

Carlos Fiolhais

Dep. de Física, Fac. de Ciências  
Univ. de Coimbra, Coimbra (Portugal)

---

## Física, Computação e a “Inteligência” da Natureza

### Resumo

*Discutem-se as relações da Física com a Computação, sublinhando o facto de as leis físicas poderem ser vistas como “software” e a matéria como “hardware” de um gigantesco computador. Comparam-se as perspectivas do teórico e do experimentalista sobre os processos de cálculo que ocorrem na Natureza. É abordado o problema do carácter contínuo ou descontínuo do espaço-tempo e são enunciados os limites físicos fundamentais da actividade de computação.*

### Abstract

*The relationships between Physics and Computation are discussed, emphasizing that the physical laws may be seen as software and matter as hardware of a giant computer. The theoretical and experimental viewpoints of the computational processes which occur in Nature are compared. The problem of the space-time being continuous or discontinuous is referred to and the fundamental physical limits of computation are enumerated.*

As diferentes épocas históricas costumam criar as suas metáforas e a nossa não está imune a esse fenómeno de retórica sazonal. É indubitável que a metáfora informática está hoje muito em voga. Neste caso, porém, talvez se trate mais do que um simples exercício de estilo, que apenas serve para caracterizar o discurso. Uma metáfora útil torna-se, quando repetida, uma verdade profunda. Os cientistas invocam hoje muitas vezes o computador como analogia, nos mais variados domínios. Até os físicos, que não são excessivamente dados a liberdades de linguagem, falam do computador de uma maneira paradigmática. Assim, já houve um físico, Heinz Pagels, que chamou às leis da física o “código cósmico”. Do seu ponto de vista, as leis da física não seriam mais do que o conjunto de “software” que anima o “hardware” (partículas, campos) do universo. Pagels disse mesmo que: “O cérebro, o tempo atmosférico, o sistema solar, mesmo as partículas quânticas são todos eles computadores. Claro que não parecem computadores mas estão de facto a computar as consequências das leis da natureza. Na perspectiva computacional, as leis da natureza são algoritmos que governam a evolução do sistema no tempo, tal como fazem os programas de computadores. Por exemplo, os planetas, ao moverem-se em torno do Sol, estão a efectuar computações análogas das leis de Newton”.

O mundo é pois comparável a um grande computador analógico, a uma enorme máquina de cálculo. Pode ser visto como um imenso autómato celular, um tabuleiro de células cujos estados são transformados sucessivamente noutros, tal como no “Jogo da Vida” do matemático inglês J. Conway.

Portanto, mais do que pôr a ênfase na inteligência artificial, que ele porventura ajudou a criar com as tecnologias do silício, ao físico interessa realçar a inteligência natural da natureza. O autómato pode ser (parece que é) uma boa metáfora para o funcionamento do cérebro humano, mas é de certeza uma metáfora ainda melhor para o funcionamento do mundo. Não temos tanto de nos admirar com o facto de sermos inteligentes, mas mais de admirar, como seres inteligentes, a inteligência de uma natureza regida por um código uniforme e universal.

O homem começou por compreender esse código prevendo certos fenómenos naturais com a ajuda de algoritmos matemáticos. Verificou-se que o “programa” que descreve o comportamento de uma maçã e da Lua é o mesmo, e que tanto maçã como Lua estão a efectuar o mesmo “cálculo”, exemplificam o mesmo algoritmo. O planeta Neptuno foi descoberto como aplicação do algoritmo (lei) da gravitação universal; foi tudo realizado no papel pois não existiam ao tempo dispositivos de cálculo automático adequados. Neptuno estava também a realizar o mesmo “cálculo” que a maçã e que a Lua. Um planeta, Neptuno no caso, olha para os outros, “calcula” o inverso do quadrado das distâncias e ajusta a sua aceleração em conformidade... Um físico olha para os outros planetas, calcula o inverso do quadrado das distâncias e diz onde está Neptuno. A natureza é pois inteligível, tem uma “inteligência” que a nossa só a espaços e parcialmente consegue vislumbrar. Conseguiu-o Newton, quando fundou a física, conseguiu-o Einstein, quando reformulou a doutrina da gravitação universal.

O físico pode portanto ser denominado de “utente” do computador da natureza. Confronta-se no entanto com objectivos completamente diferentes dos de um vulgar utente de um computador artificial. Um utilizador informático dispõe de uma máquina criada com um certo objectivo, uma máquina congeninada para desempenhar um certo conjunto de tarefas. O interior dessa máquina é, em princípio, bem conhecido. O físico está, porém, diante de uma “máquina” que ele não criou, cujo objectivo e/ou sentido lhe escapam, e cujo interior está longe de ser conhecido. Os resultados perante certas entradas são muitas vezes completamente inesperados: algumas das grandes descobertas deste século, como a mecânica quântica, revelaram-se uma necessidade experimental – uma imposição da natureza – não sendo o resultado de nenhum esquema lógico profundo e preliminar nem de nenhum senso comum porventura equidistribuído. Pelo contrário: há quem teime que a mecânica quântica é inconciliável quer com a lógica quer com o senso comum. Como disse Bohr: “Quem não achar a mecânica quântica estranha não a compreendeu verdadeiramente”.

O utente normal da informática, que se senta por exemplo diante de um microcomputador, procura comparar os dados entrados e saídos; conhece a entrada e pretende conhecer a saída. Não lhe interessa o interior da máquina. Em contraste, o físico analisa a entrada e a saída de um processo para perceber o “programa interno”, para compreender a mensagem ROM (“Read Only Memory”), que a natureza traz incorporada. Trata-se de ROM e não de RAM, para utilizar a terminologia moderna, porque ele não pode alterar “o código memorizado” e fazer, por exemplo, o electrão ter outra carga ou as estrelas andarem de outra maneira, que não seguindo a regra da razão inversa do quadrado da distância como a maçã, a Lua e Neptuno.

A diferença entre um físico e um utilizador de computador é portanto mais uma diferença de intenção do que uma diferença de procedimento. Diria até que, no que respeita aos procedimentos, não há diferença absolutamente nenhuma.

Hoje em dia, as experiências físicas são em geral extraordinariamente complicadas. Não estamos mais no tempo em que Galileu observava o isocronismo das pequenas oscilações do candeeiro da catedral de Pisa para deduzir as leis do pêndulo. Nem no tempo

em que para encontrar uma nova estrela e ficar famoso bastava olhar para o céu com uma luneta rudimentar. As grandes experiências modernas exigem equipamento sofisticado e são, total ou parcialmente, computadorizadas. Em física de altas energias, por exemplo, a análise das colisões de partículas nucleares em aceleradores gigantes seria impossível sem os poderosos meios de processamento de informação actualmente disponíveis. Assim, o bóson Z, descoberto no CERN em 1983, não passa de um pico num gráfico de computador. A natureza é ligada a um sistema de processamento de informação para revelar um dos seus segredos, a bola do jogo da interacção fraca. Nas ciências planetárias, para dar outro exemplo, utilizam-se sondas artificiais, que são enviadas para os espaços. Mas não basta a sonda olhar para os outros planetas e decidir, em conformidade, qual deve ser o seu caminho: são os computadores da NASA que escolhem ou permitem a escolha do melhor caminho e fazem desencadear as acções necessárias a esse desiderato.

Mesmo os dispositivos experimentais que não utilizam computadores, no sentido usual do termo, podem ser designados por computadores porque, no fundo, fazem corresponder a uma certa entrada uma certa saída: trata-se portanto de um processo de cálculo, embora um processo de cálculo com um fim muito específico e particular. São computadores analógicos e não computadores digitais.

E os físicos teóricos? Cada vez mais, a actividade destes se prende com a formulação e utilização de modelos computacionais, que descrevem com maior ou menor precisão a realidade. Podem simular, por exemplo, o processo de colisão de um próton com um antipróton sem ter necessidade do acelerador dispendioso. Usando algoritmos apropriados (i. e. semelhantes ou iguais aos algoritmos da natureza), procuram obter o pico que é o bilhete de identidade de uma partícula Z. Simulam – outro exemplo – a aproximação de uma nave de um planeta exterior no sistema solar, podendo, se a nave cair por engano, voltar atrás e recomeçar tudo de novo. Podem, por conseguinte, ser mais levianos que os seus colegas experimentais. Dizia P. Kapitza, físico soviético experimental: “perguntem a um teórico e façam o contrário”. Os físicos experimentais podem não levar demasiadamente a sério as locuções dos seus parceiros teóricos, porque elas são repetíveis e modificáveis. Modificam-se à medida que se aguça a arte e o engenho de programação de um computador digital. Os físicos experimentais têm de levar dramaticamente a sério as suas montagens laboratoriais, porque elas são computadores analógicos particulares e onerosos. Os teóricos dispõem de muitos mundos para experimentar, mundos de imaginação de entre os quais um – o que afinal interessa – está mais próximo do mundo exterior, enquanto que o experimentalista só dispõe de um, o “difícil”, “miserável” mas único mundo que habitamos.

Os experimentalistas pretendem saber quais são os constituintes e fenómenos fundamentais, por interrogação directa, por vezes violenta, da natureza. Querem saber como é o mundo e “apertam-no” até ele se render e confessar a verdade, toda a verdade e nada mais que a verdade. Os físicos teóricos, por sua vez, averigüam as consequências de determinados processos, suaves, de modelação para saber se a natureza é como é por alguma razão especial de entre as várias alternativas possíveis. Para usar uma imagem teológica, que não deve ser interpretada literalmente, pretendem saber se Deus teve alguma escolha na criação do mundo, se por exemplo o espaço-tempo em vez de 4 podia ter um outro número qualquer de dimensões (como 3,99).

Tem contudo de se dizer que a dicotomia entre teóricos e experimentais, que se deu neste século e que foi fruto da procura de um nicho ecológico numa sociedade científica extremamente competitiva, não faz hoje, na era informática, demasiado sentido. Quer uns quer outros utilizam autómatos para produzir conhecimentos, significados e comunicações

sobre o mundo. Ambos utilizam “tecnologias do artificial” para compreender o natural. O computador é um instrumento que está a permitir plataformas de interdisciplinaridade, anteriormente insuspeitadas, e pontes de entendimento, outrora julgadas impossíveis, entre teóricos e experimentais. Usando a linguagem das ciências de computação, não é difícil ver que estão bastante próximos uns dos outros. Uns usam o “Grande Computador Natural” directamente, carregando muitas vezes nas teclas às apalpadelas. Os outros utilizam, num processo de tentativa e erro, computadores artificiais, para tentar imitar o “Grande” ou descobrir o que ele porventura tem de inimitável. Os primeiros, para poupar tempo e dinheiro, perguntam aos segundos. Os segundos, para poupar dinheiro e tempo, recorrem aos primeiros. A sua sinergia traz vantagens mútuas, nomeadamente quando a experimentação é difícil ou impossível ou quando a teoria é mais “wishful thinking” do que conjunto de relações causais bem estabelecidas.

Mas os físicos não estão isolados. Existem químicos, biólogos, engenheiros, etc.. Os físicos têm não apenas de se entender entre si mas também de se entender com os outros. Num tempo dominado pelos instrumentos de cálculo, os intercâmbios horizontais estão a substituir as antigas hierarquias verticais. As simulações computacionais, que hoje são comuns tanto em física como em química, biologia, engenharia, não são teoria tradicional nem experiência tradicional, mas um casamento em comunhão de bens, tanto herdados como adquiridos, de uma e outra.

Quais são hoje os bens adquiridos? Podemos sumariá-los recorrendo à designação, boa à falta de melhor, de “ciências da complexidade”. Uma característica do “miserável” e “difícil” mundo que habitamos é o extremo grau de complexidade da maioria dos seus fenómenos. O grande número de constituintes elementares (ou supostamente elementares) da natureza e a sobreposição dos seus vários modos de interacção dá origem a processos extremamente complicados de discernir e interpretar. Ora esta complexidade pode residir mais na saída do que na entrada ou no programa interno. Os avanços das tecnologias de informação permitiram-nos verificar directamente que algoritmos simples podem dar origem a resultados extremamente complexos. Essa diferença qualitativa deve-se à não-linearidade do algoritmo. A saída é, nesses casos, extremamente dependente da entrada, pelo que falamos de sensibilidade às condições iniciais. Muitos fenómenos da natureza evidenciam complexidade, apesar do programa ser eventualmente simples.

Actualmente, está-se a descobrir que o sistema mais determinista e periódico de todos – o sistema solar – é caótico e imprevisível (a longo prazo, evidentemente), embora a lei da gravitação seja bastante simples e não seja difícil especificar com alguma precisão as presentes efemérides astronómicas. Os físicos – esses profetas do comportamento da natureza – arriscam-se portanto a ser falsos profetas, se persistem em efectuar profecias a longo prazo. Falham estrondosamente na missão para a qual se julgavam mais vocacionados – saber o que vai acontecer a seguir – porque não dispõem de meios seguros de previsão à distância. A qualidade das suas profecias tem a ver com as possibilidades e limites do cálculo.

Ao falar de imprevisibilidade, é oportuno referir, ainda que só de passagem, o problema da imprevisibilidade do pensamento e acção humanos. Uma máquina que passe o teste de Turing é aquela que consegue imitar na perfeição o comportamento de um ser humano. Não existe, mas não há qualquer razão de fundo para que não exista. Julgo que a previsão da impossibilidade de uma máquina destas pode falhar e o melhor é esperar e ver. Não há qualquer razão para que não se tentem construir aproximações melhores ou piores a máquinas que imitem a inteligência e a acção humanas. Se o computador substitui partes da natureza, não há qualquer motivo a priori para não poder substituir essa parte da

natureza que é o homem. O programa da chamada "inteligência artificial" é decerto bastante ambicioso, mas não é utópico. Ao contrário de outros físicos, não desvalorizo por isso a "inteligência artificial" como projecto, embora esse domínio do saber tenha prometido mais do que aquilo que, até à data, foi capaz de mostrar (o fenómeno não é novo pois já aconteceu nos anos sessenta com a energia nuclear). Julgo que o teste decisivo a uma máquina inteligente será colocá-la debaixo de uma macieira e ver se ela é capaz de fazer como Newton, i.e. criar a física, compreender a "inteligência" da natureza a partir da observação da maçã e da Lua. Sei porém que esse teste não se vai realizar nos tempos mais próximos. No longo processo para se conseguir essa máquina, passar-se-á provavelmente pela abolição progressiva da distinção entre artificial e natural, com a substituição do silício por componentes biológicas (mas os pormenores das técnicas não é garantido que funcionem satisfatoriamente!).

Existem no entanto diferenças, pelo menos aparentes, entre a natureza e um computador digital. Vejamos a mais importante.

Um computador digital trabalha com quantidades discretas. A lógica do computador assenta numa base sim-não, ligado-desligado. A natureza, pelo contrário, é normalmente considerada pelos físicos como contínua. A lógica quantitativa parece à primeira vista mais rica do que a simples lógica disjuntiva do tudo ou nada. Mas trata-se de uma questão de escola: achamos preferível sempre a lógica na qual fomos ensinados. Assim, tanto a mecânica clássica como a quântica traduzem-se matematicamente por equações diferenciais num contínuo espaço-temporal. Para resolver essas equações num computador digital tem de se discretizar o problema, i.e. assumir que o espaço e o tempo não são contínuos mas sim constituídos por um conjunto de pontos que formam uma grelha. Mas será que o espaço e o tempo são mesmo contínuos? Ninguém sabe. Nunca ninguém viu um infinitésimo (a não ser obviamente os matemáticos, que acreditam em tudo, ou pelo menos em tudo o que inventam). Hoje sabe-se da teoria quântica que existe uma distância mínima e um tempo mínimo observáveis (esse limiar microscópico do espaço-tempo chama-se "barreira de Planck"). O princípio da incerteza de Heisenberg impede que se possa saber algo de concreto para além desse espaço e desse tempo. Termina aí a nossa física.

Pensa-se que os problemas dos infinitos em teorias de campo (um dos maiores quebra-cabeças em física) possam ter a ver com a estrutura contínua do espaço-tempo. Feynman, profundo conhecedor dessas teorias, acha muito estranho que seja possível um conhecimento infinito numa região espaço-tempo. O autómato universal que é o mundo executaria uma infinidade de cálculos num espaço limitado.

Talvez as leis físicas actuais devam por isso ser substituídas por esquemas recursivos discretos e o contínuo espaço-temporal que consideramos hoje seja uma abstracção, uma abstracção útil, quando muito, mas apenas uma abstracção. Alguns físicos, mais ousados, propuseram já leis da física discretas e, dada a natureza aproximada, para não dizer grosseira, das nossas medidas actuais, não podemos ainda confrontar as leis contínuas com as discretas e decidir por umas ou por outras. Talvez até nunca seja possível uma decisão desse tipo. Existem argumentos estéticos para um e para outro lado, mas nem sempre verdade e estética estão do mesmo lado. Existem argumentos filosóficos para um e para outro lado, mas boa filosofia nem sempre é boa física. A boa física é conhecedora das suas limitações.

As ciências da computação já estão a mudar a metodologia, para não dizer o conteúdo, da matemática, colocando a ênfase nas estruturas discretas e nos procedimentos recursivos. A física continua tradicionalmente atada ao velho cálculo e às quantidades infinitesimais, que têm algo do ideal platónico. Não é já tempo, agora que as simulações computacionais se estão a democratizar, de pôr a física mais de acordo com essas práticas correntes? Ou

será antes aconselhável pôr as ciências da computação mais de acordo com a física? No primeiro caso, as leis físicas seriam algoritmos de diferenças finitas, enquanto no segundo caso as ciências da informação deveriam incidir mais no contínuo e no analógico.

Seja o espaço-tempo contínuo ou discreto, pode-se dizer que até aqui os computadores têm ajudado a física mais do que a física tem ajudado os computadores (ajudou, bem entendido, com a invenção do transistor, das tecnologias VLSI, dos supercondutores, etc. : tudo isso são sistemas físicos). Mas é chegada talvez a hora de a física contribuir decisivamente para as ciências de computação. Um dos domínios onde se pode dar esse contributo reside no estudo dos limites da computação e dos computadores que a materializam.

Os cientistas de computação falam de autómatos universais e de processos de computação abstractos. Mas, em última análise, qualquer processo de computação exige um suporte material (quer seja um ábaco, uma calculadora de bolso, um supercomputador, uma rede de computadores, um cérebro humano). Como o suporte material obedece inexoravelmente às leis da física, convém averiguar quais são as consequências para as ciências da computação de alguns limites fundamentais da física. Essas restrições da física exprimem-se por desigualdades e são essencialmente três:

1) A mais antiga surgiu na física macroscópica. Dá pelo nome de segunda lei da termodinâmica. Esta foi para Eddington e é ainda para grande número de cientistas a lei mais importante de toda a física e o obstáculo mais intransponível à observação humana. A partir da análise quantitativa do rendimento de máquinas, descobriu-se que existe uma limite à nossa informação sobre o mundo. Num sistema isolado a entropia (medida da falta de informação) não pode diminuir. Expressa de uma outra maneira, a segunda lei diz que é impossível o chamado demónio de Maxwell, uma hipotética criatura que conseguiria, manobrando o movimento de moléculas, colocar em contacto um sistema quente e um sistema frio, ficando o quente mais quente e o frio mais frio! Num sistema que contivesse um demónio de Maxwell, a informação aumentaria, apesar de o sistema estar aparentemente isolado: ficaríamos a saber, de uma maneira cada vez mais nítida, onde era frio e onde era quente. Mas essas criaturas terríveis nem existem nem podem existir, proibidas como estão pela famosa segunda lei! É curioso notar que a segunda lei da termodinâmica é hoje compreendida recorrendo às ciências de computação. Os físicos falam de informação e da falta dela. Dizem que é fatal a existência de fluxos de calor sempre que se apaga informação num registo. Por isso é que tal demónio é impossível: ele teria de registar o estado das moléculas e actualizar esses registos, o que tem custos termodinâmicos. A informação nova só se obtém com o auxílio de proventos energéticos da vizinhança. Neste contexto, assumem particular relevância os trabalhos de L. Brillouin, autor de uma obra sobre "Física e Teoria da Informação", C. Shannon, autor da moderna teoria da informação e, mais recentemente, C. Bennett e R. Landauer, dos laboratórios IBM, que estudaram a relação da termodinâmica com as ciências da computação. Quem diria que a termodinâmica desenvolvida com a máquina a vapor iria progredir com as máquinas de silício?

Vejamus um breve resumo de alguns dos avanços conseguidos desse esforço de cooperação. É sabido que a computação é um processo normal e naturalmente irreversível. Por exemplo, a partir do resultado de uma soma não se pode reconstruir o valor das parcelas (estas, em circunstâncias usuais, são apagadas da memória da calculadora). Landauer mostrou porém que se podiam conceber e construir máquinas lógicas reversíveis. Essas máquinas não produzem perdas de calor, desde que operadas a velocidade suficientemente pequena. A possibilidade de uma computação reversível faz com que os computadores artificiais se aproximem do grande computador natural, que é em princípio reversível (embora haja o problema da violação da reversibilidade do tempo em alguns

processos atômicos, pensa-se que a assimetria que se constata à nossa volta é essencialmente o resultado de condições iniciais assimétricas e não de leis assimétricas).

Podemos resumir a restrição termodinâmica dizendo que a computação exige energia. Quando não exige muita, é preciso muito tempo e portanto muita paciência.

2) A segunda limitação provém do estudo dos fenômenos electromagnéticos e da teoria da relatividade. De acordo com a teoria da relatividade restrita, existe uma velocidade máxima para a propagação de sinais, que é precisamente a velocidade da luz. As consequências para a engenharia de computadores são evidentes: se temos pressa, convém construir máquinas muito pequenas, tão pequenas quanto possível, para a informação demorar o mínimo de tempo entre as várias componentes. A máquina da natureza é grande (grande, digamos, quando comparada com um átomo) e por isso nela coexistem vários tempos e vários processos de cálculo. Mais do que um autômato com um único processador central, podemos dizer que o universo é uma rede de autômatos, ligados à velocidade da luz.

Em suma, a existência de um limite para a propagação de informação impede os processos de cálculo instantâneos. A computação exige tempo.

3) Para diminuir o tempo de cálculo, é conveniente que os autômatos sejam o mais pequenos possíveis. A terceira restrição tem a ver com o princípio da incerteza de Heisenberg, que reina no mundo microscópico: os fenômenos à escala atômica são imprevisíveis. As nossas máquinas de calcular, embora pequenas, não são tão pequenas como isso. Os constituintes da memória não atingem as proporções atômicas. Feynman conjecturou que seria possível colocar informação em átomos e pode-se especular sobre a possibilidade de pôr informação nos núcleos atômicos. É óbvio porém que estamos limitados a um tamanho mínimo (o das partículas elementares) para suporte material da informação e, à medida que descemos a esse tamanho mínimo, cresce a insegurança sobre a informação armazenada.

Concluindo: não existem máquinas infinitamente pequenas, nem máquinas seguras muito pequenas. A computação exige espaço.

Existem portanto limites teóricos bem definidos para as máquinas de calcular mas deve dizer-se também que estamos ainda muito longe dos limites teóricos. A tecnologia de computadores não atingiu ainda nem atingirá tão cedo os limites da física. "Quem não admirará os progressos do próximo século!"

Permitam-me que faça, para terminar, um exercício de prospectiva. Deve ser uma boa profecia dizer que, no próximo século e nos seguintes, o universo vai continuar sujeito às leis da física, evoluindo tal como um autômato celular. A vida em geral e a vida inteligente em particular são uma parte do universo (uma parte desse processo de cálculo). Julgo ser também uma boa previsão afirmar que a inteligência natural do homem vai continuar a decifrar a inteligência natural da natureza, procurando entender o "código cósmico" de que falei no início. Mas parece-me evidente que o nosso "hardware", que ao longo dos tempos tem sofrido um processo de evolução, vai continuar sujeito a modificações. Não está provado que aquilo que chamamos de inteligência humana necessite do suporte biológico actual. Há até (o físico F. Dyson, de Princeton) quem faça especulações, com algum fundamento, sobre o futuro da vida a muito, muito longo prazo num universo aberto. Talvez nessa altura a vida inteligente, i.e. o processamento de informação de acordo com certas exigências, se realize materializada em poeira interestelar ou revista uma outra forma exótica qualquer.

Fica a questão, suponho que inteligente, de saber se o universo, que chamei de inteligente, existirá sem inteligências para o compreender e admirar.