

# A síntese da criação

Primeiro organismo controlado por genoma artificial prova que o DNA é realmente a receita química da vida

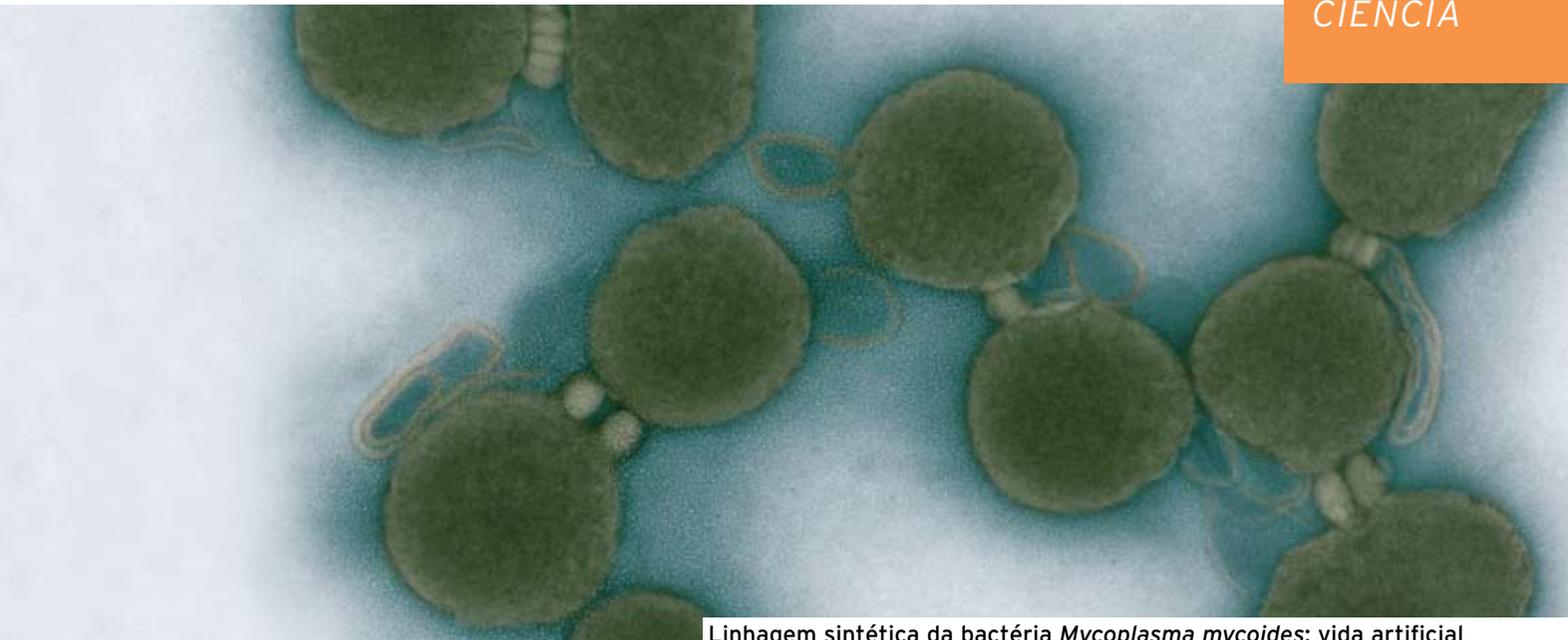
MARCOS PIVETTA

Quando anunciou no dia 20 do mês passado a criação da primeira linhagem de células viáveis de um ser vivo controlada por um genoma totalmente sintetizado em laboratório, o cientista norte-americano Craig Venter não economizou palavras para descrever o feito. Lembrou a todos que, nunca antes na história deste mundo, a humanidade tinha sido apresentada a uma criatura desprovida de ancestrais. Sem pais. A mensagem era clara: a *Mycoplasma mycoides* JCVI-syn1.0 – nome dado à variedade dessa bactéria cujo DNA fora produzido por químicos de uma empresa de biotecnologia, a Blue Heron – era filha de uma nova era. Da biologia sintética. “É a primeira espécie do planeta que se autorreplica cujo pai é um computador”, afirmou o ousado pesquisador-empresário, que, anos atrás, já havia se tornado famoso ao liderar um projeto privado de sequenciamento do genoma humano capaz de rivalizar (e acelerar) o trabalho feito pelo consórcio público.

A alusão à máquina como o pai da bactéria não é gratuita. Afinal, as informações necessárias para fabricar um genoma, na forma de uma enorme sequência de bases químicas (A, C, T e G), ficam guardadas em computadores. No caso da variedade natural da bactéria *M. mycoides*, trata-se da sequência composta de 1,08 milhão de pares de bases (com cerca de mil genes) presentes em seu único cromossomo. Foi com essa receita química que se fez, em laboratório, uma cópia sintética do DNA natural da bactéria, seguindo uma série de especificações da equipe do J. Craig Venter Institute (JCVI), instituto fundado por Venter. O genoma não foi sintetizado como uma única grande sequência de DNA, mas em mais de mil pequenos pedaços. O conjunto de fragmentos foi inserido numa levedura, onde foram reunidos e retomaram a forma do cromossomo. Por fim, os cientistas retiraram o genoma

sintético da levedura e o transplantaram para as células de uma outra bactéria, a *Mycoplasma capricolum*. O cromossomo artificial conseguiu tomar o controle das células receptoras, que passaram a produzir todas as proteínas típicas da *M. mycoides*. Dois dias após o transplante, as células deixaram de conter o DNA original da *M. capricolum* (seja porque ele foi destruído ou diluído no processo de replicação) e apresentavam um único tipo de material genético, o cromossomo sintético da *M. mycoides*. Em toda essa operação (ver infográfico na página 46), apenas 14 genes sem muita importância da *M. mycoides* se perderam ou foram anulados. “Trata-se de um avanço tanto filosófico como técnico”, disse Venter, resumindo, a seu ver, as implicações da empreitada.

Ápice de um esforço que consumiu US\$ 40 milhões e quase 15 anos de pesquisa de um time de 24 pesquisadores do JCVI, entre os quais Ham Smith, Prêmio Nobel de Medicina em 1978, o surgimento da linhagem de bactéria com genoma sintético foi elogiado por cientistas de todo o mundo. Alguns preferiram situar o trabalho, que foi publicado eletronicamente na revista científica *Science*, como um grande feito tecnológico, uma mudança de escala na capacidade de o homem modificar o DNA de organismos, mas não como uma revolução científica. Outros pesquisadores, embora reconheçam o caráter técnico da empreitada, salientam que o trabalho tem, sim, relevância para a ciência. A visão

Linhagem sintética da bactéria *Mycoplasma mycoides*: vida artificial

JCV

de três desses cientistas está publicada em artigos especialmente escritos para esta edição de *Pesquisa FAPESP*, entre as páginas 47 e 51.

O biólogo Fernando Reinach não tira os méritos científicos do experimento de Venter. Segundo ele, o trabalho é a prova cabal de um conceito, o de que a matéria viva não tem nada de especial e também está submetida às leis da química e da física. Apenas com a informação do DNA é possível recriar um genoma e, por tabela, uma forma de vida. “Isso todo mundo já sabia em tese, mas faltava alguém demonstrar na prática essa teoria amplamente aceita”, afirma Reinach. “Depois da publicação do genoma humano, o trabalho de Venter é o de maior relevância que saiu. Não há por que tentar relativizar sua importância”, diz José Fernando Perez, presidente da Recepta Biopharma e diretor científico da FAPESP entre 1993 e 2005. “Ele coroa todo um esforço de entendimento científico do DNA. Os grandes avanços científicos não vêm de grandes ideias, mas de feitos tecnológicos.” Reinach também salienta um segundo ponto importante, igualmente de ordem científica, que emerge da análise do artigo na *Science*. Até agora, a vida sempre foi vista como algo contínuo. Todo ser descende de

outros organismos semelhantes que viveram no passado. “O trabalho de Venter demonstra que a vida pode ser interrompida e reiniciada”, afirma Reinach, fazendo alusão ao fato de que a bactéria não tem ancestrais biológicos, é fruto da sequência de letras químicas armazenadas num computador.

A geneticista Mayana Zatz, coordenadora do Centro de Estudos do Genoma Humano da Universidade de São Paulo (USP), comparou a repercussão causada pelo trabalho de Venter a um episódio semelhante ocorrido há 14 anos. “Esse feito me lembrou da clonagem da ovelha Dolly, por Ian Wilmut, em 1996. Os dois causaram uma revolução midiática”, escreve Mayana num artigo publicado na página 47.

Grande parte do financiamento das pesquisas do JCVI vem da Synthetic Genomics Inc (SGI), empresa fundada por Venter que fez 13 pedidos de patente sobre métodos usados nos trabalhos com biologia sintética. Venter diz que o experimento com a *M. mycoides* vai permitir desenhar microrganismos úteis ao homem, capazes de, por exemplo, produzir vacinas e biocombustíveis. A empresa petrolífera Exxon já se comprometeu a investir US\$ 600 milhões na SGI para o desenvolvimento de algas que consigam produzir etanol.

Segundo a geneticista Lygia da Veiga Pereira, da USP, Venter terá muito trabalho pela frente para exercer a biologia sintética em sua plenitude. “O maior desafio será desenhar um genoma totalmente novo e escolher que genes serão colocados para que um organismo desempenhe uma determinada tarefa”, diz Lygia. Ainda que os esforços do cientista americano demorem para gerar frutos palpáveis, a simples presença no ambiente de pesquisa de um sujeito como Venter, polêmico e provocativo, sem dúvida, é vista como salutar por alguns de seus pares. “Para entender Venter, eu costumo pensar no ser humano como uma criança, uma criança largada numa sala bem grande chamada mundo. Ela fica mexendo em tudo, às vezes se queima ao colocar o dedo numa tomada, mas outras vezes acaba descobrindo como subir numa cadeira para alcançar as guloseimas lá em cima”, escreve João Meidanis, da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), em artigo na página 48.

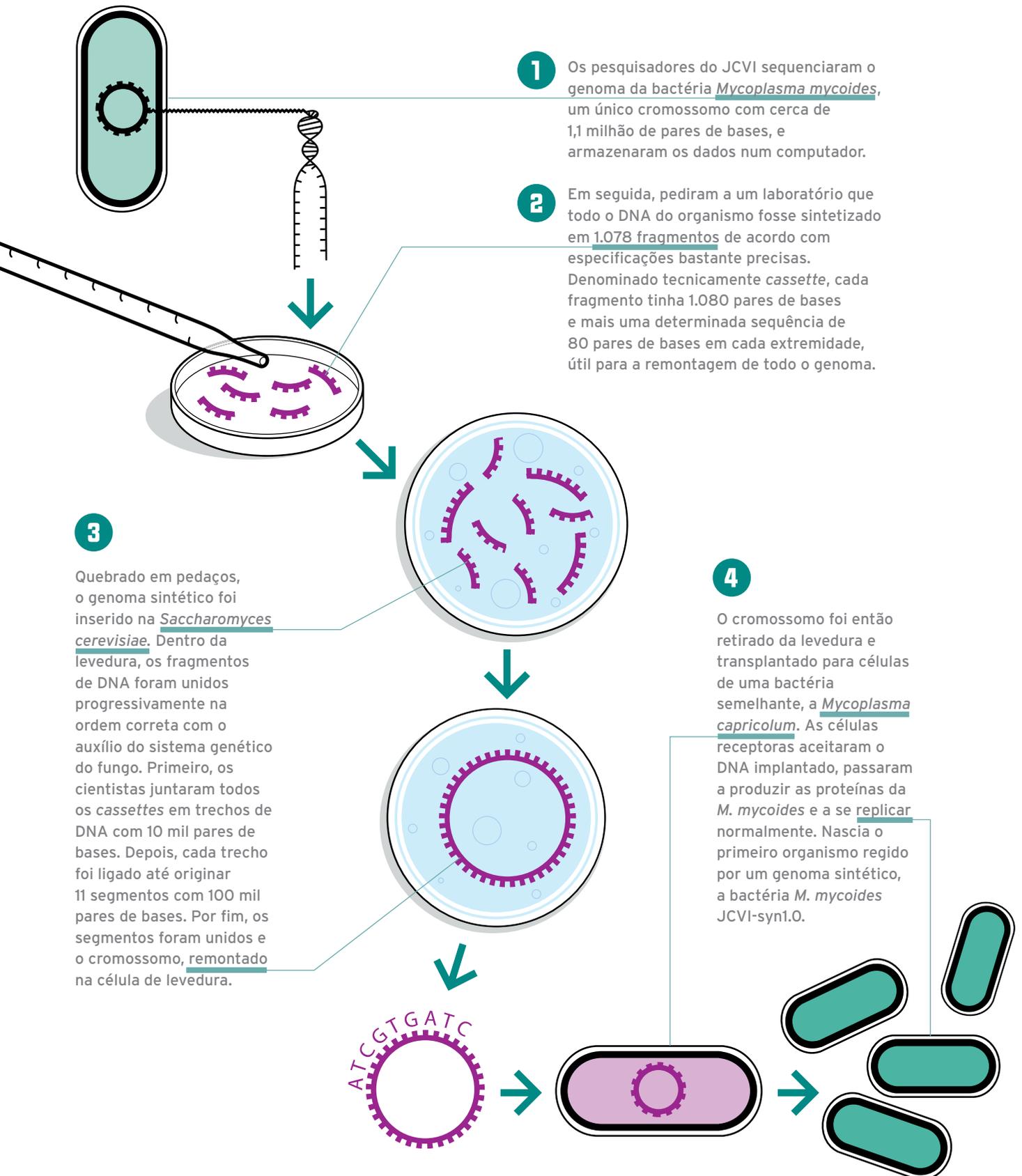
---

#### Artigo científico

GIBSON, D.G. *et al.* Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. *Science*, publicado *on-line* em 20 mai. 2010.

# O transplante de DNA passo a passo

Como os cientistas fizeram a célula de uma bactéria ser controlada pelo genoma sintético de outra



# O IMPACTO DA TRANSFORMAÇÃO DE UMA VIDA EM OUTRA

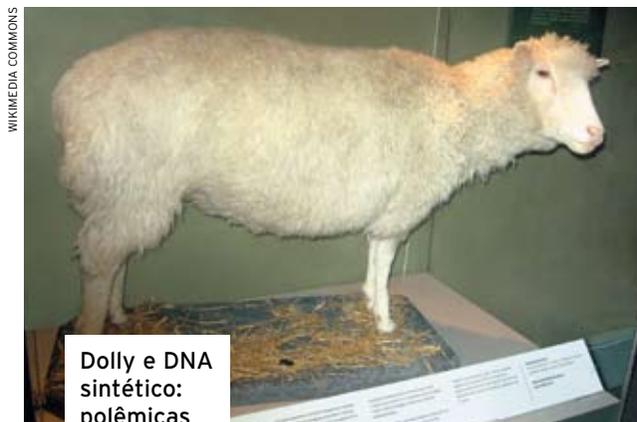
Feito tecnológico de Venter causou revolução midiática como a clonagem da ovelha Dolly em 1996 | MAYANA ZATZ

“Criada vida artificial”, “Ciência cria primeira célula sintética” foram algumas das manchetes citando o trabalho de Craig Venter, publicado na revista *Science*, “Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome”. Na realidade foi uma bela obra de engenharia genética, mas não se criou vida. A equipe de cientistas utilizou vidas existentes, tanto de bactérias como de leveduras, para conseguir esse feito. É importante deixar isso muito claro. O que os pesquisadores fizeram foi transformar uma vida em outra, no caso uma bactéria *Mycoplasma capricolum* em outra, a *Mycoplasma mycoides*. Esse feito me lembrou a clonagem da ovelha Dolly, por Ian Wilmut, em 1996. Os dois causaram uma revolução midiática e podem até ser comparados. Wilmut transferiu o genoma retirado de uma célula – no caso, da glândula mamária da ovelha Dolly – para um óvulo sem núcleo e, após inseri-lo em útero, gerou um clone de Dolly. Venter transferiu o genoma de uma bactéria em outra que assumiu o comportamento da primeira.

Não poderia haver ninguém mais capacitado do que Venter para montar o quebra-cabeça do genoma de uma bactéria – com 1 milhão de pares de bases – e sintetizá-lo no laboratório. Afinal, foi ele que inventou um método para desmontar o quebra-cabeça do genoma humano – o

que permitiu acelerar muito o seu sequenciamento. Para quem desenvolveu tecnologias capazes de sequenciar um genoma de 3 bilhões de pares de bases – o genoma humano – remontar os pedaços de DNA de um genoma de 1 milhão de pares de bases, como é o caso da bactéria *Mycoplasma mycoides*, parecia fácil. Afinal, ela é 3 mil vezes menor. Mas, mesmo assim, foram 15 anos de trabalho envolvendo 24 cientistas, a um custo de US\$ 40 milhões. Nada trivial! A sequência do genoma da *Mycoplasma mycoides* já estava disponível no banco de dados do computador. Mas, para copiar a receita e sintetizar um cromossomo artificial no laboratório, os pesquisadores tiveram que usar leveduras – que também são organismos vivos – e que têm a capacidade de unir pequenos pedaços de DNA. Uma vez sintetizado o DNA, o próximo obstáculo era inseri-lo em outra bactéria, conseguir que a célula receptora não destruísse o genoma exógeno e o incorporasse como se fosse seu. Sem dúvida, um grande feito de engenharia genética.

Trata-se de uma revolução? Midiática, sem dúvida. A repercussão na imprensa do trabalho de Venter me lembrou da clonagem da ovelha Dolly por Ian Wilmut em 1996. Vocês devem se lembrar. “Vão clonar seres humanos! Estão brincando de Deus. Vamos criar imediatamente comitês científicos para proibir a clonagem reprodutiva humana.” Isso era repetido constantemente pela mídia. Lembro-me muito bem porque fui convidada a fazer parte de um desses comitês, todos preocupadíssimos em proibir a clonagem humana.



WIKIMEDIA COMMONS

Dolly e DNA  
sintético:  
polêmicas

Eu estava muito menos temerosa com os riscos de se fazerem clones humanos e muito mais interessada em que se aprovassem as pesquisas com células-tronco embrionárias. E foi o que acabou acontecendo. Hoje, 14 anos depois, ninguém mais fala de clonagem reprodutiva humana. Mas estamos revendo esse filme, agora com o suposto risco de se criar “vida em laboratório”. O presidente dos Estados Unidos, Barack Obama, já determinou a instituição de comitês de ética para que sejam identificados os limites éticos e minimizados os possíveis riscos. Por outro lado, o pediatra Carlo Bellieni, no diário do vaticano *L' Osservatore Romano*, diz que “a pesquisa é um trabalho de engenharia genética de alto nível, mais um passo na substituição de parte de DNA, mas na realidade não se criou vida”. Concordo com ele.

Quais são as implicações futuras? Quais serão as aplicações? É difícil prever. No caso da ovelha Dolly a grande revolução foi descobrir que uma célula adulta poderia ser reprogramada e voltar a ser totipotente, o que abriu caminho para as pesquisas com células-tronco. Já a estratégia para criar a bactéria de Craig Venter poderá permitir aprimorar as técnicas de engenharia genética, produzindo novos microrganismos úteis ao homem, como por exemplo bactérias mais eficientes em degradar a celulose ou o plástico, gerando novas formas de combustível biodegradável. Ou bactérias intestinais que nos permitissem digerir a celulose tão bem como os ruminantes. Além disso, ela poderia contribuir para melhorar as técnicas de terapia gênica, corrigindo genes defeituosos em pacientes com doenças genéticas. Um outro grande feito do qual se falou pouco foi a estratégia utilizada por Venter para que a bactéria receptora não destruísse o genoma da bactéria doadora e o adotasse como se fosse seu. Essa tecnologia poderia abrir novos caminhos para impedir a rejeição no caso de transplantes alogênicos ou talvez até xenotransplantes. O futuro dirá. Deu-se mais um salto qualitativo tecnológico que certamente merece ser aplaudido. »

MAYANA ZATZ é professora titular do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo e coordenadora do Centro de Estudos do Genoma Humano da USP.

## CRAIG VENTER, UM BEM NECESSÁRIO

Cientista é como um moleque travesso atrás das guloseimas, sejam elas terminar o genoma humano o mais rápido possível ou fabricar uma bactéria do zero | JOÃO MEIDANIS

Craig Venter está novamente nas notícias de jornais e revistas do mundo inteiro, desta vez por causa do artigo sobre uma célula bacteriana guiada por um genoma que seu grupo sintetizou em laboratório. Esse é o capítulo mais recente de um projeto ao qual Venter tem se dedicado por mais de uma década: criar um organismo vivo do zero. E há vários competidores perseguindo a mesma coisa.

Grande descoberta? Ou impensada ousadia, caixa de Pandora que pode nos levar à autodestruição? As reações ao artigo que ele publicou na *Science* vão de rasgados elogios a severos ataques, como sempre parece acontecer com Venter. Ele é um tipo raro de cientista, incômodo para muitos, mas a meu ver extremamente necessário.

Para começar, está em boa companhia. Seu grande parceiro de longa data, Hamilton Smith, ou Ham Smith, como é carinhosamente conhecido, é um gênio da biologia molecular. No artigo da primeira bactéria sequenciada vemos lá Venter e Smith. Na diretoria da Celera, a empresa criada para competir com o projeto público (mas lento) de sequenciar o genoma humano, encontramos de novo Venter e Smith. E agora, neste recente artigo, quem são os cabeças? Venter e Smith, é claro, agora também incorporando um outro peso-pesado da biologia molecular: Clyde A. Hutchison III, que eles trouxeram para o time em 2003.

Os especialistas lembrarão de Hutchison como um dos pioneiros na introdução de mutações dirigidas em genomas. Por sua vez, Ham Smith rece-



Venter (à esq.) e o Nobel Ham Smith: dupla fez o primeiro genoma sintético

beu o Prêmio Nobel muitos anos atrás (1978) pela descoberta de nada mais, nada menos que as enzimas de restrição, uma das ferramentas mais básicas de manipulação genômica. As enzimas de restrição são para a engenharia genética o que lápis e papel são para estudar na escola fundamental.

Para entender Venter, eu costumo pensar no ser humano como uma criança, uma criança largada numa sala bem grande chamada mundo. Ela fica mexendo em tudo, às vezes se queima ao colocar o dedo numa tomada, mas outras vezes acaba descobrindo como subir numa cadeira para alcançar as guloseimas lá em cima. Venter é esse moleque travesso que vai atrás das guloseimas, sejam elas terminar o genoma humano o mais rápido possível ou fabricar uma bactéria do zero. Se essa busca desenfreada vai nos levar à autodestruição? É possível. Mas parece que há algo mais forte dentro de nós, uma curiosidade tão violenta que faz esquecer tudo. É claro que existe todo tipo de gente no mundo. Alguns têm esta curiosidade implacável, outros preferem ser meros espectadores da vida sem mexer em muita coisa, e a

maioria é um meio-termo entre estes dois extremos.

E, cá entre nós, a espécie humana não vai durar para sempre, com ou sem Venter. As espécies evoluem, umas desaparecem, outras surgem. É preciso ter uma visão mais sóbria, menos apaixonada da vida. Embora tenhamos a tendência natural de achar que o ser humano é central e importante para o mundo, é mais provável que o ser humano seja só mais uma espécie, que veio e irá. Já passamos por outros episódios onde nos colocamos em posição de destaque não merecida: achávamos que a Terra era o centro do Universo, achávamos que Deus nos tinha criado especiais. Duas grandes decepções da humanidade, que até hoje muitos não engolem (principalmente a segunda).

#### CONTRA PROIBIR PESQUISA

Dois papéis fundamentais da ciência são aumentar o conhecimento da humanidade e descobrir novas tecnologias. Se essas tecnologias serão usadas para salvar vidas, construir armas ou outras finalidades, não compete somente aos cientistas determinar: trata-se de uma decisão da sociedade como um todo, geralmente ao nível dos países. No mundo atual, cada país tem soberania para decidir como vai utilizar as tecnologias que possui. Embora exista uma forte pressão internacional contra

“ AS REAÇÕES AO ARTIGO QUE ELE PUBLICOU NA SCIENCE VÃO DE RASGADOS ELOGIOS A SEVEROS ATAQUES, COMO SEMPRE ACONTECE

usos considerados prejudiciais, não há neste momento um organismo multilateral suficientemente forte para fazer valer suas resoluções contra a vontade individual dos países.

A meu ver não caberia, como defendem alguns, proibir pesquisas nessa linha. Acredito que a geração do conhecimento deve ser livre, desde que respeitadas as normas éticas vigentes. Do ponto de vista da ética científica, Venter e seu grupo fizeram o que manda o figurino: não utilizaram seres humanos, não impuseram sofrimento desnecessário a cobaias e publicaram seus resultados em veículo de ampla circulação internacional, que inclusive tomou a decisão de disponibilizar esse artigo a qualquer um que tenha acesso à internet, independentemente de ter ou não assinatura da revista. Dessa forma, todos terão acesso: pesquisadores, estudantes, terroristas, curiosos etc.

Então, gente, relaxa. Não vamos existir para sempre. Se vamos sumir mesmo, pelo menos tentemos influenciar um pouco o futuro, dando nosso pitaco sobre quais serão as novas espécies que habitarão o planeta. Eu, pelo menos, não abro mão de acompanhar isso, e agora, graças ao trabalho de Venter e seu grupo, me sinto mais próximo de fazê-lo. »

JOÃO MEIDANIS é diretor da Scylla Bioinformática e professor titular da Unicamp.

# A BIOLOGIA SINTÉTICA E A BIOENERGIA

Como a descoberta de que é possível transferir um genoma criado em laboratório pode afetar as tecnologias para biocombustíveis | MARCOS BUCKERIDGE

Já pensou se, a partir da sequência completa do seu genoma, o leitor conseguisse sintetizar o seu próprio DNA, introduzi-lo em uma célula humana e depois fazer com que o seu DNA assumisse o comando dessa célula, formando tecidos, órgãos e até uma cópia idêntica de si mesmo, para a qual você poderia transferir suas memórias? Como no romance de ficção científica de Phillip K. Dick, que originou o roteiro do filme *Blade Runner*, parece que pelo menos uma importante prova de conceito foi conseguida. O J. Craig Venter Institute (JCVI) publicou em 20 de maio no *site* da revista *Science* um artigo em que reporta a ativação de um genoma sintético de um microrganismo em outro, a bactéria *Mycoplasma mycoides*. A medida de sucesso, nesse caso, foi o fato de que o genoma sintético adquiriu o controle de uma outra célula e essa célula passou a se reproduzir em laboratório.

Fundador do JCVI, o cientista Craig Venter, em várias entrevistas, diz que agora vai atrás do genoma de uma alga para produzir bioenergia. Eu o ouvi dizer algo similar em uma palestra no último Congresso Mundial de Biotecnologia em Barcelona em 2009. Um dos grandes desafios que temos atualmente é produzir bioenergia de forma barata e ambientalmente sustentável. A descoberta do JCVI abre caminho para que pesquisadores consigam microrganismos “engenheirados” que façam o trabalho de produção de etanol ou biodiesel com excelentes padrões.

Aqui no Brasil, no Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), em Campinas, já estamos “engenheirando” bactérias e fungos com enzimas que atacam a parede celular vegetal e podem ajudar no desenvolvimento da rota tecnológica da segunda geração do etanol. Um dos laboratórios do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (INCT do Bioetanol), comandado pelo pes-

UC SAN DIEGO



Algas: aposta da biologia sintética para produzir combustíveis

quisador Richard Ward, reportou no último *workshop* do INCT, em abril, ensaios com uma enzima quimérica, ou seja, uma proteína montada artificialmente que tem a capacidade de atacar dois componentes da parede celular ao mesmo tempo, a lignina e a hemicelulose.

Assim, mesmo que não tenhamos feito (ainda) algo tão espetacular como Venter, a bioenergia brasileira já começa a mergulhar na era da biologia sintética. Há várias vias a escolher e

demorar bem mais. Mesmo assim, os biólogos já estão se movimentando nesse sentido e o estão fazendo através da compreensão dos organismos como sistemas complexos.

**UM GRANDE PASSO, MAS AINDA INICIAL**  
Colocar um genoma sintético numa célula é, sem dúvida, um passo importante na área da biologia. Se considerarmos que um gene corresponde, em média, a 10 a 15 kbps (1 kbp equivale a mil bases do DNA), o que o grupo do JCVI fez foi construir um genoma com 600 a mil genes, transferi-lo para uma célula cujo DNA tinha sido retirado, e fazer com que essa célula bacteriana receptora do genoma sintético funcionasse.

É um avanço técnico sensacional e as implicações disso são enormes. Porém, a dificuldade de aplicar isso em organismos mais complexos é maior ainda. Isso porque no genoma de uma planta de milho estima-se que existam 32 mil genes, ou seja, é 32 vezes maior do que o do genoma sintético que o JCVI utilizou. É provável que na nossa cana-de-açúcar tenhamos aproximadamente o mesmo número de genes que no milho. No entanto, diferentemente da *Mycoplama mycoides*, na cana há oito cópias de cada gene. Isso quer dizer que há, nominalmente, cerca de 240 mil genes interagindo no genoma do organismo e fazendo com que ele funcione perfeitamente bem a ponto de produzirmos o etanol que usamos para encher os nossos tanques. Se o grau de dificuldade fosse linear em relação ao tamanho do genoma, fazer com a cana o que foi feito com a bactéria *M. mycoides* seria 400 vezes mais difícil. Porém há dificuldades adicionais que tornam a relação mais complexa e difícil ainda.

A bioenergia de que necessitamos, em parte por contingência da nossa tecnologia de motores, está armazenada em ligações entre átomos de carbono e a única forma de guardar a energia desse modo é através do processo de fotossíntese. Há bactérias capazes de realizar fotossíntese e elas são geralmente colocadas como um dos alvos da biologia sintética. As cianobactérias, por exemplo, são boas produtoras de lipídios que podem funcionar como biodiesel, o que indica que podemos pensar em montar

sistemas industriais com elas para produção de bioenergia.

Mas há uma reflexão biológica importante a ser considerada. Se as cianobactérias são assim tão boas para produzir bioenergia, por que a civilização não é baseada nelas para obter comida e energia até hoje? Por que nossa comida é baseada principalmente em plantas terrestres? Uma das respostas é que o aumento de complexidade que houve, com a evolução da multicelularidade e o desenvolvimento de sistemas fotossintéticos cada vez mais eficientes, fez com que as plantas dominassem o planeta. Dentre elas, as gramíneas, como o milho e a cana-de-açúcar, produziram um dos sistemas fotossintéticos mais eficientes que existem. Elas têm um sistema de fotossíntese chamado C4, com o qual produzem maior quantidade de biomassa em menos tempo do que outras plantas. E é por isso que a civilização como a conhecemos é fortemente baseada nessas espécies.

A biologia sintética já vem sendo adotada para alterar a fotossíntese em plantas. A soja, por exemplo, não tem fotossíntese tão eficiente quanto as gramíneas. Mas um grupo internacional de pesquisadores já vem traçando estratégias de como fazer para “implantar”, utilizando biologia sintética, um sistema C4 nas folhas dessa leguminosa. Esse é um objetivo imensamente mais difícil do que o que o JCVI alcançou. Isso porque não estamos lidando com um genoma apenas, mas, no caso do sistema C4, com três genomas diferentes: um que fica no núcleo da célula e mais dois que ficam nos dois tipos de cloroplastos encontrados nas diferentes células das folhas das plantas C4.

Venter deu um grande passo, mas ainda falta muita investigação e criatividade para que possamos realmente quebrar o código da complexidade que a vida esconde. Há um grande número de pesquisadores, inclusive no Brasil, se movendo na direção do uso da biologia sintética como principal arma para desenvolver novas biotecnologias. O que vem por aí promete ser extremamente divertido e interessante. ■

MARCOS BUCKERIDGE é um dos coordenadores do programa Bioen-FAPESP e diretor científico do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE).



problemas a resolver usando essa tecnologia. Uma delas é “engenheirar” o metabolismo da *Saccharomices cerevisiae*, a levedura que usamos para fazer álcool, de forma que ela seja capaz de usar os açúcares de cinco carbonos que vêm das hemiceluloses, algo que ela não faz muito bem.

Com microrganismos, as aplicações da biologia sintética serão bem mais rápidas e deverão produzir resultados impressionantes. Por outro lado, com organismos mais complexos, podem