centros de informação quântica e materiais quânticos em nossas faculdades de engenharias, institutos de física e unidades de pesquisa dos ministérios.

**Promover** programas em parcerias academia-indústria. O setor privado deve estar aberto a novas abordagens, colocando recursos em pesquisa e desenvolvimento na área das tecnologias quânticas.

**Incluir** mecânica quântica nas fases iniciais do ensino de física, química, engenharias – e no ensino médio. A SBF está disposta a – e tem competência para – colaborar com essa iniciativa. Nos cursos de introdução às tecnologias quânticas, é preciso contratar pessoal que domine o tema.



# Educação básica



## Fundamento da prosperidade

**S**e um país quer tornar-se democrático e próspero, deve priorizar a educação básica. Os formuladores da Constituição de 1988 pensavam assim, tanto que nela foram incluídos artigos sobre a educação. O primeiro deles diz:

“Art. 205. A educação, direito de todos e dever do Estado e da família, será promovida e incentivada com a colaboração da sociedade, visando ao pleno desenvolvimento da pessoa, seu preparo para o exercício da cidadania e sua qualificação para o trabalho.”

Infelizmente, esse mandamento constitucional não foi seguido. Por isso, nosso país permanece no atraso.

O papel da educação básica é múltiplo. Garante às crianças oportunidades de sucesso mais equânimes – e democracia é, acima de tudo, igualdade de oportunidades. É essencial para que as crianças possam, no futuro, exercer plenamente suas cidadanias, algo fundamental para que o país avance politicamente. Ela aumenta a produtividade do trabalho, principal fundamento da prosperidade econômica.

Essa importância singular da educação básica levou-nos a dedicar este capítulo à sua defesa. O tema merece um capítulo longo, mas seremos breves, atendo-nos a princípios. A educação superior é tratada no capítulo Infraestrutura de Pesquisa, que também trata da formação de recursos humanos.

A educação no Brasil, em todos seus níveis, tem limitações que precisam ser sanadas. Mas as mais graves decorrem de falhas de formação na educação básica –mãe das outras. Os alunos ingressam no ensino superior com tantas de-

ficiências que os primeiros dois anos de estudo são dedicados em parte a saná-las. Isso atrasa e prejudica a formação superior na graduação e pós-graduação.

## Diversidade e desafios

Um sistema educacional eficaz – ou seja, que leve à formação de cidadãos e cidadãs não só qualificados para atividades profissionais, mas também capacitados para satisfazer sua curiosidade e suas aspirações intelectuais e sociais – tem sido constante objetivo de quase todas as sociedades, com matizes ideológicos e estruturas econômicas específicos para cada uma delas.

Embora tenha havido avanço na compreensão dos processos que desempenham papel relevante no aprendizado cognitivo, emocional e social, ainda permanecem visões distintas (e, por vezes, conflitantes) sobre os objetivos do ensino formal e seus métodos – em particular, no ensino médio.

Exemplo paradigmático: comparação entre duas famosas citações de Einstein, “Educação é o que em nós permanece depois de termos esquecido o que aprendemos na escola” e “É um milagre que a curiosidade sobreviva à educação formal”. Somemos a elas recente definição no World Economic Forum (2016): “A educação pode ser definida como o estoque de habilidades, competências e outras características que aumentam a produtividade” – note-se o lado utilitarista do conhecimento.

Essa questão está presente na política educacional brasileira e é atual, face à implantação da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para o ensino médio. Os princípios sobre os quais a BNCC está fundamentada são adequados, de forma genérica. Exemplo é que as orientações pedagógicas são norteadas para o desenvolvimento de competências, ou seja, “o que os alunos devem saber” e “o que os alunos devem saber fazer”.

Outro exemplo é o entendimento do que deve ser garantido a estudantes do ensino médio: “ser protagonistas de seu próprio processo de escolarização”, para “permitir-lhes definir seu projeto de vida, tanto no que diz respeito ao estudo e ao trabalho como também no que concerne às escolhas de estilos de vida saudáveis, sustentáveis e éticos”.

Mas a descrição detalhada dos chamados itinerários formativos – essenciais para a flexibilização dos currículos para o ensino médio – é confusa (e preocupante), pois é caracterizada por generalidades, inconsistências e equívocos com relação a quem e o que ensinar e à conceituação de competências específicas –

especialmente, para as ciências da natureza e suas tecnologias.

Como apontou Simon Schwartzman, em artigo de opinião no jornal *O Estado de São Paulo*, em 11 de março deste ano, a proposta tem como resultado:

“aumentar o tamanho e os conteúdos da parte de formação comum do ensino médio, e adotar, para os diferentes itinerários de formação, uma classificação formal e arbitrária de áreas de conhecimento (linguagem, matemática, ciências da natureza, ciências sociais), ao invés de temas mais próximos das áreas de formação profissional (tecnologia e engenharia, ciências da saúde, profissões sociais, humanidades), como se dá no resto do mundo”.

Esse esquema de itinerários formativos permite, em princípio, que estudantes possam concluir o ensino médio sem ter noção básica de biologia, física, química – disciplinas agrupadas em um mesmo itinerário.

Neste documento, comentamos consequências dessa política no que diz respeito ao aprendizado de física, mas parte de nossa análise é válida para outras disciplinas.

A importância do conhecimento para o progresso econômico e social (fato reconhecido) fica evidente à medida que avançamos neste século. No aspecto econômico, a competitividade de uma nação depende da capacidade de sua indústria inovar e aprimorar seus produtos com base no avanço científico e tecnológico.

Para assimilar e saber usar esses avanços, é preciso sólida formação, tanto formal quanto informal, de seus profissionais. Mas ameaças e desafios globais estão se tornando evidentes neste século, como mudanças climáticas, pandemias, produção sustentável de energia e alimentos etc.

O enfrentamento desses desafios – visando ao desenvolvimento sustentável e socialmente justo – requer formulação de políticas públicas ancoradas no progresso científico e tecnológico. Em uma democracia, isso implica dar a cidadãos e cidadãs formação adequada para compreender e saber avaliar alternativas e propostas de políticas públicas.

Finalmente, há que se considerar que o desejo dos jovens de satisfazer suas curiosidades e seus anseios fica evidente no mundo globalizado da atualidade. Retornando à segunda citação de Einstein, a educação formal não pode castrar a curiosidade nata dos jovens, pois esta é o principal fator para surgimento de saber e progresso disruptivos.

Resumindo: a educação no ensino médio deve garantir conhecimento para que o cidadão e a cidadã possam entender questões básicas relacionadas à vida em sociedade, bem como satisfação de suas curiosidades. Tem também que ofe-



recer aprofundamento adequado para suas escolhas de atuação profissional.

A seguir, comentamos consequências desse entendimento para o aprendizado de física no ensino médio.

No cenário internacional, não há consenso sobre o aprendizado de física no ensino médio. Em 2001, em artigo para o periódico *Physics Today* (v. 54, n. 11, 2001), o prêmio Nobel Leon Lederman (1922-2018) argumentou que, pedagogicamente, faz mais sentido a física ser ensinada como uma das primeiras disciplinas do ensino médio, porque fornece fundamentos para a biologia e a química.

Apesar de essa proposta ter sido abraçada pela Associação Norte-americana de Professores de Física, acabou não implantada. Além disso, nos EUA, não há regulamentação sobre o ensino de física com validade nacional – só cerca de 30% de estudantes do ensino médio fazem um curso dessa disciplina.

Na maioria dos países da Europa e do Oriente, praticamente todos os estudantes de ensino médio aprendem noções básicas de física, mas com diferentes enfoques. Segundo a Sociedade Europeia de Física, há divergência em toda a Europa sobre a conveniência de ensinar disciplinas científicas separadamente ou como disciplina integrada.

**82**

Mas há consenso: é importante que estudantes apreciem diferenças de método que as caracterizam – particularmente, em níveis mais avançados. No Reino Unido, estudantes dos estádios 3 (11 a 13 anos) e 4 (14 a 16 anos) têm aprendizado integrado em ciências, visando ao entendimento do mundo por meio da biologia, física e química – em física, o currículo cobre tópicos usuais, de mecânica a eletromagnetismo, bem como noções de física moderna.

Na Coreia do Sul, o currículo de física enfatiza desenvolvimentos recentes em tecnologias relacionadas à física e suas conexões com o dia a dia. No Japão, enfatiza-se o entendimento de conceitos.

Em trabalho publicado em *Journal of Physics: Conference Series* (v. 1.512, p. 012011, 2020), S. Ramaila fez análise comparativa dos currículos de física para o ensino médio na Índia, em Gana e na África do Sul. Embora haja diversidade de enfoque e nível, praticamente todos os estudantes passam por formação em física em dois níveis distintos – de certa forma, reproduzindo os históricos currículos Cambridge Nível A e Cambridge Nível O.

O ensino de ciências da natureza na BNCC está baseado na concepção de ensino integrado – e não em disciplinas científicas em separado. De fato, a interdisciplinaridade permeia os modernos avanços científicos e tecnológicos, ela é necessária para a formulação de estratégias ao desenvolvimento sustentável.

Mas não há interdisciplinaridade sem adequado domínio de conceitos fun-

damentais das disciplinas que dela fazem parte. Embora a solução de problemas do mundo real requeira tratamento multidisciplinar, o poder dela decorre de diferenças entre disciplinas básicas – e não de suas similaridades.

Nesse aspecto, o esquema de competências específicas e habilidades para ciências da natureza proposto na BNCC é falho e demonstra conceitualização pedagógica equivocada de como fundamentos de biologia, física e química devem ser ensinados. Por exemplo, o objetivo da Competência Específica I é:

“analisar fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas interações e relações entre matéria e energia”. Esse objetivo seria alcançado por meio do estímulo a “estudos referentes a: estrutura da matéria; transformações químicas; leis ponderais; cálculo estequiométrico; princípios da conservação da energia e da quantidade de movimento; ciclo da água; leis da termodinâmica; cinética e equilíbrio químicos; fusão e fissão nucleares; espectro eletromagnético; efeitos biológicos das radiações ionizantes; mutação [...]”.

Considerando só o conteúdo de física nesses ‘estudos’, as falhas pedagógicas são evidentes. Por exemplo, os princípios de conservação de energia e quantidade de movimento não são triviais, ou seja, são difíceis de aprender e saber aplicar. Normalmente, são introduzidos depois de conceitos básicos de mecânica clássica terem sido discutidos e assimilados.

A BNCC não estabelece como esses princípios de conservação poderiam ser ensinados por meio de rota distinta. Analisando outros tópicos (estrutura da matéria, leis da termodinâmica – incluiria a segunda lei? –, fusão e fissão nucleares, espectro eletromagnético etc.), fica evidente que eles só poderão ser tratados de forma superficial, não levando à formação científica necessária para que o cidadão e a cidadã sejam capazes de participar efetivamente da sociedade e tomada de decisões.

Cabe aqui indagar quais professores teriam capacidade de ensinar esse esquema interdisciplinar e orientar esses estudos. Essa questão parece ser respondida pelo Conselho Nacional de Educação (CNE), por meio da promulgação das Resoluções 01/2019 e 02/2019, as quais modificam as Diretrizes Curriculares Nacionais para Formação de Professores – iniciativa analisada na sequência.

Outra falha preocupante no esquema de competências específicas e habilidades para ciências da natureza é a falta de enfoque em trabalhos ou demonstrações experimentais – como ocorre no ensino de outros países.

A falta de contato com atividades experimentais – que deveriam iniciar-se no ensino fundamental – vem deteriorando o ensino fundamental e médio no país, impedindo a percepção do caráter experimental do método científico e criando em estudantes temor de usar instrumentos.

O ensino fundamental e médio no Brasil é livresco: quase todo o aprendizado experimental e instrumental ocorre só por meio de educação teórico-expositiva. Essa deficiência torna-se acentuada no ensino de física e é uma das principais razões da dificuldade (rejeição) que estudantes sentem com relação à disciplina.

A relevância da atividade experimental foi enfatizada, em 1906, pelo físico Charles Mann (1869-1942), no livro *The Teaching of Physics for Purposes of General Education* (The Macmillan Company, 1912):

“Quando a ciência foi introduzida nas escolas, foi naturalmente ensinada [...] dogmática e dedutivamente. Mas agora é hora de percebermos que a ciência é o nosso processo de interpretação de fenômenos naturais [...]. Assim, para que os jovens se tornem adeptos da ciência, eles devem ser ensinados a interpretar por eles mesmos. Eles devem desenvolver o hábito de fazer interpretações sensatas de fenômenos – um hábito que pode ser adquirido apenas pelo método científico”.

No 11º capítulo desse livro, Mann situa a ponte representada pela atividade experimental no ensino de física: ir do concreto para o abstrato. Esse aspecto fundamental do método científico é considerado superficialmente na BNCC, sendo quase ignorado na descrição das competências específicas e habilidades para ciências da natureza.

Essa falta de apreço pelas atividades experimentais tem pano de fundo: péssimas instalações de escolas brasileiras, falta de motivação e/ou preparo de professores – voltaremos ao tema – e pouco tempo de permanência de estudantes na escola.

Mesmo em escolas particulares, é raro encontrar laboratórios com instalações razoáveis e professores capacitados para organizar atividades experimentais – mesmo simples demonstrações em sala de aula.



Aspecto positivo da BNCC é a proposta de estender, num prazo de cinco anos, a carga horária mínima anual de 800 h para 1,4 mil h, configurando o ensino médio em tempo integral. Mas essa extensão só resultará em melhoria de aprendizagem se incorporar aumento das atividades experimentais e complementares ao ensino teórico-expositivo.

Consideramos que, no atual cenário de conhecimento de ciências naturais pela população brasileira, é necessário que os alunos do ensino médio curse pelo menos versão simplificada de biologia, física e química, com articulação entre professores para apresentação de questões e projetos multidisciplinares que estimulem a interlocução entre essas disciplinas.

Isso é possível no total de 450 h previsto na BNCC para ciências da natureza, desde que seja priorizado o entendimento de conceitos e aplicações simples – e não a habilidade de solucionar problemas teóricos complexos.

Para a física, essa versão simplificada seria equivalente ao currículo Cambridge Nível O, cobrindo tópicos de física geral, mecânica newtoniana, energia, gases e fluidos ideais, eletricidade e magnetismo, bem como conceitos de física moderna, por exemplo.

Esses tópicos poderiam ser ensinados em cerca de 150 h, incluindo atividades ou demonstrações experimentais – desde que planejadas. Estudantes que optassem por seguir carreiras que exigem conhecimentos especializados dessas disciplinas poderiam seguir cursos de, pelo menos, 300 h, em vez de versão simplificada.

No caso da física, essa versão completa seria equivalente ao currículo Cambridge Nível A, que cobre desde cinemática até noções de mecânica quântica, incluindo atividades ou demonstrações experimentais.

Essa proposta implica reformulação ampla do esquema de competências e habilidades da BNCC.

## **Déficit de formação adequada**

Qualquer que seja o sistema adotado, a questão fundamental é a deficiência de professores adequadamente formados em física. Esse problema fica agravado no esquema de ensino interdisciplinar da BNCC.

Segundo estudo publicado pelas pesquisadoras Iramaia de Paulo, da Universidade Federal de Mato Grosso, e Rita de Almeida, da Universidade do Rio Grande do Sul, na *Revista Brasileira de Ensino de Física* (v. 44, p. e20210392, 2022),

de 44.706 professores que lecionam física nas escolas públicas brasileiras, só 8.941 têm licenciatura específica (20% do total).

Isso significa que, no esquema proposto na BNCC, há risco de que o ensino e as atividades de física sejam abandonados ou executados com baixa prioridade. Não há perspectiva de que essa deficiência seja sanada em futuro próximo.

Segundo o relatório *Números da Física no Brasil*, do pesquisador Peter Schulz, da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), publicado pela Sociedade Brasileira de Física (SBF), em 2020, o número de graduados em física – tanto bacharéis (cerca de 20%) quanto licenciados (cerca de 80%) – tem oscilado em torno de 2 mil por ano.

Mesmo se bacharéis fossem treinados para dar aulas no ensino médio, esses números indicam que a atual formação de professores de física nas universidades brasileiras (públicas e privadas) está aquém de nossas necessidades.

Como já dito aqui, o CNE propõe que o problema de falta de professores capacitados para implantar a BNCC seja solucionado por meio de modificação das Diretrizes Curriculares Nacionais para Formação de Professores, que inclui a Base Nacional Comum para a Formação Inicial de Professores da Educação Básica (BNC-Formação).

A proposta do CNE é substituir licenciaturas em biologia, física e química por formação generalista – feita em faculdades de educação – de professor de ciências da natureza. Como alertou Marta Feijó Barroso, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, em artigo publicado na *Revista Brasileira de Ensino de Física* (v. 42, p. e20200187, 2020), “a configuração da BNCC, numa primeira e rápida leitura, não deixa espaço para a existência de um “professor de física do ensino médio””.

A SBF opõe-se a essa proposta. Propostas similares foram levantadas na Europa, e sobre elas a Sociedade Europeia de Física manifestou-se no documento *Position Paper on Physics Education* (2012):

“Todos aqueles envolvidos no ensino de física, independentemente de suas formações básicas, devem demonstrar entendimento robusto da física, que tenha autoridade, base ampla e seja atual. Em particular, os estudantes devem ter consciência de que física não é uma coleção desarticulada de fatos, regras e leis, mas abordagem bem coerente para dar sentido lógico ao mundo físico, usando seus recursos e solucionando problemas que vão dos puramente acadêmicos aos mais práticos. Para que isso ocorra, é vital que os programas, tanto para educação inicial quanto continuada de professores, tenham capacidade de atrair estudantes da mais alta qualidade, plenamente capazes de dominar os últimos desenvolvimentos da pesquisa em educação de física, tecnologia educacional e metodologia pedagógica, e de informar os mais recentes avanços e aplicações da física.”

Parece difícil que esses objetivos sejam alcançáveis na BNC-Formação, proposta pelo CNE.

Parte da solução do problema da deficiência de professores capacitados – não só em física, mas também em outras disciplinas – seria a necessária valorização da profissão, com salários adequados para os professores do ensino médio.

Mas, mesmo que isso ocorra, é preciso adotar iniciativas inovadoras (adicionais à formação universitária padrão), que permitam aprimorar o conhecimento de professores não graduados em física, dotando-os de recursos e meios para que possam adquirir e dominar o conteúdo que devem transmitir em classe.

Nesse sentido, uma iniciativa de êxito foi a criação do programa Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), pela SBF, em 2013. Ele é oferecido em 58 polos regionais, hospedados em universidades e institutos de pesquisa distribuídos pelo país, sob coordenação da SBF.

Cerca de 1.680 professores atuantes no ensino médio concluíram esse curso, apresentando dissertações voltadas principalmente para o desenvolvimento de métodos e ferramentas pedagógicas.

Segundo trabalho recente – citado acima – das pesquisadoras Iramaia de Paulo e Rita de Almeida:

“Todos os produtos educacionais (que podem ser de diferentes formatos: sequência didática, aplicativos, montagem de experimentos com Arduino e com materiais alternativos etc.) devem ser necessariamente planejados e fundamentados em alguma teoria de aprendizagem e metodologias bem estabelecidas na literatura e devem ser testados em sala de aula”.

Embora o número de formados seja pequeno em face ao que é necessário, o programa da SBF tem efeito multiplicador, aprimorando a qualidade do ensino nas escolas em que os professores atuam. Portanto, é essencial que o MNPEF seja apoiado e expandido, motivando iniciativas similares.

## RECOMENDAÇÕES

**Reformular** a BNCC para garantir que estudantes do ensino médio curssem pelo menos versão simplificada de biologia, física e química, oferecendo versões aprofundadas dessas disciplinas para quem quiser optar por carreiras que requeiram conhecimento especializado.

**Manter** a política atual de formação de professores em biologia, física e química, separadamente, mas incorporando, na estrutura curricular de cada especialidade, pelo menos, um curso de conceitos básicos das outras duas, para facilitar a interlocução necessária na formulação de propostas de atividades multidisciplinares.

**Reformular** o sistema de competências e habilidades da BNCC, para que conceitos básicos das disciplinas de ciências da natureza sejam apresentados de modo pedagogicamente lógico, progredindo dos tópicos de fácil compreensão para os mais complexos. É importante seguir o princípio de que a pedagogia eficaz constrói sobre o aprendizado e a experiência anterior do estudante, ou seja, “a melhor maneira de ensinar um conceito novo é misturar muito do que o aluno já sabe com um pouco do que ele desconhece”.

**Incluir** na BNCC proposta curricular de curso aprofundado de física, em dois anos, para estudantes que quiserem seguir carreira em ciências exatas e engenharia.


**Inserir** atividades experimentais nas competências específicas e habilidades para ciências da natureza.

**Apoiar** e ampliar o MNPEF, visando a sanar a grave deficiência de professores de física no país.

A SBF se dispõe a colaborar no detalhamento e na implementação dessas recomendações, usando sua larga experiência baseada nos mais de 900 professores que atuam no MNPEF e dos mais de 1.600 do ensino médio que nele se formaram.







**Infraestrutura  
para a ciência  
brasileira**

## Produção de ciência e tecnologia

A pesquisa científica e tecnológica requer estabilidade e previsibilidade com relação a recursos humanos e financeiros, bem como ambiente nacional pró-pesquisa, que inclui equipamentos abertos a multiusuários, centros multidisciplinares, redes de indústrias inovadoras, acesso à literatura e a colaborações internacionais, além de infraestrutura digital.

A formação dos recursos humanos necessários dá-se primordialmente nas instituições de ensino superior (IES), e o desenvolvimento do ambiente nacional pró-pesquisa é planejado por órgãos dos governos federal e estaduais.

O sistema universitário brasileiro está desenvolvido, embora sofra com imprevisibilidade de financiamento de sua infraestrutura – principalmente, no tocante à manutenção de laboratórios e ao financiamento de bolsas em todos os níveis (tanto na quantidade quanto no valor), bem como de atividades de intercâmbio nacional e internacional. Agenda nacional de desenvolvimento deve envolver ciência, tecnologia e inovação.

O planejamento e desenvolvimento do ambiente nacional pró-pesquisa brasileiro carece de melhor projeto, o qual depende de critérios para decidir prioridades. Acreditamos que essa falta de critérios decorre da ausência de agenda industrial nacional que reflita as necessidades e o real potencial do país.

Igualmente importante, na comunidade científica, não há consenso sobre as prioridades da pesquisa científica e de inovação do Brasil. A consequência é que a escolha das prioridades de investimento em infraestrutura acaba decidida pelas habilidades e o prestígio políticos de diferentes grupos de pesquisa.

É preciso ter planejamento de crescimento baseado na ciência e tecnologia que seja administrado de forma coordenada e impessoal. No momento, o país



conta com um conjunto de centros de pesquisa que são importantes isoladamente, mas que não formam uma infraestrutura nacional coerente que possibilite melhor desempenho da ciência feita no Brasil.

A pesquisa científica e tecnológica no Brasil é essencialmente feita em IES, unidades de pesquisa dos ministérios (por exemplo, Ministério da Saúde e Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação) e empresas (Petrobras, Embrapa, Embraer etc.).

Além da pesquisa realizada *in loco*, encontramos aquela feita em rede, por meio dos Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia, ou em colaboração com laboratórios internacionais (CERN, Observatório Pierre Auger etc.).

Com exceção das empresas, o financiamento dessa atividade científica e tecnológica é essencialmente governamental, vindo de órgãos como as fundações estaduais de amparo à pesquisa ou do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).

Assim, para entendermos o funcionamento da infraestrutura para ciência e tecnologia e propor melhorias para ela, analisaremos a participação dos órgãos citados acima.

92

Enfatizamos que a produção de ciência e tecnologia requer recursos financeiros importantes. Mas eles podem – e devem – retornar à sociedade por ganho de produtividade e geração de indústrias com produtos de alto valor agregado.

Ciência bem inserida na sociedade retribui o financiamento recebido. Há exemplos de países que, na década de 1980, estavam no mesmo patamar de desenvolvimento científico e tecnológico que o Brasil. Essas nações investiram fortemente em educação e pesquisa científica, e o resultado foi o crescimento de seus PIBs como consequência da inovação gerada por ciência e tecnologia de vanguarda.

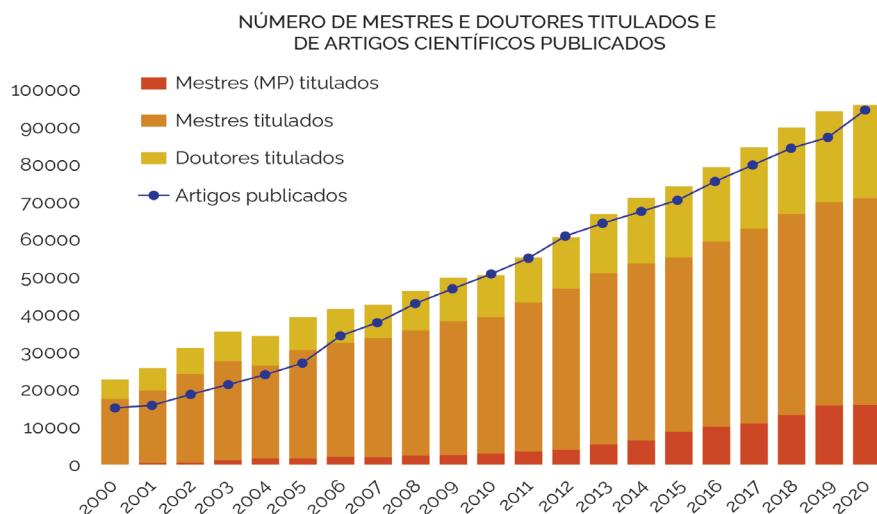
O Brasil ainda precisa dar esse passo.

## **IES e recursos humanos**

No Brasil, a maioria dos físicos dedicados à pesquisa científica e/ou tecnológica trabalha em IES (universidades, institutos federais etc.). Esse ambiente propiciou aumento tanto da produção científica, medida em termos de artigos científicos publicados em revistas de circulação internacional, quanto formação de recursos humanos para a pesquisa científica e tecnológica.

As razões desse sucesso: liberdade de escolha do que pesquisar, plano de carreira e avaliação de desempenho por pares, além de carga horária em sala de aula próxima do ótimo.

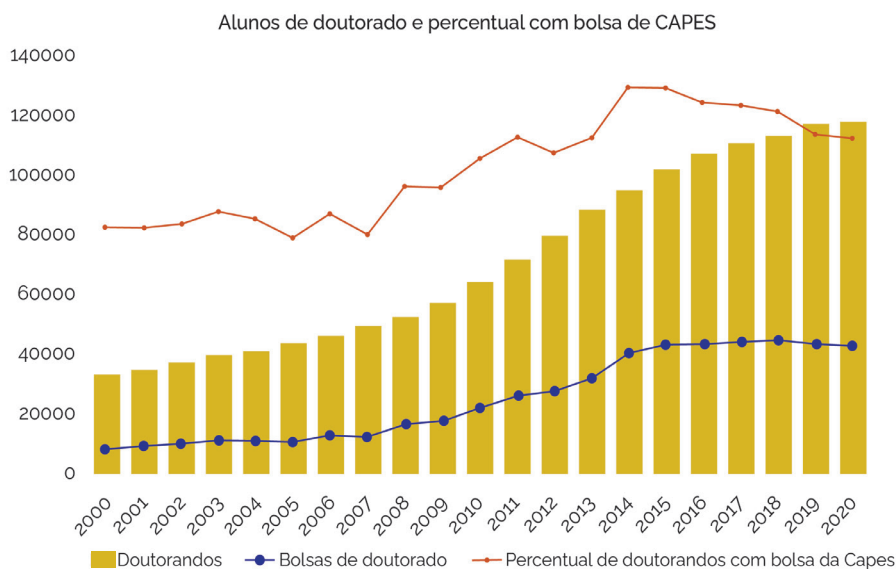
Não menos importante é a formação contínua de novos quadros para esse ambiente. A figura 1 mostra a evolução (monótona) do número de estudantes que obtiveram títulos de mestrado e doutorado desde 2001, além do número de artigos publicados em cada ano. A correlação entre os titulados e o número de publicações não poderia ser mais clara.



**Figura 1. Evolução do número de mestres e doutores e de artigos publicados; sigla MP, para mestrado profissional** CRÉDITO: O. A. DELLAGOSTIN, REVISTA DA FACEPE (VOL. II, N. 6, 2021)

Mas, ano passado, houve decréscimo de 18% no número de doutorados defendidos no país. Ainda não estão claros os motivos disso – a pandemia é variável confusa na análise. Por sua vez, a figura 2 mostra que, em 2016, inicia-se redução na fração de alunos de mestrado e doutorado com bolsas da Capes e, por causa do retardo da resposta, a consequência pode ter se manifestado apenas ano passado.

Vale ressaltar que num sistema em expansão (no caso, o de pós-graduação do país), o congelamento do número de bolsas reduz a fração de estudantes com bolsa. Seja como for, o fato de o número de titulados ano passado ter sido reduzido merece atenção: desde o momento em que se iniciou a coleta de dados, houve evolução do número de doutorados.



**Figura 2. Evolução de estudantes de doutorado e fração do número de bolsas Capes** CRÉDITO: O. A. DELLAGOSTIN, REVISTA DA FACEPE (VOL. II, N. 6, 2021)

É essencial expandir o sistema de pós-graduação no Brasil, pois, embora tenhamos crescido em quantidade e qualidade tanto em recursos humanos quanto em publicações, o número *per capita* de doutores no país ainda é baixo, a julgar pelo observado em países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE).

No Brasil, a fração de pessoas entre 25 e 64 anos com doutorado é de 0,2% – a média dos países da OCDE é de 1,1%. E só 0,8% da população brasileira nessa faixa etária tem mestrado e/ou doutorado – nesse caso, a média na OCDE é de 13%.

Esses números são consequência do fato de apenas 21% de nossa população entre 25 e 34 anos ter diploma de educação superior. Tal cenário, em conjunção com a redução do número de bolsas de pós-graduação, explica o menor desempenho do Brasil em comparação com a média dos países da OCDE.

Mas, se a intenção é chegar aos números dos países da OCDE, não basta voltarmos ao patamar de 2014 em relação ao número de bolsas e financiamento da pesquisa. É necessário atrair mais estudantes para os cursos de física ou similares. Isso acontece naturalmente quando a indústria baseada em ciência absorve pessoas com diploma de nível superior, oferecendo a elas empregos que lhes são interessantes.

No entanto, ainda não temos essa indústria e precisamos de mais gente com formação em ciência e tecnologia para viabilizá-la. Para vencer o impasse, é preciso agir concertadamente, com ações para educar, no ensino médio, mais estudantes em ciências básicas e matemática, bem como criar estímulos para o surgimento de empresas inovadoras que empreguem pesquisadores de vários níveis.

Cabe ressaltar que o país não tem tecnologia de educação nem financiamento necessário para isso. O aprendizado necessário para isso é feito com base em tentativas, medição de indicadores adequados e ações corretivas sucessivas. Sem esse planejamento de longo prazo, não se conseguirão os resultados necessários.

Nas últimas décadas, observamos expansão (com financiamento público) de IES privadas com má qualidade de ensino e pesquisa, organizadas como empresas privadas em que o lucro parece ser o único objetivo.

Esse fenômeno contribuiu para o agravamento do quadro discutido no parágrafo anterior, uma vez que, em sua maioria, os cursos oferecidos por essas instituições são os que mais dão retorno financeiro, pois dispensam manutenção de corpo docente qualificado e com carga de ensino condizente com dedicação à pesquisa científica.

Hoje, como consequência disso, o número de alunos formados em cursos baseados em ciência (engenharias, ciências básicas, matemática, computação e tecnologia) é baixo em comparação com os formados em direito, administração e pedagogia – e estão aquém da média dos países da OCDE (tabela 1).

Já somos a 9ª economia do mundo, mas apenas o 15º produtor de ciência. Mais grave ainda: ficamos aquém em número de empresas de base tecnológica, se comparados com países como Coreia do Sul.

A inovação é geralmente feita com colaboração da indústria, mas a formação de pessoal para a inovação se dá principalmente nas IES. Mas, entre estas últimas, são poucas as com estrutura que possibilite boa formação desses quadros, no tocante tanto aos currículos dos cursos de graduação e pós-graduação quanto à estrutura departamental – a qual não facilita pesquisas multidisciplinares.

Há outro problema. A concessão de bolsas de pós-graduação desconsidera que o tempo de formação de um cientista experimental é mais longo que o de um teórico. Isso ocorre em todo o mundo, mas, no Brasil, as deficiências da infraestrutura laboratorial aumentam o tempo de formação de experimentais.

Isso contribui para que tenhamos poucos cientistas experimentais, e, por isso, nossa ciência seja mais teórica. Isso fica notório no caso da física. Enquanto, no mundo industrializado, há pelo menos dois experimentais para cada teórico, há, no Brasil, mais teóricos do que experimentais.

ÁREA GERAL DO CURSO	Ingressantes			Concluintes		
	OCDE 2015	Brasil		OCDE 2019	Brasil	
		2014	2020		2014	2020
Ciências naturais, matemática e estatística	4.0	2.0	2.1	2.9	0.7	0.6
Computação	2.4	7.2	10.8	1.7	2.1	2.4
Engenharia, produção e construção	10.5	23.2	14.8	8.1	4.7	7.2
Agricultura, silvicultura, pesca e veterinária	1.1	3.3	4.3	0.9	1.0	1.4
Saúde e bem-estar	6.5	21.7	33.0	6.6	7.0	10.0
Serviços	2.2	3.1	6.8	2.0	1.1	1.7
Educação	4.9	28.2	33.2	4.9	10.8	11.5
Artes e humanidades	7.9	3.3	4.7	6.1	1.4	1.4
Ciências sociais, comunicação e informação	7.0	7.0	8.5	6.1	2.2	2.7
Negócios, administração e direito	15.2	54.0	59.2	12.7	19.9	21.6

**Tabela 1. Número de ingressantes e concluintes por 10 mil habitantes em cursos superiores por área do curso. Média dos países da OCDE em 2015 e do Brasil em 2014 e 2020** CRÉDITOS: MEC/INEP, IBGE E OCDE

O desequilíbrio experimento-teoria de nossa ciência impossibilita sua inserção na vida do país nos padrões hoje vistos no mundo desenvolvido. O desenvolvimento de tecnologia nas indústrias requer mais cientistas experimentais do que teóricos, e, por não satisfazer essa condição, o Brasil não tem quadros capazes de promover mudança rápida rumo a indústrias mais inovadoras.

Na verdade, a criação de indústrias inovadoras nos países de desenvolvimento tardio deu-se principalmente pelo surgimento de *startups* criadas por engenheiros ou cientistas experimentais. A Sony é às vezes citada como exemplo paradigmático desse fenômeno.

Criada em 1946, por um físico experimental e um engenheiro eletrônico,

ela foi a primeira empresa a usar o transistor em um produto. O diodo Esaki, inventado na Sony na década de 1950, resultou no prêmio Nobel ao seu inventor, Leo Esaki.

Nossa deficiência experimental compromete a qualidade de toda nossa ciência, incluída a teórica. Isso porque, exceto em áreas peculiarmente teóricas (por exemplo, teoria de campos), o desenvolvimento de ciência de fronteira ocorre pelo diálogo entre cientista experimental e teórico, no qual o primeiro descobre fatos novos que pedem modelagem ou explicação teórica, e o segundo faz avanços teóricos com previsões que precisam ser testadas.

A busca de melhor equilíbrio entre as atividades experimentais e teóricas é urgente, mas tem de ser feita com cautela. Consideremos o caso específico da física. Como não temos nem infraestrutura laboratorial, nem orientadores suficientes para formar o número de experimentais de que necessitamos, há risco de que, na correção de rumos, percamos a qualidade do pessoal formado.

Solução recomendada: envio de mais estudantes para estudos de pós-graduação em áreas experimentais em universidades renomadas no exterior.

## Unidades de pesquisa do MCTI

O papel desempenhado pelas unidades de pesquisa dos ministérios é o desenvolvimento de um ambiente pró-pesquisa no país. Para qualificarmos esse ambiente, citaremos dois pontos.

O primeiro é que parte do que se faz hoje em ciência está relacionado com multidisciplinaridade, focada na solução de problemas. O segundo é que pesquisa científica de vanguarda requer o desenvolvimento de instrumentos inovadores.

Citando Freeman Dyson (1923-2020): “O efeito de uma revolução provocada por novos conceitos é explicar velhas coisas de novas maneiras. O efeito de uma revolução provocada por novas ferramentas é descobrir coisas novas que precisam ser explicadas”.

Os dois pontos permeiam nossa discussão.

Além do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), outros ministérios têm unidades onde se faz pesquisa. Por exemplo, o Ministério da Saúde tem a Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz), seu centro mais importante nessa área.

Mas a pesquisa em saúde e a disponibilização de recursos e serviços de alta complexidade (vacinas, por exemplo) podem apresentar fronteiras não defi-

nidas. O tratamento de tuberculose e a pesquisa de novas terapias são ambos feitos pela Fiocruz. O mesmo acontece no Instituto Nacional de Câncer, no Rio de Janeiro (RJ), e no Instituto do Coração, em São Paulo (SP).

A saúde é área em que a pesquisa multidisciplinar acontece por excelência, e sua necessidade é clara. A física pode contribuir para pesquisas voltadas à saúde. Isso também é verdade no que tange ao agronegócio, que, com a contribuição de pesquisas da Embrapa, tornou-se a atividade que mais avança no Brasil. Estudo dos solos, equilíbrio de ecossistemas, manutenção de biomas e modelagem do clima são exemplos em que instrumentação e modelagem são necessárias – e isso requer a contribuição da física.

Agora, foquemos no MCTI, que dispõe de grande infraestrutura de unidades de pesquisa. Mas ela está composta de modo que não reflete a necessária agenda de desenvolvimento autônomo do país. A maioria dessas unidades está voltada para desenvolver o ambiente necessário pró-pesquisa, de uma maneira ou outra. Porém, esses órgãos foram criados com motivações localizadas no tempo, espaço ou na disciplina, sem planejamento global para a instalação de infraestrutura voltada para o desenvolvimento da ciência e tecnologia no Brasil.

Neste documento, vamos descrever alguns desses órgãos, ressaltando sua relevância como facilitadores do desenvolvimento científico e tecnológico.

## Centros de pesquisa multiusuários

O Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e o Instituto de Matemática Pura e Aplicada (IMPA) têm por principal objetivo o desenvolvimento da pesquisa básica, buscando excelência internacional.

Os posicionamentos desses dois órgãos no cenário nacional da física ou matemática não são idênticos, mas similares. O IMPA já atingiu o patamar de um dos melhores do mundo, e o CBPF organiza e representa o Brasil em diferentes colaborações internacionais, como as no Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (CERN) ou Observatório Pierre Auger.

Essas colaborações colocam cientistas do país em contato com ciência básica de vanguarda e alta relevância, além de propiciar o desenvolvimento de instrumentação para os experimentos de larga escala, no qual há participação eventual de empresas brasileiras no fornecimento de equipamento com especificações técnicas e controle de qualidade rigorosos.

Ainda em pesquisa básica, há outros dois centros importantes, dedicados à



astronomia: Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA) e o Observatório Nacional – este último com participação em grandes projetos internacionais, além de contribuições para a geofísica nacional.

É fundamental para o país a participação de pesquisa básica nesse nível, que impacta não só na formação de estudantes, mas também no estabelecimento de comunidade de cientistas em ressonância com a internacional.

## Grandes instalações de pesquisa

Há pesquisas que requerem uso de equipamentos caros de maneira esporádica. A solução para a otimização da utilização desses equipamentos é o compartilhamento com a comunidade de pesquisa e inovação. Esses equipamentos são complexos, exigem treinamento para uso e têm manutenção dispendiosa que demanda recursos humanos dedicados a essa tarefa. Podem ser adaptados para a obtenção de medidas específicas – o que costuma ser o caso na pesquisa de vanguarda.

Temos dois casos no Brasil: Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC) e Centro Nacional de Pesquisas em Energia e Materiais (CNPEM). Esses órgãos contam com equipes de cientistas residentes de diferentes disciplinas que desenvolvem suas pesquisas no local – o que propicia o diálogo multidisciplinar. Além disso, suas instalações estão abertas a pesquisadores da academia ou das empresas.

O LNCC dispõe do Santos Dumont, o supercomputador acadêmico mais veloz da América Latina, com capacidade de processamento de 5,1 quatrilhões de operações por segundo. É adequado para tratamento de sistemas complexos que requeiram alto poder de cálculo. A instituição conta com curso de mestrado e doutorado.

O CNPEM tem quatro laboratórios de referência mundial, abertos à comunidade científica e empresarial. O maior deles é o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), grande instalação multiusuário que contém o Sirius, fonte de luz síncrotron de quarta geração dedicada ao estudo de materiais, orgânicos e inorgânicos.

Os outros três laboratórios do CNPEM são focados em temas ou disciplinas. O Laboratório Nacional de Biociências (LNBio) desenvolve pesquisas em áreas de fronteira da biociência, com foco em biotecnologia e fármacos; o Laboratório Nacional de Biorrenováveis (LNBR) foca no desenvolvimento sustentável de biocombustíveis avançados, produtos bioquímicos e biomateriais, empregando a biomassa e biodiversidade brasileira; o Laboratório Nacional de Nano-

tecnologia (LNNano) faz pesquisas em materiais nanométricos avançados com potencial econômico para o país.

O Sirius é emblemático do potencial de inovação de grande instalação para fins científicos. Trata-se da fonte de luz síncrotron de maior brilho do mundo, entre as fontes em sua faixa de energia. É a mais complexa instalação científica já montada no país.

Para sua construção, foi preciso resolver problemas tecnológicos inéditos que envolvem a engenharia civil, para evitar que vibrações interfiram no feixe



Figura 3. Visão aérea do Sirius CRÉDITO: LNLS

de partículas que emite a luz síncrotron; engenharia eletrônica, para os equipamentos que controlam o feixe; e instrumentação para programar, gerenciar e realizar experimentos.

Entre cientistas da área de física, química, engenharia e de suporte, o Sirius conta com mais de 200 pessoas permanentes, e cada uma de suas linhas desenvolve tipos diferentes de experimentos. Nelas, a comunidade científica do Brasil tem a oportunidade de desenvolver pesquisas e colaborar com indústrias de alta tecnologia. A figura 3 dá ideia da dimensão do Sirius.





A ciência tem dois propósitos: entender e manipular a natureza. Sem entender, não podemos manipular; sem manipular, não ficam justificados os recursos investidos na produção de ciência.

A resolução de problemas brasileiros exige em sua maioria enfoque multidisciplinar. Comumente, esses problemas resultam do pouco entendimento e controle de sistemas complexos, como biomas e organização das cidades. A organização em órgãos por disciplinas não é adequada quando o foco é o gerenciamento de sistemas complexos – daí, a necessidade de centros temáticos multidisciplinares.

Sistemas complexos envolvem diferentes escalas de tempo e tamanho, as quais se mesclam, podendo ser o resultado de longo processo de evolução, repleto de contingências – por exemplo, a evolução poderia seguir diferentes caminhos, mas apenas um aconteceu.

A consequência é que ao estudarmos sistema assim é preciso, por engenharia reversa, descobrir os passos que foram tomados. O conhecimento sobre o sistema é repleto de detalhes necessários para sua manipulação efetiva.

Exemplos típicos são os biomas naturais, como a mata Atlântica ou a Amazônia, que dependem do clima global e da massa de organismos unicelulares, elementos que cobrem muitas escalas e são compostos por conjunto de espécies resultantes da evolução dos organismos e das relações entre eles.

Portanto, a infraestrutura de pesquisa científica e tecnológica para possibilitar a proteção e exploração de nossos biomas passa por centros dedicados ao estudo de cada bioma. Nesse caso, a existência de órgãos do MCTI, como o Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Instituto Nacional do Semiárido (INSA) e Instituto Nacional da Mata Atlântica (INMA), é essencial para a solução de problemas brasileiros.

Outros dois órgãos com propósitos bem definidos são o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Agência Espacial Brasileira (AEB). O primeiro realiza larga gama de atividades dependentes de novas tecnologias que têm como objetivo, por exemplo, monitoramento de biomas, projetos e construção de satélites, bem como capacitação e qualificação da indústria no fornecimento de produtos para a atividade aeroespacial e afins.

Suas atividades envolvem também a formação de pessoal em programa de pós-graduação nos seguintes temas: astrofísica, engenharia e tecnologia espa-

ciais, geofísica espacial, computação aplicada, meteorologia, sensoriamento remoto e ciência do sistema terrestre.

A AEB é responsável pela base de lançamento de Alcântara (MA) e tem unidades de pesquisa também em Natal (RN) e São José dos Campos (SP). A AEB e o Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) publicaram recentemente o relatório Pedidos de Patente de Tecnologias Relativas ao Setor Aeroespacial: Panorama do Cenário Brasileiro e Potenciais Contribuições ao Programa Artemis.

O objetivo desse documento é identificar patentes brasileiras que poderiam ser desenvolvidas para o programa Artemis, da NASA, que visa a viagens à Lua, com permanência humana de longa duração ou processos que possibilitem a sustentabilidade da vida em ambientes extraterrestres. As patentes identificadas são tanto da área aeroespacial quanto de outras, como saúde. Esse é exemplo de como a existência da infraestrutura formada por AEB-INPE-Universidades induz pesquisa e inovação.

Há centros voltados para atividade essencial para a sociedade – embora alguns não fiquem restritos a isso. Um deles é a Rede Nacional de Pesquisa, responsável pela implantação, pelo desenvolvimento e pela manutenção das conexões rápidas de internet entre instituições de pesquisa brasileiras e destas com o resto do planeta. Trata-se de infraestrutura básica e essencial para a pesquisa científica brasileira.

Um segundo órgão de atividade essencial para a sociedade é o Centro de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (Cemaden). Como o objetivo dessa instituição é o alerta a desastres naturais geo-hidrológicos, o monitoramento constante e eficiente das condições climáticas e do solo são essenciais.

Para isso, faz-se necessário desenvolvimento de técnicas de processamento de imagens, previsão meteorológica e simulações numéricas de desastres, o que requer cientistas de diferentes áreas (matemática, física, engenharia, geologia, meteorologia etc.).

Outro centro importante para o desenvolvimento de ciência e tecnologia é o Instituto Nacional de Metrologia (Inmetro). Metrologia é essencial para o funcionamento de sociedades desenvolvidas e, para a indústria, é vital. A qualidade dos processos garante a qualidade dos produtos, maior lucratividade e competitividade.

A metrologia de processos e produtos novos não é trivial, mas é necessária para sociedades expostas a inovações. Essa atividade requer recursos humanos qualificados, e o Inmetro conta com pós-graduação nessa área.

A qualificação humana do Inmetro para pesquisa em metrologia está gravemente aquém da existente em órgãos similares de países industrializados – e isso precisa ser sanado para que nos tornemos competitivos.

## Financiamento e infraestrutura

Em sua maior parte, o financiamento da pesquisa do Brasil se dá por verbas públicas, sejam elas federais ou estaduais. As primeiras são principalmente alocadas por meio do CNPq, da Capes e Finep; as outras, distribuídas por meio de fundações estaduais de amparo à pesquisa (FAPs). Há ainda contribuições – ainda que pequenas quando comparadas a valores gerais – da Petrobras, da Embrapa, entre outras empresas.

Desde 2014, a verba federal para fomento da pesquisa provém principalmente do Fundo Nacional de Desenvolvimento de Ciência e Tecnologia (FNDCT). Problema recorrente tem sido a falta de previsibilidade do valor destinado à pesquisa, por causa da possibilidade de contingenciamento dos valores propostos nos orçamentos, que torna os valores efetivamente investidos menores do que os previstos.

Ano passado, foi barrada por força de lei a possibilidade de contingenciamento a partir do ano que vem. Com base na realidade da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) – cuja dotação de recursos contém mecanismos semelhantes de proteção contra contingenciamentos –, essa nova regulamentação dos recursos federais destinados à ciência pode representar recuperação do cenário atual.

Mas o contingenciamento é sintoma do problema e não sua causa. O ponto central é que ciência deveria ser gerenciada por política de Estado – e não de governo. Como discutimos neste documento, a pesquisa científica, tanto básica quanto voltada para a resolução de nossos problemas, impacta na qualidade dos serviços de atendimento à sociedade, como aqueles referentes à segurança sanitária, alimentar e ambiental. É, portanto, atividade estratégica que não pode depender de interesses partidários federais ou regionais.

Exemplo ilustra o que pode resultar de mau gerenciamento. O repasse de verbas pelo Fundo de Financiamento ao Estudante de Nível Superior (FIES), a partir de 2004, para instituições privadas, resultou no crescimento do número de cursos de pedagogia e direito de baixo custo e baixa qualidade, mas lucrativos. Como consequência, a Cogna (inicialmente, Kroton), cursinho pré-vestibular fundado em 1990, foi listada, em 2013, como uma das maiores empresas de educação no mundo. Seis anos mais tarde, contava com mais de 800 mil alunos e 170 instituições próprias, tornando-se grande empresa, com participação acionária do J. P. Morgan.

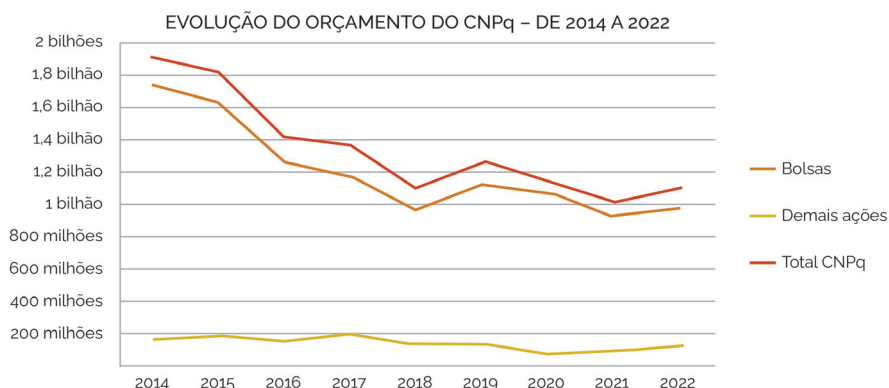
Embora as razões dadas para o repasse do FIES para instituições privadas fossem expandir a capacidade de formação de recursos humanos com educação superior, o sistema das IES nacional teria se beneficiado mais, caso essa verba tivesse sido direcionada para instituições bem avaliadas pelo sistema Capes, fossem elas públicas ou privadas.

Outro exemplo foi o programa Ciência sem Fronteiras, que destinou verba de vulto ao envio de estudantes de graduação brasileiros para estudos em universidades do exterior, com resultados aquém do esperado.

O insucesso do projeto não resultou da ideia em si, mas da forma como foi conduzido, tanto na seleção de estudantes e instituições estrangeiras quanto dimensionamento do projeto, que supôs existirem mais estudantes aptos a programa como esse do que realmente existiam. Para agravar o erro, o Ciência sem Fronteiras foi financiado à custa de verbas de outros programas que já haviam comprovado sua necessidade e eficiência.

Finalmente, nos últimos anos, presenciamos tomadas de decisão voltadas para as instituições de pesquisa criadas com base no princípio de que o sistema público não é capaz de pesquisa voltada para a inovação e que o ideal seria o modelo adotado nos EUA – isso foi outro equívoco.

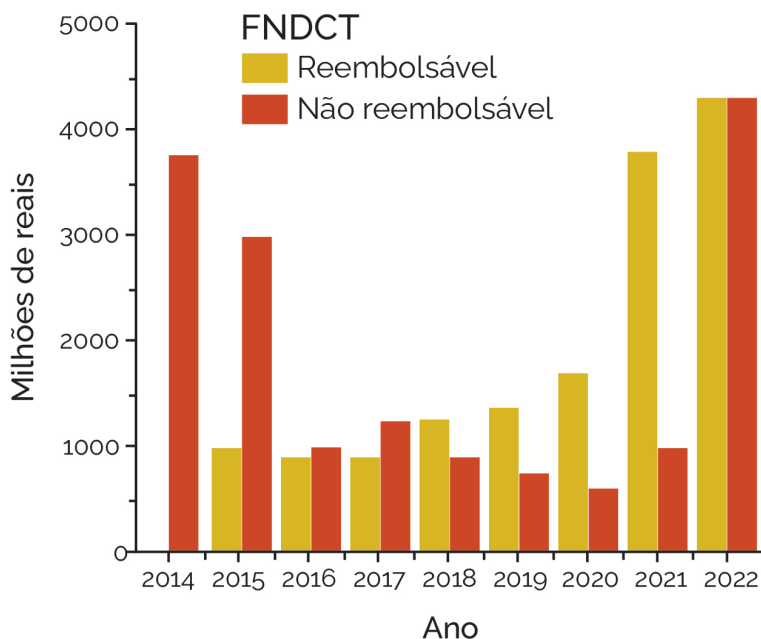
Assim, juntando-se as diferentes interpretações errôneas do governo federal, as verbas da pesquisa foram reduzidas desde 2015, impactando, por exemplo, no orçamento do CNPq (figura 4). Essas ações foram deletérias para as IES, a formação de recursos humanos e o fomento de pesquisa e manutenção da infraestrutura já existente. Mais: impactou no número de estudantes egressos das IES em cursos de ciência, engenharias, computação e matemática.



**Figura 4. Evolução do orçamento do CNPq de 2014 a 2022** CRÉDITO: CÂMARA LEGISLATIVA FEDERAL



Para este ano, o orçamento previsto oriundo do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) é da ordem de R\$ 9 bilhões, valor repartido igualmente para o financiamento de ciência – e reembolsável – aquele que vai para o fomento de ciência – e reembolsável, destinado a empréstimos para empresas de inovação (figura 5). Se isso ocorrer, os valores para a verba não reembolsável representarão recuperação ao nível de 2014.



**Figura 5. Evolução dos recursos destinados ao FNDCT, reembolsáveis e não reembolsáveis** CRÉDITO: CÂMARA LEGISLATIVA FEDERAL

As verbas não reembolsáveis do FNDCT são distribuídas em sua maior parte pelo CNPq e pela Capes, que o fazem com base na avaliação por pares, que, mesmo imperfeitas, detêm credibilidade e respeito da comunidade científica.

Para este ano, a dotação de recursos não reembolsáveis é de aproximadamente R\$ 4,33 milhões – maior do que a de anos anteriores. Desse valor, mais de 60% vai para fomento de pesquisa em setores que compõem o fundo – e só R\$ 1 milhão está previsto para despesas administrativas (cerca de 0,024%).

O restante ficará distribuído em subvenção econômica a projetos de desenvolvimento tecnológico (R\$ 700 milhões), manutenção das organizações sociais

(OS) do MCTI (R\$ 640 milhões) e equalização de taxa de juros em financiamento à inovação tecnológica (R\$ 20 milhões).

Quanto ao papel das FAPs no financiamento da pesquisa no país – excetuando-se São Paulo, que definiu regras de destinação de valores e proteção contra o contingenciamento –, todas apresentam desempenho pífio por causa da falta de verbas. Em São Paulo, o regime de dotação de verbas protegeu o ambiente científico da redução e do baixo valor das bolsas de pós-graduação.

Em 2020, 86% das 62.748 bolsas de mestrado concedidas no país foram concedidas pela Capes e pelo CNPq, e 14% pelas FAPs. As de doutorado, naquele ano, totalizaram 60.032 – 87% delas dadas por essas duas instituições federais, e 14%, pelas FAPs.

Maior participação das FAPs das outras 26 unidades da federação mitigaria o impacto da redução de bolsas federais ou, em ambiente favorável, representaria incrementos necessários no valor e na quantidade das bolsas.

A Fapesp é creditada por saltos na quantidade e qualidade da pesquisa e inovação em São Paulo. Sendo instituição de alcance regional, dá atenção às pesquisas voltadas para indústrias locais e exerce poder de atração para jovens cientistas de outros estados.

É premente fortalecer as FAPs em todos os estados, para promover o desenvolvimento científico e tecnológico – e o consequente aumento da inovação e produtividade industrial – em todo o país e torná-lo mais uniforme em nosso território.

Este ano, 50% do FNDCT serão distribuídos como empréstimos a juros. Ano passado, só pequena fração desses recursos foi investida – o restante voltou para o Tesouro Nacional. Os empresários atribuem a baixa adesão ao programa a juros impraticáveis, dado o alto risco da inovação.

Vale apontar que o governo produziu uma Estratégia Nacional de Inovação (ENI), em colaboração do Centro de Gestão Estratégica e Estudos Estratégicos (CGEE). Embora a iniciativa possa ter intenções louváveis, o resultado foi criticado pela Mobilização Empresarial pela Inovação (MEI), da Confederação Nacional da Indústria.

A ENI apresenta cinco eixos principais, 45 iniciativas estratégicas e mais de 170 ações, considerados excessivos pela MEI e indicativos de que falta diagnóstico claro sobre os problemas.

Resta ressaltar que a ENI foi produzida sem a participação de representantes da indústria.

## Conclusões

A produção de ciência de ponta e seu desejável transbordamento para a indústria sob a forma de inovação é tarefa complexa que precisa envolver diferentes demandas e necessidades da comunidade científica e da sociedade. Além disso, precisa de ambiente para a pesquisa e inovação, o qual, hoje, não possibilita cumprir esses objetivos em escala de nossa economia.

Atualmente, a infraestrutura para a ciência requer universidades adequadas, voltadas para a pesquisa; centros dedicados à ciência básica, que forneçam possibilidades de uso de equipamentos caros, como o Sirius; e bancos de dados nacionais, que produzam, armazenem e gerenciem de forma dinâmica a informação referente aos sistemas identificados como de interesse da segurança nacional, disponibilizando esse conteúdo para a comunidade acadêmica e indústria, de forma flexível e dinâmica.

É preciso fazer a integração digital rápida e segura. Infelizmente, o país não tem agenda científica que indique quais centros são necessários, especificando os propósitos de cada um, os quais devem ser constantemente revisados e atualizados: essa agenda depende de política industrial, ainda não formulada.

A pesquisa científica e tecnológica precisa de recursos humanos adequados e atualizados, e sua sustentabilidade demanda a formação de novos quadros. Para tanto, é preciso haver disponibilidade estável de recursos. Para isso, os programas científicos devem ser política de Estado, nos aspectos mencionados aqui: disponibilização dos centros necessários e dos recursos computacionais, bem como formação de pessoas.

Essa estabilidade só vai ser alcançada com mecanismos que definam a destinação dos recursos para a ciência no orçamento e daqueles que protejam o orçamento de contingenciamento – a exemplo do que acontece na Fapesp.

Embora os recursos possam vir a crescer, eles não serão infinitos. A escolha detalhada do destino dessas verbas deve ser feita com base em critérios éticos e científicos, de forma institucionalizada e independente dos governos – embora não necessariamente independentes do Estado.

Uma nação não pode contar só com iniciativas governamentais para a formulação de suas políticas. No caso de ciência e tecnologia, a comunidade científica pode – e deve – organizar-se para coletar informação, propondo e monitorando indicadores das condições da infraestrutura para pesquisa, referentes a todos seus aspectos: recursos humanos e sua renovação; existência

e construção de centros de pesquisa; formas de avaliar e fomentar a pesquisa e inovação; e formas de garantir a verba necessária.

A sociedade civil precisa organizar-se por meio de instituições, para, então, contribuir para o governo, bem como cobrar e fiscalizar as ações necessárias.

Essa organização poderia ser efetuada sob a liderança da Academia Brasileira de Ciência, com a participação de representantes de sociedades científicas, indústria inovadora e, eventualmente, do governo.

As decisões desse foro permanente deveriam ser tomadas de forma independente, sem considerar o patrocínio e a consequente tutela estatal.

## RECOMENDAÇÕES

**Incentivo** à formação de físicos experimentais, por meio de política sobre a concessão de bolsas de pós-graduação no Brasil e exterior.

**Fortalecimento** das fundações de amparo à pesquisa (FAPs) em todos os estados do país.

**Foro permanente** liderado pela Academia Brasileira de Ciências, pela SBF e outras sociedades científicas, em colaboração com representantes da indústria de inovação, com os seguintes objetivos:


**delineamento** da organização desejável das IES, para promover a formação de recursos humanos em ciência e inovação;

**contribuição** para as decisões do Ministério da Educação quanto à distribuição de recursos para a educação;

**construção** de agenda científica e industrial para o país;

**construção** de plano para o parque nacional de pesquisa e inovação, com a colaboração de cientistas e representantes da indústria – esse parque deve contemplar os centros de pesquisa necessários, formando conjunto complementar e coerente;

**divulgação** das potencialidades da ciência de inovação para o avanço do país.

A hand is visible on the left side of the image, pointing towards the right. The background is dark with a network of orange lines and dots, resembling a molecular structure or a data network. The text is centered in a dark rectangular box.

**Ciência:  
comunicação  
com e para  
a sociedade**

## História, contexto e desafios

As ciências conversam de diferentes formas com distintos públicos. Uma delas é o ensino formal, sendo o público de estudantes, que, por sua vez, são distintos entre si, quando consideramos os níveis de ensino.

Espaços de ensino informal (por exemplo, museus) atendem tanto estudantes quanto público geral (ou leigo), o qual também se divide em grupos distintos e, portanto, requererem modos de comunicação diferenciados, segundo suas necessidades, prioridades e relações com as ciências.

Esses grupos formam esferas diferentes: política, empresarial, sociedade civil ou os excluídos desta última. São, em linguagem gerencial, *stakeholders* da atividade científica, ou seja, partes interessadas, intervenientes, impactadas e afetadas.

Pensar a comunicação com a sociedade dessa forma – tendo em mente os *stakeholders* – não é suficiente: sabemos que há ‘partes desinteressadas’ e ‘partes opositoras’.

A expressão ‘comunicação com a sociedade’ carrega vício de perspectiva, pois as ciências são parte da sociedade e não deveriam ser corpo alheio a ela, o qual precisa comunicar-se com o resto de forma que evidencie a distância.

Mas é essa a perspectiva construída histórica e socialmente. Praticantes de ciência comunicam-se entre si por uso de linguagem própria, e alcançar outros campos sociais requer traduções dessa linguagem, como as da divulgação e do jornalismo científicos – incluindo, aqui, comunicados para a mídia etc. – e as das traduções intermediárias (livros texto do ensino fundamental, médio e mesmo superior).

Essa construção histórica e social é a do desenvolvimento das ciências como atividade humana, bem-sucedida desde o Renascimento: a ciência institucionalizou-se, especializou-se em disciplinas, profissionalizou-se e, a partir do sé-

culo XIX, tornou-se indissociável da ideia de progresso da humanidade.

Esse processo foi acompanhado pelo desenvolvimento e pela especialização da chamada comunicação entre pares, construindo a identidade da ciência como forma de saber diferenciado, identidade que reafirma suas principais características: o método científico, o rigor e a contínua revisão de resultados.

Mas essa trajetória de sucesso não foi linear, mas, sim, marcada por debates pendulares entre praticantes, como aquele entre pesquisa básica e aplicada. A trajetória realizou-se à custa de distanciamentos que, nos últimos anos, tornaram-se preocupantes, não só para essa cultura chamada ciência, mas também para a humanidade, pois gera diferentes ‘negacionismos’, como o da crise climática e das vacinas contra a covid-19.

Esse distanciamento é sublinhado pelo título de artigo da socióloga Bernadette Bensaude-Vincent: A genealogia do crescente abismo entre ciência e o público.

A construção do abismo entre ciência e público é inerente ao desenvolvimento daquela. Nos séculos XVII e XVIII, os membros das sociedades científicas eram, em sua maioria, aficionados e amadores – e responsáveis pela divulgação da ciência, antes da criação de seu ensino formal nas escolas.

Esses amadores participavam ativamente de eventos científicos, voltados para público amplo. A paulatina especialização da comunicação entre pares e a profissionalização destes resultou no afastamento desse público. Vale lembrar que esse afastamento, com conseqüente depreciação dos amadores, completa-se só no século passado.

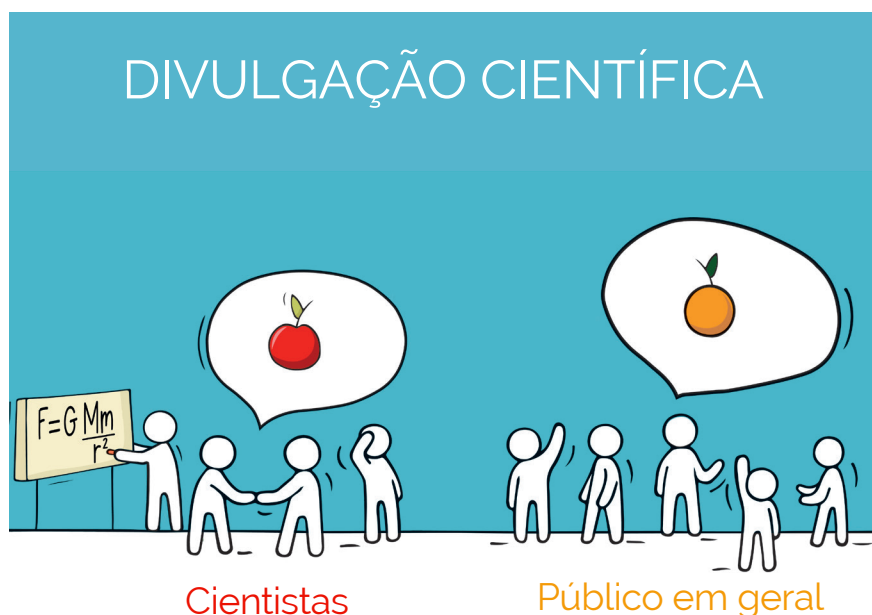
O anúncio da descoberta do elétron, em 1897, foi feita por J. J. Thomson (1856-1940), em evento de divulgação científica (e não congresso científico), na série *Royal Institution Friday Evening Discourses*.

Urge, portanto, discutir maneiras efetivas (e não paliativas) de reconquistar público que foi ‘expulso’ de atividades ligadas à ciência. Isso não significa voltarmos aos primórdios da Royal Society, nem abandonar o rigor conquistado na comunicação entre pares, mas, sim, buscar novas formas de comunicação e participação (central e não periférica) da comunidade científica.

Nesse contexto – o de diferentes formas de comunicação intra e extracientífica –, uma vertente de historiadores da ciência propõe que esta última seja vista como ação de comunicação. Essa proposta traz problemas e incompletudes, mas provoca o debate necessário, o qual adverte que “a ciência é mais do que a produção e comunicação de dados e resultados factuais. Ciência é atividade normativa que estabelece padrões e fortes valores que, por sua vez, configuram a sociedade em geral”, segundo citação de outro artigo de Bensaude-Vincent, Uma perspectiva histórica sobre ciência e seus ‘outros’.



A mera comunicação da produção de dados e resultados leva ao que é chamado ‘mitologia dos resultados’, na qual cai parte da divulgação e do jornalismo científicos. Essa limitação está presente no ensino formal e na divulgação feita por cientistas, com base no ‘modelo do déficit’: comunicação de ciência por autoridade para público passivo. A figura 1 é uma charge sobre as comunicações infra e extracientífica.



**Figura 1. Charge sobre a comunicação da ciência** CRÉDITO: BASEADO EM CHARGE DO BIODESIGN INSTITUTE/ARIZONA STATE UNIVERSITY

Trazer à tona os processos envolvidos na atividade normativa da ciência, com seus padrões e valores, é desafio para reformular a comunicação social da ciência, pois requer a transição da comunicação para público passivo para comunicação participativa.

A comunicação não pode mais ser ‘em nome da ciência’. Precisa, sim, deslocar-se para novas práticas de interação ‘em nome da democracia’ – lembrando que a ciência não é a única atividade normativa que configura a sociedade.

Novas práticas não podem reduzir-se a nova ‘mitologia’: ocupação de espaços virtuais com os mesmos produtos traduzidos em novos formatos (Facebook, Twitter, Instagram, Youtube etc.). Esses canais de comunicação não permitem que certos tópicos científicos sejam tratados com a profundidade necessária para o entendimento adequado – há exceções.

Por isso, é preciso novas interações além de visualizações, *likes* e comentários. As novas interações participativas são necessárias para a construção de cultura científica e crítica em que o público possa avaliar a avalanche de conteúdos anti-científicos nesses espaços virtuais.

## Novo modelo de comunicação

Estamos imersos em uma concepção de comunicação com duas características principais: i) o já mencionado abismo entre ciência e diferentes públicos, por causa da inevitável especialização e formalização do discurso científico; ii) a necessidade de construir pontes sobre o abismo levou a mecanismos de divulgação e comunicação (ainda correntes) para buscar apoio às atividades de pesquisa científica.

Esses mecanismos são, em geral, assentados na perspectiva de público passivo, consumidor de ciência e tecnologia. No atual contexto de ataques à ciência, constrói-se a questionável expectativa de que, aumentando a oferta de ciência, esses ataques seriam rechaçados, entendidos como pseudocientíficos.

Por vezes, a comunicação de ciência é processo de mão única, no sentido de não levar em consideração preocupações do público. Claro deslocamento dessa perspectiva é o engajamento de cientistas no esclarecimento à população sobre a covid-19.

Mas, nesse engajamento, subsiste a assunção de que o aumento da percepção pública de ciência gera atitudes mais favoráveis a ela – há indícios de que práticas de comunicação podem aumentar a distância entre cientistas e público.

Problemas desse modelo de comunicação ficaram mais claros com as reações, em décadas recentes, sobre tecnologias de informação, biotecnologia, mudanças climáticas e nanotecnologia, com as quais menções a ‘diálogo’ e ‘engajamento público’ passaram a aumentar as controvérsias (falsas ou verdadeiras) com relação a esses temas.

Começaram a marcar presença nessas controvérsias grande número de atores, do setor privado até organizações não governamentais, incluindo associações de consumidores, ativistas ambientais, sindicatos e formuladores de políticas – ou seja, formou-se leque de públicos com os quais a ciência precisa dialogar.

Esse diálogo com a sociedade é – segundo perspectiva histórica – continuamente redefinido e renegociado, tornando a atenção a essas mudanças necessidade contínua da comunidade científica.

Como exemplo de perspectiva histórica, podemos citar a reação anticientífica, nos EUA, na década de 1960 e na seguinte, no contexto da guerra do Vietnã e do movimento pelas liberdades civis. Ela foi analisada por Don Price (1910-1995), então presidente da Associação Norte-americana para o Avanço da Ciência (AAAS), no ensaio Puristas e políticos, no periódico *Science* (1969). Outro contexto, outros atores, mas Price antecipa a necessidade de diálogo e engajamento público.

Como dissemos, o conjunto de reações recentes a temas científicos entre diferentes atores sociais sugere mudança de práticas de comunicação científica – o viés seria ‘em nome da democracia’ em vez de ‘em nome da ciência’.

Nessa mudança política, definem-se dois possíveis papéis para cidadãos e cidadãs: o de assessores e coprodutores de conhecimento. No primeiro caso, o público é convidado a discutir programas de pesquisa e seus impactos; no segundo, são convidados a participar da construção do conhecimento, como em projetos de ciência cidadã – discutida adiante.

Em visão mais geral, vale mencionar o papel do movimento de *softwares* livres e abertos no avanço da tecnologia de informação. Iniciativas semelhantes passaram a nascer de grupos mais ou menos institucionalizados, como movimentos ambientalistas, organizações não governamentais e associações de consumidores e pacientes (por exemplo, o Patient-Led Research Collaborative).

Esses novos envolvimento públicos com a ciência podem levar a mudanças tanto na ciência quanto na política. Esse cenário está impactando nas formas de avaliação da ciência – aqui, vale lembrar que a avaliação da atividade de pesquisa é forma de comunicação social que vem revelando-se inadequada.

Cientistas e instituições comunicam-se ‘em nome da ciência’, anunciando a ‘eficiência’ e ‘excelência’ de seus resultados, com vistas a obter indicadores cientométricos e *rankings*. Esses critérios precisam, segundo número crescente de acadêmicos, ser substituídos por outros, como a colaboração com atores sociais. Essa mudança está em marcha na Europa, por exemplo, com a Agenda de ciência aberta da EUA (European University Association) para 2025.

## Comunicação da física no Brasil

A discussão introdutória refere-se às ciências em geral, e aspectos dela aplicam-se a diferentes disciplinas – aqui, tomadas nos recortes tradicionais. Mas, em cenário de crescente interdisciplinaridade e desenvolvimento sustentável, o panorama de mudanças e sua história precisam ser considerados.

Nesta seção, apresentamos um conjunto de iniciativas e ações por viés que contempla modelo de comunicação participativa e inclusiva, necessário para que a comunidade de física no Brasil se comunique para além de 'em nome da ciência'.

No que se refere à SBF, seu papel seria múltiplo em relação às ações: realização, promoção, articulação, apoio e divulgação.

A realização de ações pela SBF é possível, mas precisa ser continuamente avaliada, dadas as limitações de sua estrutura. Mas seus grupos de trabalho e suas comissões podem induzir ações em indivíduos e instituições ligadas à comunidade de física no Brasil. A SBF também pode participar da articulação de ações (com outras sociedades científicas, instituições de pesquisa e órgãos governamentais e não governamentais), para apoiá-las e divulgá-las.

## Observatórios temáticos

Exemplo em que se aplicam os aspectos enunciados na introdução é o do Observatório Covid-19 BR, criado pelo Instituto de Física Teórica (IFT), da Universidade Estadual Paulista (Unesp).

A iniciativa tornou-se interdisciplinar, envolvendo participantes de diferentes áreas e tipos de instituições, promovendo o diálogo e engajamento. A comunicação de resultados científicos foi voltada ao público geral, convidando a população a participar de audiências públicas.

Observatórios temáticos assim poderiam ser organizados para outros temas, como o desenvolvimento sustentável discutido neste documento. São importantes estruturas de geração de conhecimento, diálogo, participação e inclusão. Desdobram-se em múltiplas ações de comunicação de forma colaborativa, com impacto nos diferentes públicos.

## Construção da cultura científica

Modelo de comunicação participativa pode auxiliar na construção e no compartilhamento da cultura científica, conceito subestimado, apesar do impacto do ensaio de C. P. Snow (1905 -1980), *As duas culturas*, de 1959.

Não aprendemos a apreciar ciência como o fazemos com literatura ou mú-

sica. Por exemplo, não surgem espontaneamente ‘rodas de ciência’ – alusão às de samba, onde iletrados musicais cantam junto, sem receio de desafinar. Provavelmente, isso seja consequência da comunicação unidirecional e, portanto, passiva, de ciência.

Nos ensinamentos fundamental e médio, estudantes são treinados a resolver problemas prontos com soluções igualmente prontas, o que destoa, por exemplo, da produção de textos próprios em aulas de redação. A perspectiva passiva não permite que se desenvolvam habilidades críticas da ciência: o legado não deveria ser só o conteúdo, mas também o processo.

Ciência não deveria ser ensinada nem divulgada ou comunicada como conjunto de questões fechadas, mas, sim, como processo contínuo de construção de conhecimento.

As mudanças necessárias no ensino formal são complexas e fogem ao escopo deste texto, mas iniciativas complementares podem – e devem – ser promovidas, como os projetos de ‘ciência cidadã’.

## Ciência cidadã

O conceito de ciência cidadã remonta ao início do século passado, mas o movimento só se estruturou nas últimas décadas, no âmbito da ciência aberta. Ele baseia-se na participação informada, consciente e voluntária de cidadãos e cidadãs, que geram e analisam grandes quantidades de dados, compartilham seu conhecimento, bem como discutem e apresentam resultados para cientistas.

No Brasil, foi criada, ano passado, a Rede Brasileira de Ciência Cidadã, à qual a SBF poderia não só se associar, mas também dela participar, criando projetos (em parceria com o MNPEF) para estudantes de ensino médio e fundamental.

A oferta e realização desses projetos precisam ser continuados, para, em longo prazo, contribuir para o estabelecimento de cultura científica no país. Essa iniciativa teria potencial multiplicador entre estudantes e sociedade civil.

## Linguagens híbridas de divulgação

A SBF poderia participar da articulação, em associação com outras sociedades científicas, para reestabelecer programa de *kits* de experimentação – o exemplo

emblemático é o de *Os cientistas*, da Abril Cultural, no início da década de 1970. Isso poderia ser feito em parceria com a Fundação Brasileira para o Desenvolvimento do Ensino de Ciências (Funbec).

Os *kits* (50 no total, abrangendo física, química e biologia), vendidos em bancas de jornal, não estavam associados a projetos educacionais centrados na escola, mas, sim, ao âmbito familiar, onde se realizavam os experimentos.

O impacto dessa coleção não foi estudado – talvez, por causa da incipiência de grupos de pesquisas em ensino de ciências à época. Mas membros da comunidade científica brasileira (adolescentes naquela década) relatam o impacto desse material nas escolhas e trajetórias posteriores.

*Kits* experimentais chegaram internacionalmente ao auge nesse período e perderam terreno frente ao acesso individual a tecnologias de computação e, posteriormente, informação.

Nesse sentido, uma reedição dessa iniciativa precisaria ser híbrida, ou seja, analógica (*kits*) e digital (redes de interação entre envolvidos) – esta última, inviável à época.

A participação do MNPEF seria facilitadora, tanto no desenvolvimento de *kits* quanto em sua difusão e seu acompanhamento.

## Relações com novos públicos

A SBF promove atividades de divulgação, como o Física ao Vivo, mas elas são voltadas à própria comunidade. Seria oportuno ampliar iniciativas para o público externo. Em parceria com o MNPEF, seria interessante – visando ao estabelecimento de cultura científica – criar programa de palestras para o grande público e estudantes de ensino médio.

Ferramenta importante de articulação seria a de programa regular na linha ‘rodas de ciência’ – em formato de mesa-redonda, com a participação de políticos, jornalistas e empresários – sobre temas oportunos relacionados à física voltada para o desenvolvimento sustentável. O programa poderia ser acompanhado de boletim eletrônico enviado ao público em geral.

Induzida pela SBF, a comunidade de física deve se articular e se envolver em atividades de comunicação, seja por meio de iniciativas da própria sociedade, seja por meio de instituições de ensino e pesquisa, as quais receberiam chancela da SBF.

## Articulações necessárias

A articulação de estratégias para comunicação, visando ao estabelecimento de diálogos em prol de políticas públicas e o debate sobre questões gerais da ciência no Brasil, entre outros temas, poderia se fortalecer com a promoção de fórum ágil de sociedades científicas brasileiras. Esse fórum – que deveria funcionar em rede – aumentaria a visibilidade e o peso das organizações participantes. As universidades e instituições de pesquisa precisam colaborar mais proximamente em parcerias de comunicação em temas de interesse geral.

## Considerações finais

Se a comunicação com a sociedade é considerada atividade estratégica, é preciso pensá-la dessa forma – principalmente, quanto à regularidade e continuidade de ações a seu favor.

Nenhuma das propostas expostas aqui é original. Há iniciativas isoladas sem visibilidade ou de pouco alcance – e outras tiveram ciclos de vida curtos, sem que se guardasse memória delas.

Construção de audiências é trabalho contínuo e de longo prazo, rumo a ambiente nacional de cultura científica. Nesse sentido, a atividade de comunicação, em seus múltiplos formatos, precisa ser valorizada em seus aspectos mais próximos às atividades-fim da comunidade científica.

O empreendimento das ações elencadas deve ser discutido continuamente e avaliado – possivelmente, no âmbito de planejamento estratégico depois do estabelecimento de consenso conceitual que leve em conta não só os interesses de promoção da comunidade científica, mas também (e principalmente) as necessidades da sociedade a que servimos.



