



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Marília



**CULTURA  
ACADÊMICA**  
*Editora*

# Atividade cerebral em múltiplas escalas e a experiência consciente

Alfredo Pereira Júnior

**Como citar:** PEREIRA JR, A. Atividade cerebral em múltiplas escalas e a experiência consciente. *In:* FERREIRA, A. ; GONZALEZ, M. E. Q. ; COELHO, J. G (org). **Encontro com as Ciências Cognitivas. Vol.4.** Marília: Oficina Universitária; São Paulo: Cultura Acadêmica, 2004. p135-152. DOI: [http:// doi.org/10.36311/2004.85-7129520-9.p135-152](http://doi.org/10.36311/2004.85-7129520-9.p135-152).



All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial-ShareAlike 3.0 Unported.

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença Creative Commons Atribuição - Uso Não Comercial - Partilha nos Mesmos Termos 3.0 Não adaptada.

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported.

# Atividade cerebral em múltiplas escalas e a experiência consciente

*Alfredo Pereira Júnior<sup>1</sup>*

## Introdução

O progresso recente das neurociências tem mostrado que os processos cognitivos no cérebro ocorrem simultaneamente em múltiplas escalas espaciais e temporais, envolvendo diferentes tipos de sinais físico-químicos. Os neurobiólogos que receberam o Prêmio Nobel de Medicina em 2001 e 2004 (respectivamente, P. Greengard, A. Carlsson e E. Kandel; L. B. Buck e R. Axel) estudaram níveis moleculares e bioquímicos de articulação das funções cognitivas no cérebro. Essas pesquisas levaram a um melhor entendimento dos mecanismos sinápticos e dos processos intra-celulares de transdução de sinais que suportam a cognição.

As duas últimas décadas de pesquisa nas neurociências têm conduzido a uma mudança de paradigma, na qual os processos cognitivos são correlacionados com processos que ocorrem em nível microscópico, na escala temporal de milissegundos, rompendo assim com pressupostos ingênuos de que tais mecanismos ocorreriam apenas no mesmo nível de organização da experiência consciente humana (isto é, nível macroscópico e escala temporal acima de 100 ms).

Entretanto, as descobertas que conduziram os neurobiólogos ao Nobel não implicam a conclusão de que os mecanismos subjacentes aos processos cognitivos seriam apenas químicos e moleculares locais; pelo contrário, nos defrontamos com um panorama de complexidade, sugerindo que um entendimento adequado das funções cognitivas no cérebro deve cobrir simultaneamente diversos níveis de organização e suas interações.

Tomando como exemplo o sistema visual dos mamíferos, notamos que diversos tipos de processos, distribuídos em diferentes escalas espaciais e temporais, contribuem para que tenhamos experiências visuais. A retina possui células especializadas para detectar padrões de informação em populações de

---

<sup>1</sup> Professor Adjunto do Instituto de Biociências — UNESP/Botucatu. Endereço eletrônico: [api@ibb.unesp.br](mailto:api@ibb.unesp.br)

fótons, oriundos do ambiente, que a atingem. Tal informação é transduzida para padrões de atividade elétrica, que são conduzidos através do feixe de axônios daquelas células (isto é, pelo nervo óptico) até o tálamo. O tálamo está conectado com outras estruturas subcorticais, como a formação reticular, que liberam transmissores e moduladores capazes de controlar a atividade do sistema límbico e do neocórtex, estruturas cruciais para a geração dos conteúdos da consciência. Portanto, o tálamo e as outras estruturas subcorticais alimentam o sistema límbico e o neocórtex de uma variedade de padrões elétricos oriundos da interface com o ambiente, e de substâncias químicas reguladoras; aqueles sistemas, por sua vez, realizam diversos processos a partir desses sinais, vindo a construir o mundo da experiência consciente.

### **Correlatos macroscópicos**

O estudo científico da consciência humana se faz através da busca de correlações entre medições da atividade cerebral, medições comportamentais e relatos (verbais e não-verbais) das experiências subjetivas (vide FRITH et al., 1999; PEREIRA JR., 2003a). Os padrões de atividade cerebral que acompanham uma determinada atividade consciente são intitulados "correlatos neurais da consciência".

Com certeza, parte da operação do sistema límbico e neocórtex se manifesta na escala macroscópica, em termos de padrões de atividade eletromagnética, medidos pelo eletroencefalograma (EEG) e magnetoencefalograma (MEG), correspondendo a padrões de fluxo sanguíneo para suas diferentes partes, conforme medido pela ressonância magnética funcional (fMRI) e pela tomografia por emissão de pósitrons (PET).

Para muitos neurocientistas, tais padrões macroscópicos de atividade constituiriam os correlatos últimos da experiência consciente (vide, por exemplo, MCFADDEN, 2002). Contudo, essas correspondências entre atividade neuronal e atividade consciente são até o presente pouco precisas; elas abrangem apenas os diferentes *estados de consciência* (por exemplo, a distinção entre estado de vigília, sono profundo e sono REM), e os *tipos de cognição* (modalidades perceptuais, mecanismos de atenção, funções executivas e motoras), mas não dizem respeito aos *conteúdos da consciência* (isto é, não permitem inferir o que

se passa na consciência de uma pessoa através de dados sobre sua atividade cerebral na escala macroscópica).

Contrariamente à crença de que o cérebro constitua uma máquina elétrica, os correlatos elétricos da consciência são escassos. Quando se acompanha a trajetória dos sinais aferentes até o córtex sensorial, constata-se que, após ativar as áreas primárias, os sinais "desaparecem", ou seja, não é possível medir com o EEG ou o MEG atividades elétricas diretamente correlacionadas com o conteúdo consciente. Por outro lado, aumentos de amplitude dos potenciais de ação podem ocorrer durante a anestesia ou durante o sono "slow wave", quando a consciência se encontra ausente ou extremamente reduzida (vide discussão em SEWARDS; SEWARDS, 2001).

Com a utilização de aparelhos de produção de imagens da atividade cerebral (PET-scanners e fMRI) é possível obter boas correlações entre atividade cerebral e processos conscientes, inclusive nas áreas corticais associativas, porém existe uma controvérsia na literatura a respeito do tipo de processo fisiológico realmente medido por esses aparelhos. Em ambos os casos (considerando-se a modalidade "BOLD" do fMRI), esses aparelhos medem o fluxo de sangue arterial para as diversas regiões cerebrais, mas não se sabe se o aumento de consumo de glicose e oxigênio nessas áreas refletiria principalmente a atividade elétrica (geração de potenciais locais), ou a atividade metabólica no interior dos neurônios e glia em escalas espaciais microscópicas (por exemplo, atividades desencadeadas pelo íon de cálcio).

Uma característica central dos padrões de atividade macroscópica relacionados com os processos cognitivos conscientes é a existência de *coerência* (conceito que foi proposto como princípio de auto-organização cortical por SINGER, 1990). Isso significa que a distribuição espacial da excitação neuronal, ao longo do sistema nervoso central (SNC), apesar de ser extremamente dinâmica e variada ao longo do tempo, não tem caráter completamente redundante nem aleatório (para uma abordagem matemática, vide TONONI et al., 1998). A cooperação entre regiões relativamente distantes do SNC parece constituir requisito necessário, não só para a ocorrência de processos conscientes, como também para a capacidade mais geral de resolução de problemas com base no raciocínio inteligente.

Retornando ao exemplo do sistema visual, sabe-se que seu funcionamento no SNC dos primatas requer a cooperação de, ao menos, quatro subsistemas:

a) as áreas visuais primárias, que recebem os sinais elétricos oriundos do tálamo, levando à ativação de suas redes neuronais na forma de um "mapa", que reproduz as relações espaciais entre os itens informacionais tal como estes atingem a retina (ou seja, existe um isomorfismo espacial entre tal mapa — chamado de *mapa retinotópico* — e o campo visual da retina);

b) as áreas visuais secundárias, caracterizadas por neurônios especializados em detectar aspectos específicos, e relativamente simples, da informação oriunda dos sensores periféricos, como cor, direção de movimento, aspectos da forma, etc.;

c) as áreas associativas parietal e temporal: a primeira é especializada em identificar *onde* estão os objetos percebidos (e por isso é chamada de "where pathway"), e a segunda especializada em identificar formas complexas, como formas de rostos de pessoas (e por isso é chamada de "what pathway");

d) áreas específicas do córtex pré-frontal, como a área dorsolateral, que codifica conteúdos da memória de trabalho ("working memory"), e a área de controle do movimento ocular ("frontal eye field"), que está envolvida com o processo de atenção visual.

Diversos estudos recentes têm mostrado que a cognição visual envolve a cooperação desses quatro subsistemas (e ainda outras estruturas subcorticais, como o colículo superior); em termos de um processamento distribuído da informação, vindo a gerar uma experiência visual unitária, na qual os diversos aspectos processados em diferentes partes do SNC surgem integrados uns aos outros. Dois importantes indicadores do papel da coerência na produção da consciência estão bem estabelecidos no estudo de potenciais evocados humanos:

a) as oscilações sincrônicas nas faixas *gama* e *teta*, concomitantemente a processos conscientes. As oscilações dizem respeito a uma sincronização dos potenciais de ação de milhões ou bilhões de neurônios, podendo ou não gerar disparos axonais (quando não geram, são chamados de *potenciais subliminares*, uma terminologia traduzida do inglês "subthreshold"; vide Engel et al., 2001). Diversas confirmações da existência deste fenômeno no ser humano foram obtidas (vide RODRIGUEZ et al., 1999), mas a interpretação de seu significado está em aberto. Podemos notar que tais mecanismos que geram coerência seriam

importantes para a integração do conteúdo consciente, porém não constituem, eles mesmos, os veículos informacionais destes conteúdos (vide discussão em PEREIRA JR. e ROCHA, 2000);

b) os ERPs ("event related potentials"), que são variações (positivas ou negativas) bem definidas no EEG, em intervalos de tempo de algumas centenas de milissegundos (p.ex., 300 ou 700 ms) após a apresentação de um estímulo, que se supõe seja processado conscientemente. Acredita-se que os ERPs se correlacionem com o processamento cognitivo consciente, quando algum aspecto do estímulo gera surpresa ou estado de alerta (p.ex., uma frase contendo erro gramatical).

Para se entender melhor como o conteúdo consciente é processado pela atividade coletiva e coordenada dos neurônios, é necessário focar o que ocorre nas unidades participantes dessas redes, ou seja, é preciso considerar os processos informacionais nos neurônios individuais, revelando como e por que a cooperação referida acima seria necessária para que determinados eventos venham a ocorrer nos mesmos. Neste trabalho, argumentamos pela necessidade de focar tanto a informação molecular, presente nas proteínas que compõem as cadeias de sinais celulares, quanto, segundo nossa hipótese, a informação quântica carregada por íons biologicamente relevantes.

### **A informação molecular é relevante para o estudo da consciência?**

O trabalho de E. Kandel e colegas, entre outros estudos contemporâneos, tem mostrado que os mecanismos elétricos ainda estão longe de constituir o "fim da linha" do processamento de informação cerebral. Concomitantemente à produção dos potenciais de ação existem níveis de organização nos quais ocorrem outros tipos de processamento, que terminam por se entrelaçar de modo circular, envolvendo até a expressão de genes.

Thagard (2003), entre outros, argumenta que os sinais moleculares também devem ser considerados como correlatos dos processos cognitivos. Tal abordagem molecular não seria necessariamente reducionista, podendo ser entendida como parte de um modelo multi-dimensional da atividade cerebral. O papel de íons, moléculas e macromoléculas deve ser pensado em termos da dinâmica do cérebro como um todo, em suas interações com o corpo e com o ambiente (PEREIRA JR., 2001a).

Quando um sinal bioelétrico é enviado pelo axônio de um neurônio, e atinge seu terminal sináptico, faz com que íons de cálcio ali presentes rompam vesículas contendo substâncias transmissoras, as quais se projetam através da fenda sináptica e se ligam aos receptores de membrana do neurônio pós-sináptico. Neste momento recomeça um novo tipo de processamento de informação.

É preciso distinguir, no funcionamento sináptico e no metabolismo intra-neuronal, entre os mecanismos bioquímicos costumeiramente enfocados nos manuais de fisiologia e os propriamente informacionais, que dizem respeito à transmissão da informação biológica molecular e que são enfocados na literatura de genética molecular. Os primeiros geralmente dizem respeito às transações moleculares nas quais ocorrem reações químicas, ou seja, há troca ou compartilhamento de elétrons. Já nos processos moleculares propriamente informacionais, há um outro tipo de interação, baseada na configuração tridimensional das macromoléculas biológicas, e em campos eletrostáticos microscópicos, sendo expressa na metáfora da "chave e fechadura".

As macromoléculas possuem sítios ativos (i. e., contendo um micro-campo eletromagnético), que adotam uma determinada conformação tridimensional, possibilitando ou não "encaixes" com outros sítios de outras macromoléculas. Ocorrendo um encaixe, há uma interação dos campos eletromagnéticos, provocando alterações em uma das macromoléculas (chamamos de *efetores* as macromoléculas que causam a alteração, e de *receptores* aquelas que são afetadas). Tais alterações constituem a *transição alostérica* (vide MONOD; CHANGEUX; JACOB, 1963), a qual segue a seguinte regra: todos os sítios de uma proteína devem ficar em um mesmo estado, ou no estado *relaxado* ou no estado *tenso*. Portanto, basta que um efector altere um sítio para que os demais adotem o mesmo estado.

Os receptores localizados na membrana do neurônio pós-sináptico (em uma estrutura chamada de *densidade pós-sináptica*) são proteínas alostéricas (macromoléculas "grandes", com sítios ativos) que se ligam a efetores, os quais podem ser neurotransmissores (macromoléculas de tamanho médio) ou neuromoduladores (macromoléculas de tamanho pequeno, também chamadas de hormônios). Em uma explicação pouco rigorosa, os transmissores seriam os portadores da informação oriunda do neurônio pré-sináptico, enquanto os moduladores controlariam o ritmo da atividade sináptica.

A primeira classe de receptores de membrana é a dos receptores *ionotrópicos*, que controlam o fluxo de íons através da membrana, constituindo assim um mecanismo que irá determinar a atividade eletromagnética, ou seja, a produção dos potenciais de ação. Os íons mais utilizados para tal função são os cátions de sódio e potássio. Os transmissores mais comuns que agem sobre os receptores ionotrópicos são o glutamato e a acetilcolina.

Dentre os ionotrópicos, o receptor glutamatérgico NMDA (n-methyl-d-aspartato) se diferencia por contribuir menos para tal atividade eletromagnética e mais como porta de entrada dos cátions de cálcio, os quais, devido à complexidade de sua estrutura eletrônica (não encontrada nos demais íons acima citados), carregam sinais biológicos (vide GHOSS; GREENBERG, 1995; ALKON et al., 1998; LOEWENSTEIN, 1999; JAISWAL, 2001), controlando circuitos intra-celulares de processamento de informação chamados de "caminhos de transdução de sinais" (do inglês *signal transduction pathways*, ou STPs).

Outros receptores, chamados *metabotrópicos*, também têm sua ação dirigida para o controle de STPs intra-neuronais, se ligando a G-proteínas e ativando a produção de cAMP (adenosina monofosfórica cíclica), que é fonte de energia para os STPs. Eventualmente, receptores metabotrópicos também controlam o funcionamento de receptores ionotrópicos, por meio de STPs internos ao neurônio (vide ilustrações em PEREIRA JR.; LUNGARZO, 2005). Os neuromoduladores mais comuns que se ligam aos receptores metabotrópicos são a dopamina, serotonina e noradrenalina, mas alguns destes receptores também podem ser ativados pelos transmissores glutamato e acetilcolina.

Como se pode facilmente constatar, devido à existência de dezenas de diferentes tipos de transmissores, moduladores e receptores nas sinapses, o "código" informacional molecular que opera nesse nível do processamento é bem mais rico que o código utilizado na transmissão dos sinais elétricos entre os neurônios. Portanto, seria correto afirmar que as sinapses não "refletem" ou "representam", mas antes *interpretam* os sinais oriundos do neurônio pré-sináptico, incluindo os sinais provenientes do mundo externo ao sistema nervoso central. Desse modo, o estudo dos STPs se aproxima da semiótica.

O conhecimento sobre STPs é bastante recente, e ainda limitado a partes desses processos. Algumas simulações computacionais têm sido feitas, a partir do conhecimento parcial existente, para se tentar entender o que ocorre nesse



nível de organização (vide BHALLA e IYENGAR, 1999). Sabe-se que os sinais moleculares e iônicos que ativam STPs incluem, além dos íons de cálcio que entram pelos canais NMDA e pelos canais de cálcio regulados por voltagem, e dos receptores metabotrópicos associados a G-proteínas, também elementos compartilhados com os sistemas endócrino e imune, e fatores de crescimento celular (chamados de "fatores tróficos").

Há um envolvimento conjunto de neurotransmissores, receptores e moduladores no processo gerador da consciência e suas alterações. Por exemplo, o anestésico ketamina ministrado em dose sub-anestésica causa uma hipoatividade dos receptores NMDA no córtex sensorial, coexistindo com uma hiperatividade dos receptores AMPA. Os efeitos da ketamina também estão relacionados à diminuição da inibição GABAérgica no sistema límbico, levando ao aumento da disponibilidade da dopamina, que interferiria na atividade das áreas frontais e também no controle estriatal da liberação tálamo-cortical da acetilcolina, favorecendo a ocorrência de distorções perceptivas e alucinações (vide PEREIRA JR.; JOHNSON, 2003).

Diversos correlatos da atividade consciente têm sido encontrados em nível molecular, mais especificamente na atividade de determinadas enzimas que ocupam posições-chave em processos de transdução de sinais intra-neuronais. Diversas descobertas apontam para um papel da família de proteínas quinase no processamento cognitivo e emocional (vide discussão em PEREIRA JR.; LUNGARZO, 2005). Estima-se que existam cerca de 512 tipos de enzimas no "quinoma" (proteoma das quinases), que correspondem a 2% do proteoma humano. Considerando-se uma média de 15.000 proteínas por célula, teríamos 300 diferentes tipos de quinases operantes em cada neurônio. Já foram detectadas as seguintes correlações:

a) processos de aprendizagem e formação de memória declarativa (consciente) envolvem a proteína quinase A (PKA), a proteína quinase C (PKC), a proteína quinase calmodulina-dependente II (CaMKII), e a proteína quinase mitógeno-ativada (MAPKb);

b) processos psicóticos, envolvendo de suscetibilidade a alucinações, incluem a proteína quinase creatina (CK);

c) processos relacionados à dor envolvem a proteína quinase C (PKC);

d) processos relacionados à aprendizagem do medo (relativamente a determinados estímulos ou contextos) envolvem a proteína quinase A (PKA), proteína quinase calmodulina-dependente IV (CaMKIV) e LIMK-1;

e) processos relacionados ao estresse, com efeitos sobre a memória associativa, envolvem a quinase ciclina-dependente 5 (Cdk5).

Outros processos moleculares envolvidos na co-produção das funções cognitivas do cérebro e na interação cérebro-(restante do) corpo seriam:

a) componentes dos STPs atingem o retículo endoplasmático e núcleo dos neurônios, levando à ativação de genes que possivelmente reparam as proteínas necessárias para a manutenção dos próprios processos (em termos de sinapse, membrana e STPs) que conduziram à ativação desses genes (vide o modelo proposto por BAILEY; KANDEL, 1995, a partir de um trabalho pioneiro com o neurônio gigante de moluscos). Criam-se assim ciclos de interação proteínas-genes, que podem durar por muito tempo na vida de um organismo individual, e que seriam a base da memória de longo termo (p.ex., as lembranças que temos de fatos que ocorreram durante nossa infância);

b) em alguns STPs, ou mesmo em nível do retículo ou do núcleo, seriam ativados processos de produção dos neuropeptídeos, que atuam não só como moduladores da atividade das sinapses, como também atravessam a barreira cérebro-corpo, difundindo-se via circulação para outras partes do corpo (p.ex., já foram encontrados no sistema digestivo de roedores), possivelmente controlando um novo nível de processamento, responsável por reações psicossomáticas.

### **Íon de cálcio: um portador de informação física com papel central na cognição**

Um dos modelos existentes (vide ROCHA; PEREIRA JR.; COUTINHO, 2001; PEREIRA JR., 2001, 2003; ROCHA; MASSAD; PEREIRA JR, 2005) para se explicar a relação entre os padrões de atividade macroscópica (eletroquímica e sanguínea) e a atividade celular microscópica dos neurônios e células gliais se baseia na atividade fisiológica do íon de cálcio, o qual é considerado como um portador de informação (vide GHOSS; GREENBERG, 1995; ALKON et al., 1998; LOEWENSTEIN, 1999; JAISWAL, 2001).

Como se sabe, o íon de cálcio tem diversos papéis no funcionamento cerebral (vide CARAFOLI, 2002):

a) como carregador de sinais através da astroglia, compondo as chamadas “ondas de cálcio”, que dão suporte a várias funções;

b) como agente que controla a já mencionada abertura de vesículos contendo neurotransmissores, nos terminais axônicos, iniciando a transmissão sináptica;

c) como *primeiro mensageiro*, trazendo informação de fora para dentro do neurônio, quando entra através dos canais de cálcio — sejam os canais regulados por voltagem, sejam os canais controlados pelo receptor NMDA. Este último também é controlado por ligantes (os transmissores glutamato e glicina), tendo sido bastante estudado por seu possível envolvimento nos mecanismos de aprendizagem e memória;

d) como *segundo mensageiro* dentro do neurônio, controlando diversas funções, inclusive podendo interferir na regulação da expressão gênica (vide Alkon et al., 1998).

Na hipótese teórica desenvolvida por Rocha, Pereira e Coutinho (2001), e ampliada por Rocha, Massad e Pereira (2005), a função de primeiro mensageiro do íon de cálcio é relacionada com o processo de consciência, o que explicaria, entre outras coisas, a estreita relação entre a consciência, a aprendizagem e a formação de memórias. Para que o canal NMDA se abra, é preciso que o neurônio receba sinais excitatórios sucessivos, em um certo intervalo de tempo (na escala de milissegundos). Por essa razão, o canal NMDA é considerado um “detector de coincidência”, que seria de especial valor para os processos de aprendizagem associativa. Tais sinais seriam providos por meio da atividade cooperativa entre neurônios piramidais no córtex sensorial (onde tal receptor recebe conjuntamente sinais aferentes e reentrantes), o que demonstra a possível relação desse mecanismo com os padrões de coerência mencionados acima. Com tal hipótese, o papel das oscilações sincrônicas para a geração da consciência seria a coordenação de uma população de detectores de coincidência, ou seja, de receptores NMDA, para a geração de estados coerentes em populações de íons de cálcio espacialmente distribuídas.

Esta atividade coordenada resultaria na produção de estados coerentes em populações de  $Ca^{++}$ , fluindo de modo temporalmente sincronizado através dos canais NMDA nos neurônios sensoriais, interagindo com a calmodulina e sendo confinadas nas espículas (estruturas presentes nos dendritos de sinapses excitatórias no neocórtex; vide Sabatini et al., 2001; 2002). Deste modo,

entendemos que tornariam possível um processo cerebral de computação quântica. O mesmo raciocínio pode se aplicar ao canal NMDA no sistema hipocampal, operando na faixa *teta*. A computação quântica constituiria um novo nível de processamento de informação, que permitiria uma comunicação não-local entre neurônios de diversas partes do cérebro, dando suporte aos estados unitários de consciência. Ressalte-se que tal hipótese (por mim defendida, juntamente com os autores acima citados), de que os processos conscientes seriam suportados pela informação e computação quânticas, é controvertida, não sendo aceita pela maioria dos neurocientistas, que trabalham em paradigmas nos quais os mecanismos explicativos adotados se restringem à física clássica.

Os receptores metabotrópicos atuam em uma escala temporal mais dilatada que o NMDA (isto é, na escala de segundos), que seria inadequada para suportar os processos perceptivos. Contudo, sabemos que estes receptores estão envolvidos na produção do humor, assim como em estados afetivos e emocionais (sensações de dor e prazer, medo e ansiedade, tristeza ou felicidade, etc.). Nos sistemas cerebrais relacionados com a geração destes estados, como o giro do cíngulo, a amígdala, o hipotálamo e o colículo inferior, podemos conjecturar que os receptores metabotrópicos, conjuntamente com neuropeptídeos liberados a partir da interação com o corpo e o ambiente, ativariam STPs que modulam os processos geradores da consciência perceptiva, para gerar estados conscientes unitários nos quais os conteúdos afetivos e emocionais se ligam aos conteúdos perceptivos.

### **Uma hipótese de ocorrência de informação e computação quânticas no cérebro, dando suporte aos processos conscientes**

Para se discutir a hipótese levantada, é preciso entender as características do íon de cálcio, tanto no contexto da atividade biológica cerebral, quanto no contexto dos computadores quânticos artificiais. Esses dois contextos têm características diferentes, mas também têm características comuns, que possibilitam a utilização de determinadas técnicas de realização experimental na computação quântica (em particular, a espectroscopia Raman, que já é largamente utilizada no estudo da estrutura de proteínas) para estudos 'in vivo' da dinâmica informacional do íon de cálcio no cérebro.

Constitui uma característica importante deste íon (mas não dos demais íons com atividade biológica, os quais não têm uma estrutura eletrônica suficientemente complexa), a capacidade de participar de processos de transmissão de informação molecular, atuando como um intermediário entre proteínas, “como se fosse um hormônio” (na expressão de LOEWENSTEIN, 1999). Uma de suas vantagens é a capacidade de atravessar poros nanométricos e percorrer distâncias relativamente grandes com rapidez, o que não é possível para as proteínas. Além disso, ele é suficientemente pequeno para participar de processos de computação quântica, o que explica, ao lado de sua relativa complexidade, a escolha feita pelos engenheiros que planejaram o computador quântico (mais especificamente, o modelo experimental de *armadilha de íons*; vide CIRAC; ZOLLER, 2000; NIELSEN; CHUANG, 2000).

A informação portada pelo íon de cálcio diz respeito a seus estados vibratórios e respectivos arranjos eletrônicos, tendo sido elucidada em estudos recentes de computação quântica. Os computadores de armadilha de íons têm sido ampliados para trabalhar com populações de íons (KIELPINSKI et al., 2002), o que indica a possibilidade de uma aproximação teórica com a dinâmica de populações de íons no cérebro. Mais importante ainda, em um sistema dinâmico com característica de auto-similaridade, como se acredita ser o cérebro, durante os estados coerentes típicos do processamento consciente, podemos levantar a possibilidade de que a informação codificada na escala microscópica reflita os estados globais do sistema, ou seja, os estados globais do corpo e suas relações com o ambiente.

Cada íon de cálcio, presente, entre outros lugares, nas terminações neuronais, na astroglia e nas espículas, pode assumir diversos estados informacionais, não havendo qualquer razão ‘a priori’ para se supor que esteja restrito a estados binários. Nos computadores artificiais, planejados para realizar operações binárias, alguns destes estados são “proibidos”. Experimentalmente, a indução de transições entre os estados permitidos, assim como a leitura dos mesmos, se faz através de *lasers* estruturados (utilizando-se por exemplo as técnicas de *Oscilações Rabi* ou *Espectroscopia Raman*; vide HUGHES et al., 1997; SMITH; DENT, 2005). O laser na faixa de frequência ultravioleta entra em ressonância com o padrão vibratório externo do íon de cálcio, causando uma transição entre estados internos.

Tal padrão vibratório é chamado de *fonônico*, tendo em vista que o fônon é o *quantum* de energia envolvido na agitação térmica, vibração molecular e formação de ondas sonoras. O estudo pioneiro do papel dos fônons em sistemas biológicos foi desenvolvido por Herbert Fröhlich, enfocando sistemas vibracionais presentes em macromoléculas e estruturas biológicas (vide Pokorny e Wu, 1998). A aplicação desse conceito para o íon de cálcio ocorreu mais recentemente, no contexto da realização experimental de computadores quânticos (vide HUGHES et al., 1997; NIELSEN; CHUANG, 2000).

Um sistema (como o íon de cálcio) no qual a atividade vibracional externa está acoplada com estados informacionais internos (por exemplo, com duas possíveis distribuições de energia na estrutura eletrônica) é chamado de *sistema de dois níveis* (que abreviarei por TLS, do inglês “two level systems” — vide Nagerl et al., 2000; o hamiltoniano que relaciona o estado vibracional externo com o estado informacional interno também é descrito em Nielsen e Chuang, 2000, p. 317-19). Para que a comunicação e computação quânticas ocorram, é preciso que haja um sistema maior composto por dois ou mais TLS, no qual se forme um *emaranhado* (do inglês “*entanglement*”) de estados dos TLS (para uma discussão filosófica, vide PEREIRA JR., 2001, 2003).

No cérebro, mecanismos macroscópicos, como os circuitos recorrentes de excitação elétrica, as oscilações sincrônicas, os canais de membrana e os compartimentos intra-neuronais (como as espículas), controlam a atividade de populações do íon de cálcio. Seu estado informacional seria espontaneamente determinado pela interação com proteínas como a S-100 (presente na astrogliã) e a calmodulina (abundantemente presente na densidade pós-sináptica). Quando os mecanismos macroscópicos acima citados induzem a formação de um emaranhado quântico em uma população, a informação molecular previamente transmitida pela ligação com proteínas seria integrada, produzindo-se um momento de consciência (p. ex., com duração de 300 ms). A geração de uma seqüência de momentos de consciência se encadearia de modo quase contínuo, formando o fluxo de eventos que caracteriza a experiência consciente.

A interação entre processos macroscópicos e quânticos está prevista na constituição dos computadores quânticos artificiais, nos quais uma interação dos estados microscópicos com o nível macroscópico é necessária não só para introduzir e resgatar informações dos processos quânticos, mas também como condição prévia para produzir um estado global coerente em uma população de

TLS. No cérebro, tal interação é necessária não só para gerar os estados coerentes nos quais os íons de cálcio formam um emaranhado quântico, como também para se fazer uma leitura dos resultados do processamento quântico, que corresponderia ao momento em que os íons ligados à CaM interagem com a CaMKII. Desse modo, o processo consciente não seria epifenomenal, mas poderia influenciar o comportamento, a partir dos efeitos produzidos pela CaMKII nos processos intra-neuronais e também nos potenciais de membrana (p.ex., através do controle da CaMKII sobre o receptor AMPA).

Para se testar a hipótese de trabalho acima levantada, poder-se-ia utilizar a espectroscopia Raman 'in vivo' (vide HANLON et al., 2000), um procedimento não invasivo, para interferir com a informação quântica em uma população de íons de cálcio em uma determinada região cerebral, procurando-se não afetar outros tipos de atividade (como a amplitude ou a frequência dos potenciais de ação, ou a taxa de atividade metabólica). A previsão é que alterando-se o padrão de informação quântica em uma população de íons de cálcio, e apenas isso, haveria um efeito nos conteúdos da consciência. Não ocorrendo qualquer efeito, a hipótese seria rejeitada.

### **Comentários finais**

Os modelos reducionistas, que pretendem explicar a atividade do cérebro a partir de um nível privilegiado de descrição, têm encontrado dificuldades frente às evidências de que o cérebro simultaneamente atua em diferentes níveis organizacionais, e em interação com o corpo e com o ambiente. Um novo tipo de explicação da atividade cerebral se faz necessário, enfatizando a existência de complexas interações entre os diferentes níveis de processamento, e com fatores somáticos e ambientais. Possivelmente tais interações apresentam características observadas em outros sistemas dinâmicos, como a existência de valores críticos para a interferência da atividade de um nível de organização sobre outros.

Desse modo, os processos mentais correspondem à auto-organização do sistema cerebral, em suas interações com o corpo e o ambiente, sendo que, no tocante ao cérebro, os diversos níveis de organização — e respectivos modos de processamento da informação — seriam relevantes para se entender os diversos aspectos da cognição. A experiência consciente se correlaciona com atividades

presentes em todas as escalas de atividade cerebral. Considerando que, a partir da formação de estados coerentes globais, tais atividades venham a apresentar a característica de auto-similaridade, faz sentido a hipótese apresentada, de que os conteúdos da experiência consciente sejam suportados pela informação e computação quânticas em populações de íons.

Como o íon de cálcio tem um papel central na fisiologia do sistema nervoso central, e como (diferentemente dos demais íons com atividade biológica) também tem capacidade de codificar informação por meio da flexibilidade de seu arranjo eletrônico, as populações deste íon envolvidas em atividades coerentes poderiam ser o suporte físico dos conteúdos da consciência. Tal hipótese, por mim levantada, deverá ser testada, de modo não-invasivo, por meio de emissões estruturadas de laser 'in vivo', gerando interferências com os padrões fonônicos do íon de cálcio (e respectivas transições entre estados informacionais) para provocar efeitos conscientes, sem alterar as demais atividades cerebrais. Só a partir desse teste encontraremos (ou não) o procurado apoio experimental para aquilo que a hipótese presume, ou seja, a existência de computação quântica no cérebro.

Um dos principais campos para a interpretação e aplicação desses resultados é a psiquiatria. As relações entre neurociência e psiquiatria têm se estreitado ultimamente, e constituem objeto de interesse para ambas as partes. Um melhor entendimento da multi-dimensionalidade da consciência humana, incluindo não só a complexidade neurobiológica como também as atividades humanas no contexto social, é de grande importância para o entendimento do processo de saúde/doença mental. Neste ensaio, enfoquei principalmente a complexidade das escalas espaciais e temporais nas quais se desenrola a atividade cerebral, ficando em segundo plano a questão da complexidade temporal da experiência humana, que foi enfocada em um outro trabalho (PEREIRA JR.; GUERRINI, 2004).

**Agradecimentos:** Ao CNPq, por concessão de Bolsa de Produtividade, em suporte a esta pesquisa; ao parecerista anônimo e aos editores do livro, pelas correções e importantes sugestões apresentadas.



## Referências

- ALKON, D.L., et al. Time domains of neuronal Ca<sup>2+</sup> signaling and associative memory: steps through a calyculin, ryanodine receptor, K<sup>+</sup> channel cascade. *Trends in Neuroscience*. V.21, n.12, p.529-537, 1998.
- BAILEY, C.H.; KANDEL, E.R. Molecular and structural mechanisms underlying long-term memory. In: GAZZANIGA, M. (Ed.) *The cognitive neurosciences*. Cambridge: MIT Press, 1995.
- BHALLA, U.S.; IYENGAR, R. Emergent properties of networks of biological signaling pathways. *Science*, v. 283, p.381-387, 1999.
- CARAFOLI, E. Calcium signaling: a tale for all seasons. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, v.99, n.3, p.1115-1122, 2002.
- CIRAC, J.I.; ZOLLER, P. A scalable quantum computer with ions in an array of microtraps. *Nature*, v.404, p.579-581, 2000.
- ENGEL, A.K.; FRIES, P.; SINGER, W. Dynamic predictions: oscillations and synchrony in top-down processing. *Nature Reviews Neuroscience*, v. 2, p.704-716, 2001.
- FRITH, C.; PERRY, R.; LUMER, E. The neural correlates of conscious experience: an experimental framework. *Trends in Cognitive Sciences*, v.3, n.3, p.105-114, 1999.
- GHOSS, A.; GREENBERG, M. E. Calcium signaling in neurons: molecular mechanism and cellular consequences. *Science*, v.268, p.239-247, 1995.
- HANLON, E.B. et al. Prospects for in vivo raman spectroscopy. *Phys Med Biol.*, v.45, n.2, p.1-59, 2000.
- HUGHES, R. J. et al. The los alamos trapped ion quantum experiment. 1997. Publicado eletronicamente em *quant-ph/9708050* 27 Aug 1997; republicado em *Fortschritte der Physik* v.46, p.329-361, 1998. Disponível em: <[http://kh.bu.edu/qcl/pdf/hughes\\_r19977f150e1f.pdf](http://kh.bu.edu/qcl/pdf/hughes_r19977f150e1f.pdf)>
- JAISWAL, J.K. Calcium: how and why? *J. Biosci.*, v. 26, n.3, p.357-363, 2001.
- KIELPINSKI, D., MONROE, C.; WINELAND, D.J. Architecture for a large-scale ion-trap quantum computer. *Nature*, v.417, p.709-711, 2002.
- LOEWENSTEIN, W.R. *The touchstone of life: molecular information, cell communication and the foundations of life*. New York: Oxford University Press, 1999.

- MCFADDEN, J. Synchronous firing and its influence on the brain's electromagnetic field: evidence for an electromagnetic field theory of consciousness. *Journal of Consciousness Studies*, v.9, n.4, p. 23-50, 2002.
- MONOD, J.; CHANGEUX, J.P.; JACOB, F. Allosteric proteins and cellular control systems. *J. Mol. Biol.*, v.6, p.306-329, 1963.
- NAGERL H.C., et al. Cavity QED-Experiments: atoms in cavities and trapped ions. In: BOUWMEESTER D.; EKERT, A.; ZEILINGER, A. (Ed.) *The physics of quantum information*. Berlim:Springer-Verlag, 2000.
- NIELSEN, M. A.; CHUANG, I.L. *Quantum computation and quantum information*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- PEREIRA JR., A.; ROCHA, A.F. Temporal aspects of neuronal binding. In BUCCHERI, R. (Org.): *Studies on the structure of time: from physics to psychopathology*. New York: Kluwer Academic: Plenum Publishers, 2000. p.97-106.
- \_\_\_\_\_. Coexisting spatial and temporal scales in neuroscience. *Minds and Machines*, v.11, n.4, p. 457-465, 2001a. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/media/MH9XDNYTQP3WUERGXLVD/Contributions/Q/4/2/1/Q42185815996N557.pdf>>
- \_\_\_\_\_. The quantum mind/classical brain problem (versão original). *Informação e Cognição*, v.3, 2001b. Disponível em: <<http://www.marilia.unesp.br/atividades/extensao/revista/v3/artigo3.html>>
- \_\_\_\_\_. Uma abordagem naturalista da consciência humana. *Trans/Form/Ação* v.26, n.2, p.109-141, 2003a.
- \_\_\_\_\_. The quantum mind/classical brain problem (versão corrigida). *Neuroquantology*, v.1, p.94-118, 2003b. Disponível em: <<http://www.neuroquantology.com/2003/01/pp94.118.htm>>
- \_\_\_\_\_.; GUERRINI, I. A. Unidade e multiplicidade do tempo: uma abordagem transdisciplinar. *Interface*, v.8, n.15, p.247-256, 2004.
- \_\_\_\_\_.; JOHNSON, G. Toward an explanation of the genesis of ketamine-induced perceptual distortions and hallucinations. *Brain and Mind*, v.4, n.4, p. 307-326, 2003.
- \_\_\_\_\_.; LUNGARZO, C. A framework for the computational approach to cellular metabolism supporting neuronal activity. *International Journal of Computational Cognition*, v.3, n.3, 2005. Disponível em: <<http://www.yangsky.com/ijcc33b.pdf>>

POKORNY, J.; WU, T-M. *Biophysical aspects of coherence and biological order*. Berlin: Springer, 1998.

ROCHA, A.F.; PEREIRA JR, A.; COUTINHO, F.A. NMDA channel and consciousness: from signal coincidence detection to quantum computing. *Progress In Neurobiology*, v.6, n.64, p.555-573, 2001.

ROCHA, A.F.; MASSAD, E.; PEREIRA JR, A. *The brain: from Fuzzy Grammar to Quantum Computing*. Berlin: Springer, 2005.

RODRIGUEZ, E. et al. Perception's shadow: long-distance synchronization of human brain activity. *Nature*, v.397, p.430-433, 1999.

SABATINI, B. L.; MARAVALLI, M.; SVOBODA, K.  $Ca^{2+}$  signaling in dendritic spines. *Current Opinion in Neurobiology*, v.11, n.3, p.349-356, 2001.

SABATINI, B. L.; OERTNER T.G.; SVOBODA K. The life cycle of  $Ca^{2+}$  ions in dendritic spines. *Neuron*, v.33, n.3, p. 439-452, 2002.

SEWARDS, T.V.; SEWARDS, M.A. On the correlation between synchronized oscillatory activities and consciousness. *Consciousness and Cognition*, v.10, p. 485-495, 2001.

SINGER, W. Search for coherence: a basic principle of cortical self-organization. *Concepts in Neuroscience*, v.1, n.1, p.1-26, 1990.

SMITH, E.; DENT, G. *Modern raman spectroscopy: a practical approach*. J. Wiley and Sons, 2005.

THAGARD, P. How molecules matter to mental computation. *Philosophy of Science*, v.69, p.429-446, 2002.

TONONI, G.; EDELMAN, G.M.; SPORNS, O. Complexity and coherency: integrating information in the brain. *Trends in cognitive science*, v.12, n.2, p.474-484, 1998.