ARTIGO

ALGORITMICIDADE E INTUIÇÃO: A CRÔNICA DE UM DEBATE EM FILOSOFIA DA MENTE

João de Fernandes TEIXEIRA*

RESUMO

O artigo apresenta o estado da arte de um debate que se trava hoje em dia em torno do problema da algoritmicidade na Ciência Cognitiva e na Filosofia da Mente. A primeira parte introduz conceitos fundamentais para a compreensão da natureza deste debate tais como as noções de Máquina de Turing, Problema da Parada, Teorema da Incompletude, indecidibilidade e outras. A segunda parte apresenta algumas especulações que visam relacionar o problema da algoritmicidade com a Teoria da Complexidade Computacional.

Palavras-chave *- algoritmicidade, Máquina de Turing, Problema da Parada, incompletude, indecidibilidade, Teoria da Complexidade, problema mente-cérebro.*

ABSTRACT

The paper presents the outlines of a contemporary debate in Cognitive Science and Philosophy of Mind concerning the notion of algorithmicality. The first part introduces some basic concepts such as Turing Machine, Halting Problem, Incompleteness, undecidability and others. The second part draws a relationship between algorithmicality and Complexity Theory.

Key-words *- algorithmicality, Turing Machine, Halting Problem, incompleteness, undecidability, Complexity Theory, mind-brain problem.*

Nos últimos anos a Filosofia da Mente e a Inteligência Artificial parecem ter chegado a uma encruzilhada decisiva: haverá atividades mentais humanas que não possam ser simuladas por sistemas artificiais? Até que ponto é sustentável uma analogia entre mente e computador? São estas as questões que têm preocupado os estudiosos da Filosofia da Mente, sobretudo aqueles que estão envolvidos com pesquisas na área de Inteligência Artificial. Não se trata de procurar uma comparação entre mentes e máquinas simplesmente em termos práticos. Sabemos que a Inteligência Artificial não frustrou aqueles que apostaram na possibilidade de suas realizações e que estas se expandiram de maneira vertiginosa, dando origem a programas computacionais sofisticados para realizar diagnósticos

(*) Professor no Departamento de Filosofia da Universidade Federal de São Carlos e colaborador pleno do Instituto de Estudos Avançados da USP.

médicos, executar cálculos matemáticos e de engenharia extraordinariamente complexos e até mesmo para jogar xadrez.

Mas não é com aplicações e com resultados práticos que os filósofos da mente estão preocupados. Suas preocupações são muito mais radicais e se expandem para além das dificuldades tecnológicas que a Inteligência Artificial enfrenta ou poderá vir a enfrentar no futuro. É preciso saber se há alguma diferenciação *em principio*, intransponível, entre mentes e máquinas. Se houver esse critério de diferenciação, se pudermos formulá-lo com precisão, então estaríamos de volta a nossa confortável posição antropocêntrica que torna nossa inteligência única e inigualável - pelo menos no nosso planeta. Mais do que isto: se computadores são um tipo especial de arranjo material, uma combinação de elementos materiais de silício ou de qualquer outro elemento da natureza, e se eles puderem realizar tudo o que uma mente humana realiza, não haveria nenhuma razão para supor que mente e matéria são diferentes. Poderíamos igualar mentes e máquinas, cérebros e mentes.

Estas últimas afirmações levam-nos de volta a questões clássicas da Filosofia, questões que têm atormentado os filósofos ao longo dos séculos e que têm tornado a história do pensamento uma oscilação pendular entre materialismo e dualismo. Questões que reaparecem a medida em que a Filosofia da Mente e a Ciência Cognitiva passam a revivê-las e rediscutí-las, agora sob o pano de fundo das realizações da Inteligência Artificial. Haveria alguma coisa que nossa mente pode fazer e que uma máquina não poderia executar?

Para apreender o significado desta questão e o modo como ela é colocada na Filosofia da Mente contemporânea é preciso saber o que os pesquisadores da Inteligência Artificial entendem por *computador* e por *máquina*. É preciso se afastar das noções cotidianas de máquina e aproximar-nos de algumas idéias matemáticas fundamentais, como, por exemplo a noção de *algoritmo*. A palavra algoritmo foi criada pelo matemático árabe al-Khowarizmi, no século IX. Um algoritmo é um procedimento *mecânico* para a solução de um problema matemático, um procedimento que envolve uma representarão bem definida do problema em questão e um conjunto de regras que levem a sua solução. Computadores são basicamente executores de algoritmos - algoritmos que lhes são fornecidos na forma de programas.

Na década de 30 o matemático inglês Alan Turing (1912-1954) formalizou a noção de algoritmo através da noção de *Máquina de Turing*. A máquina de Turing é o *princípio formal* subjacente a construção dos modernos computadores digitais, por mais sofisticados que estes possam vir a ser. Entender o que é uma maquina de Turing requer a compreensão de alguns conceitos matemáticos complexos, como por exemplo, a idéia de recursão. Mas é possível obtermos uma caracterização da noção de Máquina de Turing de uma maneira mais simples, sem perder muito em precisão.

O que é uma máquina de Turing?

Imaginemos uma longa fita de papel com símbolos e marcas a intervalos regulares, formando pequenos quadrados. Imaginemos também que podemos estipular uma espécie de marcador ou ponto fixo em relação ao qual possamos mover a fita de papel para a esquerda ou para a direita. A situação de que falamos pode ser representada assim:

E_4s_1	As_2	D_2s_3	Rs_4	s_5

marcador

Suponhamos que o nosso marcador tenha também um dispositivo que permita reconhecer se num determinado quadrado há um símbolo ou não, imprimir e apagar símbolos que aparecem na fita e movê-la para a esquerda ou para a direita, dependendo do símbolo que aparece impresso. Na fita acima há dois tipos de símbolos: letras minúsculas e letras maiúsculas. Mover a fita para a esquerda ou para a direita (e num número determinado de quadrados) dependerá do símbolo em maiúsculas que é identificado pelo marcador..

Além de mover a fita em determinadas direções, o símbolo em maiúsculas pode significar que o marcador deve imprimir ou apagar um símbolo num certo quadrado. Assim, por exemplo, E_4 significa mover a fita 4 casas para a esquerda, D_2 duas para a direita, As2 apague s_2, Rs_4 imprima s_4 e assim por diante. As letras maiúsculas representam as instruções ou o programa da máquina e cada um dos passos assim executado constitui uma computação. Com este tipo de máquina é possível executar qualquer tipo de tarefa que possa ser representada simbolicamente e para a qual haja um número finito e não-ambígão de instruções - uma 'receita ou um algoritmo. Por ser uma máquina extremamente geral, a máquina de Turing pode imitar a ação de qualquer computador digital.

A Máquina de Turing permite representar com precisão o que significa realizar uma computação - um processo que é realizado passo a passo e de acordo com um conjunto de instruções pré-estabelecidas. Realizar este conjunto de instruções (que constituem o programa da maquina) significa realizar um procedimento algorítmico ou um procedimento efetivo. Neste sentido, um procedimento efetivo é uma espécie de receita que diz exatamente o que deve ser feito para se passar de um estado para outro num processo, ou seja, um conjunto finito de instruções não-ambígüas que nos dizem o que fazer passo a passo, e que nos garantem a obtenção de um resultado final. Assim, a descoberta de Turing consiste no fato de ele ter demonstrado, através da invenção de sua máquina, que toda e qualquer tarefa que possa ser representada na forma de um procedimento efetivo pode ser mecanizada, ou seja, realizada por um computador.

Máquinas de Turing são *virtuais* e *deterministicas*, ou seja, são máquinas *abstratas* que podem ser construídas com qualquer tipo de material, até com pedacinhos de papel e latas de cerveja vazias. O que importa é a *realização de uma função*, seja por que meio for. E a realização dessa função exige a representação de um procedimento finito e determinístico.

O mais curioso é que Turing não inventou sua máquina pensando na construção de computadores digitais. A utilização de suas idéias para esta finalidade ocorreu algum tempo depois, quando o engenheiro austríaco John von Neumann implementou, isto é, deu forma física aos primeiros computadores usando o princípio de Turing. Surgiram então os primeiros computadores que até hoje são conhecidos como "máquinas dotadas de arquitetura de Von Neumann". Posteriormente estas máquinas foram sendo aperfeiçoadas e foram diminuindo de tamanho, até chegarmos aos nossos computadores domésticos.

Em 1948 ocorre um evento decisivo: o simpósio de Hixon, que reuniu pela primeira vez, um grupo de cientistas nos Estados Unidos com um o propósito de fundar uma ciência da mente humana tomando como ponto de partida o computador e a analogia entre atividades mentais humanas e programas computacionais. Nascia a Inteligência Artificial. A idéia central dos pesquisadores reunidos em Hixon consistia em conceber as atividades mentais humanas como a realização ou execução de um algoritmo - um algoritmo cuja forma geral seria a Máquina de Turing. A idéia era profundamente tentadora: máquinas de Turing são virtuais, isto é, elas correspondem à execução de um conjunto de funções independentemente do material que está sendo utilizado para construí-las; isto permitia conceber a atividade mental humana como a implementação biológicas e cerebral de uma Máquina de Turing. *A mente é uma máquina de Turing implementada através do cérebro*; esta era a idéia central dos pesquisadores da Inteligência Artificial nas décadas de 50 e 60.

A independência em relação ao substrato material onde poderia ser implementada uma Máquina de Turing para realizar funções diversas era também muito conveniente, na medida em que ela deixava espaço para a implementação de atividades mentais (inteligentes) em substratos que não fossem idênticos ao material cerebral, como era o caso dos computadores digitais. Inteligências paralelas poderiam coexistir com a nossa, a humana, desde que para isso se conseguisse descobrir o algoritmo correto correspondente às atividades mentais que se queria simular e realizá-las através de uma Máquina de Turing. Pensar é realizar um algoritmo, pensar é calcular, de repente estávamos revivendo a concepção de pensamento expressa pelo filósofo inglês Thomas Hobbes no século XVII!!

A Inteligência Artificial teve um sucesso tremendo nas décadas de 50 e 60. Suas realizações foram notáveis e chegou-se mesmo a acreditar que este era o caminho certo para se conseguir uma replicação mecânica das atividades mentais humanas. Afinal, tinham aparecido programas para jogar xadrez, programas para realizar cálculos de engenharia e - talvez a realização mais notável - programas para demonstrar teoremas da lógica. Havia a certeza implícita de que logo se chegaria à replicação mecânica total das atividades mentais humanas bastando para isso que se estudasse e se desenvolvesse cada vez mais algoritmos (programas) mais poderosos. O início da década de 60 foi marcado por uma grande euforia e vultosos investimentos na construção de máquinas de tradução - uma área que ainda atrai grande quantidade de pesquisadores da Inteligência Artificial. A Filosofia da Mente desenvolvida nessa época também se inclinava cada vez mais fortemente em favor do *modelo computacional da mente* - a idéia de que nada mais somos do que Máquinas de Turing altamente poderosas cujo substrato material é nosso cérebro.

Ora, até que ponto seria possível sustentar esta analogia entre mentes, cérebros e Máquinas de Turing? Na verdade, quando formulamos este tipo de questão estamos perguntando se todas as formas de pensamento humano podem ser representadas na forma de um algoritmo. Do ponto de vista dos filósofos, se houver uma e *apenas uma* que não possa teremos uma razão para questionar a legitimidade do modelo computacional da mente e esboçar um critério de diferenciação entre mente humana e máquina (máquina de Turing). Mas o que é mais interessante é que o próprio Turing reconhecia a existência de uma dissimilaridade entre atividades mentais humanas e algoritmos.

Conforme notamos acima, quando Turing formulou, pela primeira vez, sua concepção de Máquina de Turing no início dos anos 30, sua preocupação não era a construção de computadores digitais. Sua preocupação voltava-se para a tentativa de resolução de um problema matemático que ocupara boa parcela da atenção dos matemáticos nas três primeiras décadas deste século. Com efeito, no ano 1900, o matemático David Hilbert tinha formulado um conjunto de 23 problemas fundamentais que deveriam nortear a investigação matemática nas décadas seguintes. O Décimo Problema formulado por Hilbert (chamado de *Enstscheidungsproblem* ou Problema da Decisão) tornou-se o mais famoso e podia ser enunciado da seguinte forma: haverá um procedimento algorítmico (mecânico) geral que possa *em princípio* resolver todos os problemas da matemática (pertencente a alguma classe adequadamente bem definida), um após outro? Em outras palavras: haverá um algoritmo geral que permita demonstrar *a priori* se, dado um enunciado matemático, ele pode ser provado? Ser provado significa ser logicamente dedutível de um dado conjunto de axiomas: se um enunciado for dedutível do conjunto inicial de axiomas ele é verdadeiro e neste caso é um teorema, se for falso, sua negação será então verdadeira.

Parte da dificuldade para responder a esta pergunta estava em definir o que se deve entender por "procedimento mecânico". Para superar a dificuldade, Turing tentou imaginar como o conceito de uma "máquina" poderia ser formalizado - a máquina de Turing é a representação geral (formal) de um procedimento mecânico (algorítmico). Seria este um passo inicial para se tentar resolver o décimo problema de Hilbert. Posteriormente (1976) Davis, Matijasevic e Robinson demonstraram que o décimo problema de Hilbert é insolúvel. Mas muito antes deste resultado ser consolidado, Turing já tinha detectado a impossibilidade de se encontrar um procedimento algorítmico que permitisse estabelecer, de forma geral, se um problema matemático pode ou não ser resolvido por via algorítmica. Turing raciocinava da seguínte maneira: se existe um procedimento algorítmico para resolver um determinado problema, o mesmo pode ser representado na forma de uma máquina de Turing, e assim sendo, esse procedimento será necessariamente finito, ou seja, estaremos diante de uma máquina de Turing cujo processamento de dados a um certo instante pára. Não parar significa estar diante de uma situação de *não-algoritmicidade* ou de *incomputabilidade*. Ora, se pudermos saber se existe ou não uma outra máquina de Turing que nos permita saber se uma máquina de Turing pára ou não, teremos encontrado o procedimento mecânico (algorítmico) cuja possibilidade de existência Hilbert questionava. Ora, Turing demonstrou que é matematicamente inconcebível a existência dessa segunda máquina de Turing que nos permitiria saber, mecanicamente, se outras máquinas de Turing param ou não, ou seja, se existem ou não procedimentos algorítmicos (mecânicos) para os problemas que elas tentam resolver. Esta demonstração de Turing ficou sendo conhecida como o *Problema da Parada* ou *Halting Problem*.

Por uma espécie de ironia, a máquina de Turing que foi concebida como o dispositivo teórico fundamental para a Ciência da Computação acaba se tornando também o instrumento através do qual pode ser mostrada sua *limitação* fundamental. Existe um problema que a Máquina de Turing não pode resolver: saber se ela pára ou não, reconhecer (mecanicamente) se estamos diante de um procedimento efetivo (com número finito de passos) ou não. Isto só pode ser realizado *intuitivamente*, é algo que requer uma inteligência que não pode ser expressa de forma algorítmica. Na realidade, as bases da própria Ciência da Computação são muito mais movediças do que se imagina: é somente pela intuição que podemos saber se um determinado programa vai parar ou não.

Mas não foram apenas os resultados de Turing que levaram, na década de 30, a supor a existência de uma diferenciação entre mentes e máquinas. É também nessa década que o matemático K. Gödel apresenta um de seus teoremas revolucionários: o Teorema da Incompletude. Este resultado segue-se de uma demonstração muito longa e técnica que certamente não podemos reproduzir aqui. Em linhas gerais, o Teorema da Incompletude (1931) estabelece que em qualquer sistema formal existem proposições que não são passíveis de prova ou refutação com base nos axiomas do sistema, e, como corolário, as contradições que existem no interior do sistema não podem ser suprimidas pelo próprio sistema. A verdade ou falsidade dos próprios axiomas que servem de ponto de partida para um sistema formal não podem ser decididas no interior do sistema; elas têm de ser decididas externamente a ele. Estabelece-se um abismo entre *verdade e demonstração*, um abismo que só poderia ser coberto pela inteligência humana ou pela*intuição matemática*. Isto significa dizer que o valor de verdade de algumas proposições (indecidíveis) não pode ser obtido através de nenhum procedimento mecânico (algorítmico), uma conclusão que converge em direção aos resultados que Turing tinha obtido ao formular o *Halting Problem*. Posteriormente foi demonstrada a equivalência do Halting Problem com o Décimo Problema de Hilbert bem como o fato de que a insolubilidade deste problema é conseqüência direta do Teorema da Incompletude de Gödel.

O próprio Gödel estava convencido de que as conseqüências de seu Teorema da Incompletude levavam a sérias limitações no que diz respeito à simulação mecânica das atividades mentais humanas pretendida pelos pesquisadores da Inteligência Artificial. Ele afirmou, num discurso proferido na Sociedade Americana de Matemática, em 1951, que

> "1- A mente humana é incapaz de formular (ou mecanizar) todas as intuições matemáticas, i.e., se consegue formular algumas delas, este mesmo fato conduz a um novo conhecimento intuitivo, e.g., a consistência do formalismo. Este fato poderia ser denominado de ""incompletabilidade da Matemática"". Por outro lado, tomando-se como base o que foi até então provado, é possível que exista (e possa até ser descoberta empiricamente) uma máquina de provar teoremas que de fato seja equivalente à intuição matemática, mas impossível de provar que o seja e nem *provar* que acarrete apenas teoremas *corretos* da teoria dos números.
>
> 2 - O segundo resultado é a seguinte disjunção: ou a mente humana consegue ultrapassar qualquer máquina (para ser mais preciso: ela pode decidir mais questões da teoria dos números do que qualquer máquina) ou então existem questões da teoria dos números indecidíveis para a mente humana"

A intuição matemática, que seria a base de todos os sistemas formais e da própria possibilidade de fundamentar a matemática, não poderia ser expressa algoritmicamente. Teríamos encontrado um critério de diferenciação entre mentes e máquinas, aquele critério que os filósofos da mente estariam buscando. Mas as afirmações de Gödel ficaram por muito tempo obscurecidas pelo sucesso e pelo entusiasmo que recobriam as realizações da Inteligência Artificial, esta nova disciplina que se consolidava cada vez mais por suas realizações - principalmente aquelas que se originavam das pesquisas realizadas no MIT. Os pesquisadores da Inteligência Artificial estavam convencidos de que haveria maneiras - ou pelo menos técnicas - para se contornar os problemas colocados por Turing e por Gödel. E, quem sabe, essa idéia de "intuição matemática" como algo exclusivamente humano não poderia passar, afinal de contas, de uma balela...

Em 1961 o filósofo inglês J.R. Lucas publica um artigo no *British Journal for the Philosophy of Science* chamando a atenção dos pesquisadores da Inteligência Artificial para o fato de que as questões envolvendo indecidibilidade e incompletude não poderiam ser contornadas tão facilmente. Como poderia uma máquina, construída com base em procedimentos algorítmicos demonstrar a existência de proposições cujo valor de verdade não poderia ser decidido algoritmicamente? Lucas (1961) argumentava que

"Os paradoxos da consciência surgem porque um ser consciente sabe o que ocorre com ele e não pode ser dividido em partes. Isto significa que um ser consciente pode lidar com questões gödelianas: ele pode conceber seu próprio desempenho e ao mesmo tempo algo externo a esse desempenho, sem que para isso tenha de se dividir em partes. Isto não poderia ocorrer no caso de uma máquina. Uma máquina pode ser concebida de maneira a relatar o que ela faz, mas isto não seria possível sem que precisássemos adicionar uma nova máquina à original. É inerente à nossa própria idéia de consciência a capacidade de auto-reflexão, ou seja a capacidade de relatar e criticar nossos próprios desempenhos sem que nenhuma parte suplementar seja necessária; a consciência é, neste sentido, completa e não possui nenhum calcanhar de Aquiles" (p.122).

O artigo de Lucas provocou um debate momentâneo; foi seguido de várias respostas no próprio *British Journal for the Philosophy* of **Science**, respostas que, se não foram conclusivas, serviram pelo menos para reativar um debate que merecia maior atenção. Os filósofos da mente passaram então a se agrupar em torno dos problemas suscitados pelo Teorema de Gödel, ora fazendo defesas da concepção mecânica da mente, ora descartando-a como algo impreciso e até mesmo místico. Filósofos como D. Dennett, J. Webb, J.J.C. Smart e D. Hofstadter relaçaram as idéias de Lucas que então encontrava poucos defensores.

Em 1989 o físico e matemático inglês R. Penrose publica o livro *The Emperor's New Mind* (A Mente Nova do Rei). Desde então este livro vem causando uma grande reviravolta na Filosofia da Mente, que passou a estreitar ainda mais suas relações com a filosofia da matemática e com a filosofia da ciência. Penrose refaz o argumento de Lucas passando por uma cuidadosa reconstrução dos resultados de Turing e de Gödel. O reconhecimento da existência da intuição matemática e de processos não-algoritmicos nas atividades mentais humanas faz com que Penrose se coloque um segundo tipo de questão: será que isto nos força a abandonar o modelo computacional de mente, isto é, a idéia de que processos mentais são análogos a uma máquina de Turing instanciada através do cérebro? Certamente podemos estabelecer semelhanças entre intuição matemática, processos conscientes e processos não-algorítmicos, mas será que não haveria, *na própria natureza* processos não-algorítmicos e assim sendo não poderíamos continuar sustentando uma possível identidade entre processos mentais e processos cerebrais? É preciso então investigar tudo aquilo que a Física pode nos dizer sobre a natureza e se nesta poderíamos de fato encontrar processos não-algorítmicos. O debate se amplia então: talvez a mecânica quântica pudesse nos fornecer esse ingrediente suplementar que caracteriza os processos não-algorítmicos típicos do cérebro humano. A idéia desenvolvida por alguns pesquisadores seria que fenômenos quânticos possuem algumas propriedades especiais, como o indeterminismo e a não-localidade - fenômenos que se supõe serem igualmente característicos da mente humana. Penrose parece abraçar esta perspectiva no seu segundo livro, *Shadows of the Mind*, publicado em 1994 e ainda não traduzido. Trata-se de uma perspectiva um pouco diferente daquela que finaliza *The Emperor's New Mind* que termina com uma resposta negativa à possibilidade de simulação mecânica plena das atividades mentais humanas e com uma defesa do platonismo e da existência da intuição matemática como algo caracteristicamente humano, não replicável através de máquinas.

Um aspecto que não parece ter sido explorado neste debate é uma possível relação entre limitações formais e limitações físicas para a capacidade de uma máquina replicar atividades mentais humanas.[1] Estipular este tipo de relação remete-nos diretamente para a chamada Teoria da Complexidade Computacional, uma teoria que lida com questões práticas relativas à velocidade e eficiência da realização de procedimentos algorítmicos na solução de problemas. A Teoria da Complexidade Computacional parte da idéia de que podemos dividir os problemas computacionais em duas classes, os chamados problemas tratáveis e os problemas *intratáveis*. Esta classificação baseia-se no número de passos e, conseqüentemente, no tempo requerido para se rodar um determinado algoritmo num computador. Problemas intratáveis são aqueles que comportam uma solução algorítmica, porém, o tempo envolvido para se executar este algoritmo torna-o ineficiente.

Certamente poderia ser argumentado que os problemas levantados pela Teoria da Complexidade, ou seja, a velocidade de computação depende do tipo de máquina na qual o algoritmo é rodado. Pode-se argumentar que avanços na arquitetura de hardware poderiam levar a uma diminuição no tempo requerido para se rodar um algoritmo e portanto que a eficiência para se resolver problemas intratáveis poderia gradualmente ser atingida. Assim concebido, este seria um problema *prático ou tecnológico* que não imporia nenhum tipo de limitação física *a priori* sobre o que um computador poderia fazer.

Contudo, trabalhos pioneiros na área de Teoria da Complexidade desenvolvidos por H.J. Bremermann (1977) mostram que há *limites físicos* na arquitetura de computadores de qualquer tipo e que estes limites físicos condicionam o tempo para computar problemas consumido por estas máquinas não importando o quanto seu *hardware* estiver aperfeiçoado. De acordo com Bremermann há dois limites físicos a serem considerados: *o tempo de propagação* e o *tempo de comutação*. Estes dois limites compõem o chamado *limite fundamental* para a velocidade dos computadores que não pode ser ultrapassado. Tal limite fundamental deriva-se da idéia de que a velocidade máxima de transmissão de sinal entre os componentes internos de um computador é limitada pela velocidade da luz, ou seja, 3.108 m/segundo. O tempo de propagação ou intervalo de transmissão de sinal entre os componentes internos do computador é determinado pela distância na qual se situam tais componentes e por sua vez limitado por aquilo que se chama *tempo de comutação*. O tempo de comutação é o intervalo para o processamento de informação através de dispositivos discretos. Mesmo que suponhamos a possibilidade tecnológica de construir um computador muito pequeno para minimizar e otimizar a trajetória de transmissão de sinal, tal limite fundamental não pode ser ultrapassado - sob pena de estarmos ignorando tudo o que a Física contemporânea nos diz.

A possibilidade tecnológica de construir uma máquina ideal em tamanho, cuja velocidade de transmissão de sinal se aproximasse da velocidade da luz não pode ser descartada como algo a ser obtido no futuro. Contudo, mesmo com um *hardware* assim poderoso, haveria problemas cuja complexidade pode ser dita *transcomputável*. Um problema transcomputável é um problema intratável cujo procedimento algorítmico de solução não pode ser obtido em tempo eficiente a despeito de qualquer aperfeiçoamento do *hardware* do computador utilizado.

O intervalo de tempo requerido para rodar alguns algoritmos transcomputáveis pode ser tão longo quanto a própria idade do universo. Este crescimento em complexidade temporal requerido para a realização de algoritmos transcomputáveis aplica-se igualmente ao cérebro humano se este for concebido como um sistema físico - e portanto submetido ao conceito de limite fundamental desenvolvido por Bremermann. Processamento de sinal neuronal não pode ocorrer a uma velocidade maior do que a da luz.

Ora, estes trabalhos pioneiros de Bremermann permitem-nos fazer uma especulação interessante que relaciona limitações formais e limitações físicas exibidas pelos computadores. Vimos que, do ponto de vista formal, não existe um procedimento mecânico, isto é, um algoritmo que nos permita saber, *a priori*, se um determinado problema matemático é discutível ou não. Não temos nenhum dispositivo formal que nos permita saber se um determinado programa computacional pára ou não, somente nossa *intuição* pode nos dizer isto. Mais ainda: é possível que muitos problemas que julgamos ser indecidíveis sejam na verdade transcomputáveis. Teoricamente, uma máquina de Turing pode ficar rodando por um tempo tão longo que supere qualquer expectativa concebível, e, mesmo assim, não temos condições de dizer se essa máquina vai parar algum dia. O que julgamos ser indiscutível, pode na verdade ser transcomputável. Contudo, nossa intuição matemática pode nos dizer (em muitos casos) instantaneamente, se um determinado enunciado matemático é verdadeiro ou não, e isto pode ocorrer no caso de um problema supostamente indiscutível mas na verdade transcomputável. Isto significa dizer que, se nossa mente funciona algoritmicamente, ela é capaz de processar informação com uma extraordinária rapidez -uma rapidez que superaria o limite fundamental proposto por Bremermann. A superação deste limite fundamental, ou seja, processar informação a uma velocidade maior que a da luz tem como conseqüência metafísica imediata a possibilidade de sustentar que pelo menos parte das atividades mentais humanas não teria as características atribuíveis a sistemas físicos. Mente e cérebro teriam de ser diferentes, caso contrário a intuição matemática não poderia existir. Estaríamos aqui diante de um forte argumento em favor da distinção entre mente e cérebro!

Os argumentos de Lucas e de Penrose ainda suscitam muita inquietação entre os filósofos da mente. No livro de D. Dennett,*Darwin's Dangerous Idea*, publicado em 1995, encontramos um capítulo inteiro dedicado à refutação dos pontos de vista de Penrose. O legado deste debate em torno das possibilidades da computação simbólica e da abordagem formal de processos cognitivos encaminha a Filosofia da Mente para mais uma questão fundamental que passa a ocupar um papel central no seu cenário: o estudo da natureza da *consciência*, esta última trincheira que ainda parece resistir à possibilidade de replicação mecânica. Nos últimos dois anos tem havido uma verdadeira proliferação de teorias sobre a natureza da consciência; os simpósios realizados em Tucson, no Arizona, em abril de 1994 e abril de 1996 constituem um marco decisivo desta nova tendência. O reconhecimento da irredutibilidade de fenômenos conscientes a qualquer tipo de base, seja neurofisiológica ou física, defendida por filósofos como D. Chalmers (1996) parece dominar esta nova etapa da história da Filosofia da Mente.

NOTAS

(1) Exploramos esta perspectiva no livro *Mentes e Máquinas: uma introdução à Ciência Cognittva* (no prelo).

BIBLIOGRAFIA

BREMERMANN, H.J. (1977) - "Transcomputability and Complexity" In Smith, M. & Duncan, R.(eds) - *The Encyclopaedia of Ignorance*, (London: Routledge and Keagan Paul) 193-202.

CHARLMERS, D. (1996) - *The Conscious Mind*- Oxford: Oxford University Press.

DAVIS, M. & Matijasevic, Y. & Robinson, J. (1976) - "Hilbert's Tenth Problem, Diophantine Equations: positive aspects of a negative solution" - *Proceedings of Symposia in Pure Mathematics*, 28, 323-378.

DENNETT, D. (1978) - "The abilities of men and machines" in *Brainstorms:Philosophical Essays on Mind and Psychology* Sussex: The Harvester Press 256-266.

DENNETT, D. (1991) - *Consciousness Explained* Boston: Little & Brown.

DENNETT, D. (1995) - *Darwin's dangerous idea* New York: Simon & Schuster..

GÖDEL, K. (1931/1962) - *On formally undecidable propositions of Principia Mathematica and related Systems* - New York: Basic Books.

HAMEROFF S. R. (1996) - *Toward a Science of Consciousness* Cambridge, MA, The MIT Press.

HOFSTADTER, D.R. (1979) - *Gödel, Escher and Bach: an eternal golden braid* Sussex: Harvester Press.

HOPCROFT,J. & Ullman, J. (1979) - *Introduction to Automata Theory, Languages and Computation* - (New York: Addison Wesley Publishing Company).

LUCAS, J.R. (1961) - "Minds, machines and Gödel" *Philosophy* 36, 120-124.

NAGEL, E. & Newman, J.R. (1958) - *Gödel's Proof.* London: Routledge and Keagan Paul.

NEUMANN, J.von (1951) - *Cerebral Mechanisms in Behcrvior*, (New York: Wiley).

NEUMANN, J. von (1966) - *Theory of Self-Reproducing Automata* - Edited and completed by Arthur W. Burks, (Urbana, Illinois: University of Illinois Press).

PENROSE, R. (1987) - "Minds, machines and mathematics" in Blakemore & Greenfield, (eds) - Mindwaves: thoughts on intelligence, identity and consciousness Oxford: Basil Blackwell, 259-276.

Penrose, R. (1989) - *The Emperor's New Mind: concerning computers, minds and the laws of Physics*. (Oxford: Oxford University Press).

PENROSE, R. (1994) - *Shadows of the Mind* Oxford: Oxford University Press.

SMART, J.J. (1961) - "Gödel's Theorem, Church's Theorem and Mechanism" *Synthese*, 13, 105-110.

TURING, A. M. (1936) - "On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem" - *Proceedings of the London Mathematical Society*, 42, 230-65.

TURING, A.M. (1939) - Systems of Logic Based on Ordinals. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 45,161-228.

WANG, H. (1974) - *From Mathematics to Philosophy* . New York: Humanities Press.

WEBB, J.C. (1980) - *Mechanism, Mentalism and Metamathematics* - London: D. Reidel Publishing Company.