

Os seres vivos são capazes de gerar campos magnéticos. Embora muito fracos, esses campos já podem ser detectados por equipamentos sofisticados, o que abre um novo campo de pesquisa. Estudos recentes sobre esse fenômeno – o biomagnetismo – revelam que a detecção e a análise dos campos gerados em órgãos como cérebro, coração, pulmões, fígado e outros podem facilitar o diagnóstico de doenças e auxiliar cirurgias e tratamentos, entre inúmeras outras aplicações. Para que isso se torne uma realidade, porém, algumas dificuldades ainda precisam ser superadas.

Dráulio Barros de Araújo
Antonio Adilton-Oliveira Carneiro
Eder Rezende Moraes
Oswaldo Baffa

*Departamento de Física
e Matemática,
Universidade de São Paulo*

BIOOMA

Nova interface e

No século 18, o médico vienense Franz Anton Mesmer (1734-1815)

lançou a teoria de que todos os seres vivos seriam constituídos por um 'fluido magnético', o que permitia que fossem influenciados por campos magnéticos. Com base nessas idéias, ele acreditou que poderia 'curar' doenças através do contato de partes do corpo com ímãs e outros objetos imantados, e daí passou à prática. Não demorou muito para que seus procedimentos fossem desmascarados como puro charlatanismo.

O que Mesmer não poderia saber, em sua época, é que de fato os seres vivos geram campos magnéticos. Hoje, as relações entre o magnetismo e os organismos – não só o homem, mas também animais e plantas – compõem um campo de pesquisa promissor, dividido em duas áreas básicas: magneto-biologia e biomagnetismo.

A primeira trata dos efeitos produzidos por esses campos nos organismos, o que inclui desde a capacidade de orientação de alguns animais (como as aves, em seus vôos migratórios) até os controversos prejuízos à saúde que decorreriam da exposição a ondas eletromagnéticas (como as geradas por telefones celulares ou por redes de eletricidade). Já o biomagnetismo trata da medição dos campos magnéticos gerados por seres vivos, para obter informações que ajudem a entender sistemas biofísicos, a realizar diagnósticos clínicos e a criar novas terapias. Por exigir instrumental altamente sensível, surgido só nos anos 70, o biomagnetismo é uma área

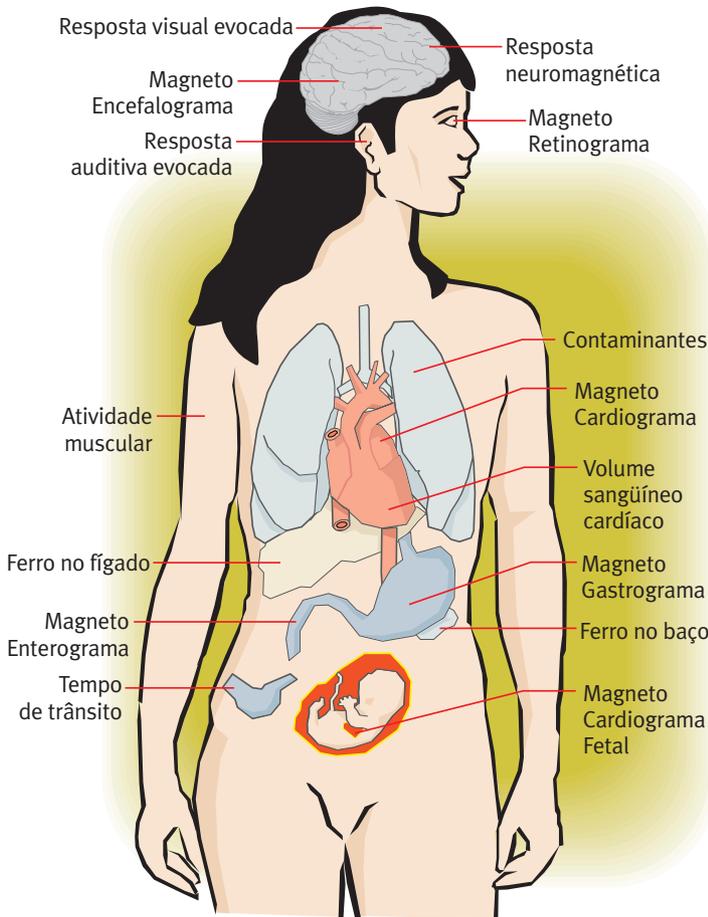


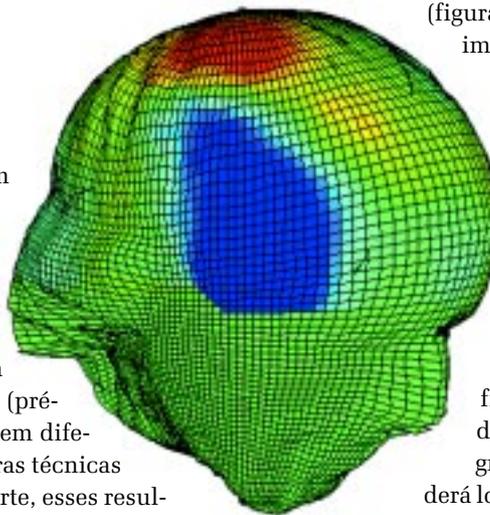
Figura 2. Principais fontes de campos biomagnéticos localizados no corpo humano

néticos já foram medidos em seres humanos (figura 2). Tais campos são pesquisados por cerca de 50 grupos, em todo o mundo, sendo quatro no Brasil: na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na Universidade de São Paulo (Ribeirão Preto), na Universidade Estadual Paulista (Botucatu) e na Universidade Federal do Paraná.

Figura 3. O mapeamento de fontes de campos magnéticos evocados no córtex cerebral permitem, de acordo com sua intensidade (o azul mais forte indica o máximo campo negativo, que entra na cabeça, e o vermelho mais forte indica o máximo campo positivo, que sai), localizar as áreas ativadas

AS POSSÍVEIS APLICAÇÕES

As pesquisas nessa área têm explorado diversos métodos – não-invasivos – de medição dos campos biomagnéticos, que podem vir a ser usados para diagnósticos mais precisos, auxílio a tratamentos e identificação (pré-cirúrgica) de áreas afetadas em diferentes órgãos do corpo. Outras técnicas já conseguem, em grande parte, esses resultados, mas são em geral invasivas. Assim, o biomagnetismo poderá ser uma alternativa prática, rápida e segura – e, em alguns casos, menos custosa.



As áreas de pesquisa nas quais é maior o potencial para futuras aplicações são o neuromagnetismo, o cardiomagnetismo, o gastromagnetismo, o pneumomagnetismo e a bio-susceptibilidade magnética.

No neuromagnetismo, os dados obtidos sobre os campos magnéticos cerebrais, com os métodos já disponíveis, permitem várias aplicações, como na pesquisa sobre o funcionamento do órgão. Os campos podem ajudar a ‘mapear’ o processamento (feito através de impulsos elétricos) das informações no cérebro. Saber onde e quando certas informações são processadas é importante para a neurociência, e os dados também podem ajudar a entender certas patologias e a formular novas terapias.

O alto custo ainda limita o uso clínico da magnetoencefalografia (MEG) – o registro dos campos magnéticos cerebrais. No entanto, a rapidez na obtenção de dados, a não-invasividade e a excelente resolução temporal a tornam uma técnica de grande potencial. Sua aplicação é crescente na determinação pré-cirúrgica de áreas afetadas do cérebro, no mapeamento de regiões de atividade cerebral e na localização de atividade ligada à epilepsia. Vários grupos pesquisam métodos mais acessíveis para localizar regiões cerebrais através de campos magnéticos e caracterizar suas anormalidades, em geral ligadas a doenças.

O estudo das atividades magnéticas cerebrais é realizado basicamente de duas maneiras: pelo registro de sinais espontâneos do cérebro (como a onda alfa) e pelo registro de respostas a estímulos externos (campos evocados). Em ambas, o registro precisa ser feito em diversos pontos para que a fonte seja localizada. Os estímulos externos, porém, podem ser alterados de modo controlado, obtendo-se a informação de interesse por um processo de média dos sinais magnéticos vindos de regiões ativas (figura 3). Recentemente, esse tipo de

imagem tem sido combinada às obtidas por ressonância magnética nuclear, o que gera as chamadas ‘imagens multimodais’.

Dentro das aplicações do biomagnetismo, o coração é o segundo órgão mais importante, em função da grande incidência das doenças cardíacas e das chances de intervenção. A magnetocardiografia (MCG) tem o mesmo potencial de diagnóstico da eletrocardiografia (ECG) e acredita-se que poderá localizar fontes de atividade elétrica

anormal no coração sem a fixação de dispositivos na pele do paciente ou no órgão (ver ‘O sinal magnético do coração’, nesta edição, na página 30).

CÉREBRO POR RONALD WIKALI (UNIVERSIDADE DE WISCONSIN-MADISON)

A localização dessas fontes de atividade anormal ainda depende da resolução do chamado 'problema inverso' (encontrar as fontes de campos magnéticos a partir da medição dos mesmos). O avanço das pesquisas nesse sentido capacitará a MCG a definir áreas danificadas com grande precisão, orientando a cirurgia. Hoje, isso é feito de modo extremamente invasivo: um cateter introduzido no coração produz descargas elétricas em vários pontos do músculo cardíaco, até que a área doente seja localizada. Quando se tornar operacional, a MCG facilitará a localização das áreas afetadas, reduzirá o trauma e apressará a recuperação dos pacientes.

O biomagnetismo possibilita ainda estudar o batimento cardíaco do feto, através da magnetocardiografia fetal (MCGf). O bem-estar do feto está diretamente associado à sua atividade cardíaca, o que torna importante acompanhá-la durante a gravidez. O batimento cardíaco fetal pode ser registrado por eletrodos fixados no abdômen da mãe, por ultra-som e atualmente por biogradiômetros (dispositivos que detectam de modo seletivo os campos magnéticos a que são expostos).

Em geral, os sinais obtidos por eletrodos sofrem muita interferência do coração da mãe, em especial no fim da gestação, quando a pele do feto é envolvida por uma camada de cera, a 'vernix caseosa', que atua como isolante elétrico. O ultra-som tem boa relação sinal-ruído, mas não fornece a taxa de batimento cardíaco instantânea, nem a forma da onda de atividade elétrica do coração. Já a magnetocardiografia fetal obtém boa relação sinal-ruído durante toda a gestação e ótima definição da forma de onda, o que a torna excelente para acompanhar a atividade cardíaca de fetos.

CONTROLE DO ACÚMULO DE FERRO

Órgãos que armazenam partículas magnéticas, como os pulmões e o fígado, são também objeto de estudos biomagnéticos. Em geral, pessoas expostas a ambientes insalubres por muito tempo acumulam partículas ferromagnéticas nos pulmões, o que pode afetar a respiração. No fígado, o depósito de partículas paramagnéticas (na proteína ferritina) ocorre, por exemplo, em pessoas com talassemia (distúrbio

na síntese das hemoglobinas), que precisam de frequentes transfusões de sangue.

Determinar a concentração dessas partículas é, portanto, indispensável. Várias técnicas conseguem isso, mas a grande maioria exige exames invasivos, o que não ocorre com medidas biomagnéticas. A concentração de partículas ferromagnéticas nos pulmões (pneumomagnetismo) é obtida medindo-se a magnetização remanente (a que resta após a aplicação do campo). No caso do acúmulo de partículas paramagnéticas em outros órgãos (como o fígado) ou tecidos, mede-se a susceptibilidade magnética (figura 4). Nessa técnica (biosusceptometria), a medição é feita durante a aplicação de um campo pouco intenso. O campo aplicado é alterado pelo magnetismo induzido nas partículas paramagnéticas pre-

sententes no órgão avaliado, e o campo resultante é proporcional à concentração das partículas.

A medida do campo magnético gerado pela atividade elétrica do estômago é chamado de magnetogastrografia. Essa técnica tem sido desenvolvida para avaliar a frequência dessa atividade, sua velocidade de propagação e seu comportamento sob diferentes condições alimentares (e no caso de ingestão de drogas). As contrações do estômago também podem ser estudadas através da susceptibilidade magnética e da magnetização remanente. Aproximando-se um biosusceptômetro do órgão, as ondas de contração são registradas em um gráfico (figura 5). Tais ondas provocam a mistura do alimento com o suco gástrico e a empurra em direção ao intestino.

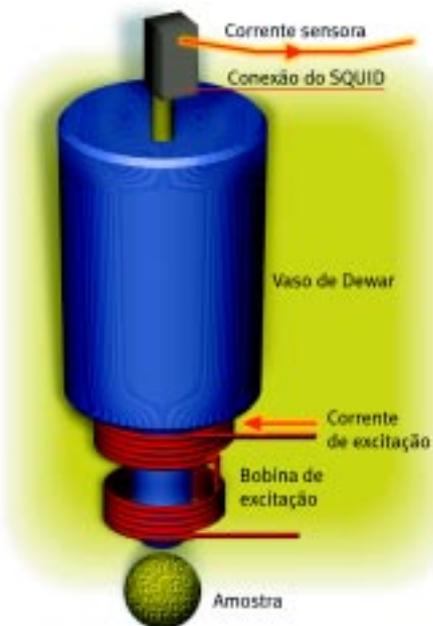


Figura 4. Equipamento para medir a susceptibilidade magnética de grandes amostras: um campo magnético (gerado pela corrente de excitação) é aplicado para orientar os dipolos magnéticos da amostra, o que altera o campo magnético original. O campo resultante é medido através da corrente sensora que ele gera no SQUID

Figura 5. Sinal de contração do estômago, medido através da técnica susceptométrica, mostrando a frequência típica de contração de três ciclos por minuto

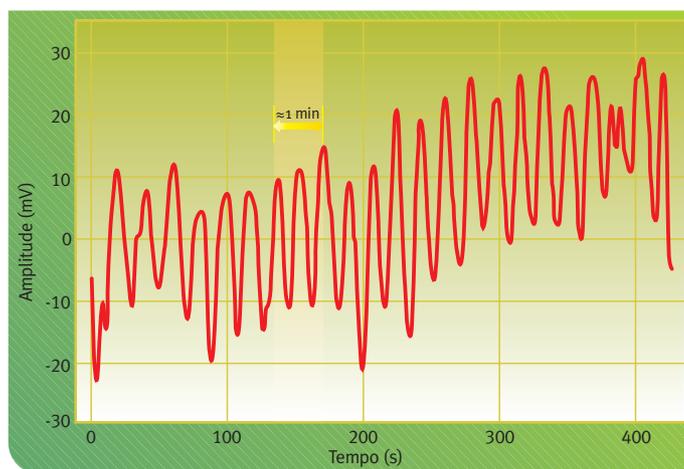


Figura 6. Sistema para medição de campo magnético remanente com magnetômetros fluxgates: um par de bobinas aplica um pulso de campo magnético na amostra, através da descarga de um banco de capacitores, e a magnetização remanente é medida por dois gradiômetros que utilizam magnetômetros fluxgates

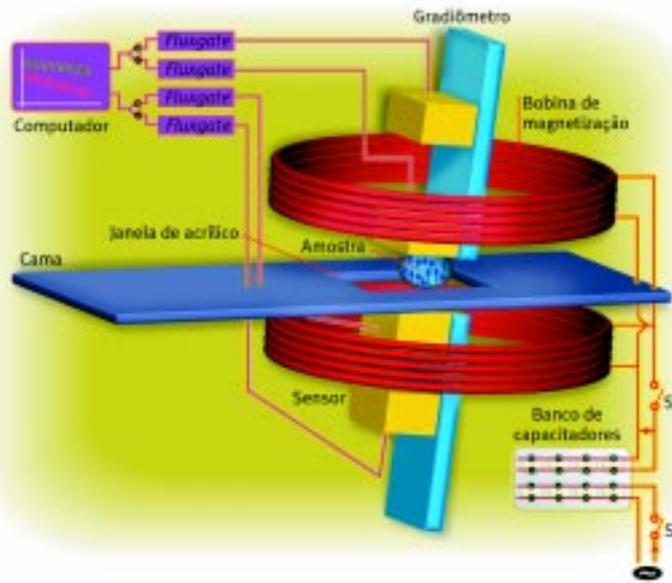
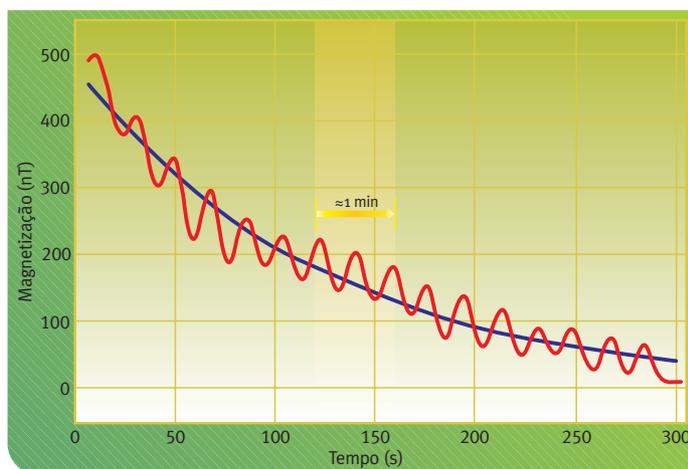


Figura 7. Medida de campo magnético remanente de partículas magnetizadas dentro do estômago de um voluntário, observando-se tanto o decaimento da magnetização remanente (em azul) quanto as ondas de contração do órgão (em vermelho)

O mesmo processo pode ser estudado medindo-se, com magnetômetros (figura 6), o decaimento da magnetização remanente. Um alimento-teste, contendo magnetita, é ingerido e magnetizado em uma certa direção por bobinas, mas a magnetização induzida perde intensidade com o tempo (figura 7). Esse decaimento está ligado ao movimento que o estômago impõe sobre o bolo alimentar em seu interior. Tais estudos são uma alternativa a certos métodos invasivos atuais, que usam sondas, tubos ou radiação ionizante (como em alimentos-teste com bário e com radiofármacos).

A HISTÓRIA DOS DETECTORES

O primeiro detector de campo magnético foi com certeza a bússola, utilizada por navegadores desde o século 12. Mas só em 1820 o físico dinamarquês Hans Oersted (1777-1851) descobriu, utilizando uma bússola, a ligação entre fenômenos elétricos e

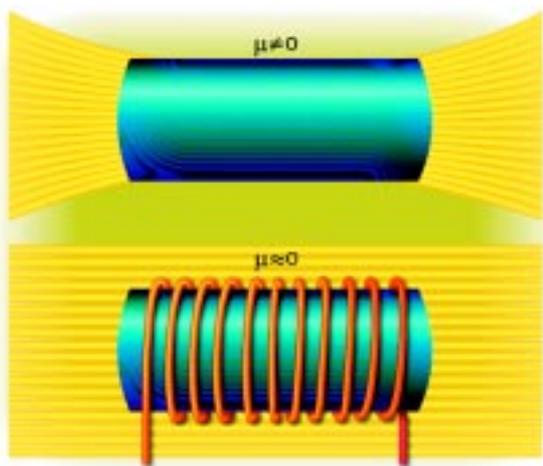


magnéticos. Pouco depois, em 1831, outro físico, o inglês Michael Faraday (1791-1867), percebeu que a diferença de potencial (voltagem) surgida entre os terminais de uma bobina, ao ser carregada, é igual à variação do fluxo magnético que a atravessa (o fluxo é o conjunto das linhas de indução de um campo magnético). Essa relação – a Lei de Faraday – diz que a voltagem é igual à variação do fluxo magnético no tempo ($V = d\Phi / dt$), o que permite determinar a variação do campo magnético em uma bobina medindo a voltagem entre seus terminais. O primeiro detector de campos biomagnéticos foi construído com base nesse princípio.

O fluxo está vinculado à área da bobina que o produz e à intensidade do campo: aumentando a área da bobina e o campo, cresce o número de linhas do fluxo. Essa variação pode ser produzida, de modo engenhoso, pela modulação da permeabilidade magnética de um material ferromagnético. Em termos simplificados, a permeabilidade é a capacidade do material de ‘absorver’ um campo magnético quando exposto a ele. Quanto mais alta a permeabilidade, mais o campo magnético é ‘drenado’ para dentro do material (figura 8).

Se o material em estudo for inserido no eixo de uma bobina, uma variação de fluxo vai ocorrer, associada à ‘absorção’ ou não do campo (modulado pela alteração da corrente e, portanto, do campo). A variação de voltagem equivalente será registrada por um voltímetro ligado aos terminais da bobina. Esse dispositivo permite medir campos estáticos ou de baixa frequência com grande sensibilidade, já que o campo magnético em estudo pode ser ‘chaveado’ (ligado-desligado ou alterado) com uma frequência bem maior que aquela do sinal que se quer medir (a frequência é o número de ciclos por segundo da onda). Esse dispositivo é chamado magnetômetro de fluxo saturado ou fluxgate. O nome em inglês parece refletir melhor o que acontece: é como se um portão (gate) abrisse e fechasse à passagem do fluxo magnético, provocando a variação de fluxo magnético.

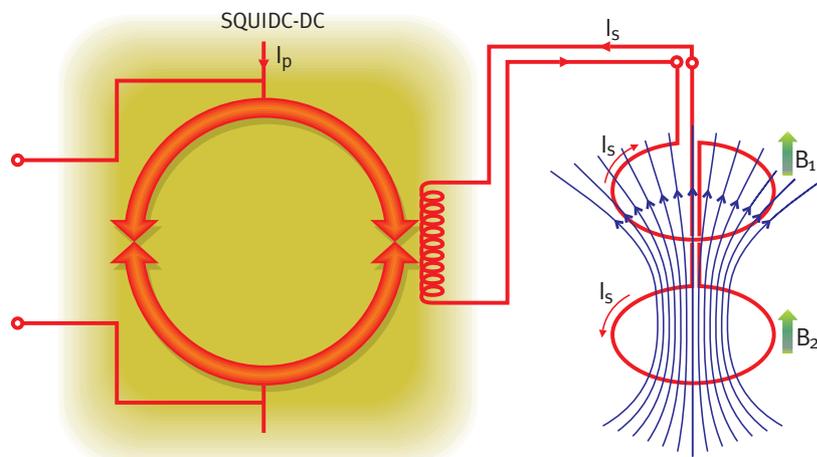
Como nos bons filmes, o melhor vem no fim. Os dispositivos supercondutores de interferência quântica, ou SQUIDS (de *superconducting quantum interference devices*) são hoje os detectores de fluxo magnético mais sensíveis (figura 9). Como o nome indica, seu funcionamento baseia-se em um fenômeno quântico: o efeito Josephson (ver ‘O tunelamento de elétrons’). Eles podem medir campos da ordem de fT (10^{-15} T) e têm ampla aplicação na



física, desde pesquisas com ondas gravitacionais até a construção de voltímetros altamente sensíveis.

A elevada sensibilidade dos *SQUIDS* tem alto preço. Os utilizados hoje na área de biomagnetismo são à base de nióbio (metal com extensas reservas no Brasil) com titânio. Tais materiais só adquirem supercondutividade em temperaturas muito baixas, por isso têm que ser resfriados através da imersão em hélio líquido. O hélio líquido, porém, além do alto custo de produção, precisa passar, para preservar esse gás raro, por uma reciclagem também dispendiosa.

A esperança de redução de custos nessa área aumentou com a descoberta, nos anos 80, de su-



percondutores cerâmicos (ligas de ítrio, bário, cobre e oxigênio), com temperatura de transição mais alta. A supercondutividade, nesses materiais, ocorre em torno de 35 K (-238°C). Poucos anos depois, foram descobertos materiais supercondutores a cerca de 95 K (-178°C), o que já permite usar nitrogênio líquido (mais barato) para o resfriamento. A busca de supercondutores com temperaturas de transição mais altas continua, visando reduzir o custo da fabricação de *SQUIDS*.

Todos esses novos dispositivos permitem uma série de aplicações não-invasivas promissoras, tanto na identificação de estruturas quanto no planejamento de terapias, envolvendo regiões muito delicadas e pouco compreendidas do corpo humano. Em conjunto com outros métodos também recentes, como a imagem funcional por ressonância magnética (que permite visualizar órgãos durante seu funcionamento), as técnicas biomagnéticas tornam-se cada vez mais importantes e eficazes.

Figura 8. Variação do fluxo de campo magnético em função da permeabilidade: se esta é alta ($\mu \neq 0$), as linhas de fluxo são 'atraídas' para dentro do material, e se é baixa ($\mu \approx 0$), não há atração

O TUNELAMENTO DE ELÉTRONS

Em uma corrente elétrica que percorre um condutor separado de outro por uma fina camada de material isolante, os elétrons podem, em condições especiais, atravessar essa barreira. O fenômeno, explicado pela mecânica quântica, é chamado de tunelamento. Isso também ocorre em materiais supercondutores (que não oferecem resistência à passagem de uma corrente elétrica), mas nesse caso os elétrons estão unidos em pares (os 'pares de Cooper').

O tunelamento dos pares de Cooper, em supercondutores, é o efeito Josephson. Sua descoberta, em 1962, deu ao inglês Brian Josephson o Nobel de Física em 1973 (junto com outros pesquisadores). Nesse tunelamento, o supercondutor separado por uma barreira isolante (chamada de junção Josephson) mantém suas propriedades, mas a corrente supercondutora é alterada na presença de um campo magnético – os *SQUIDS* registram tal alteração e isso permite determinar o fluxo magnético.

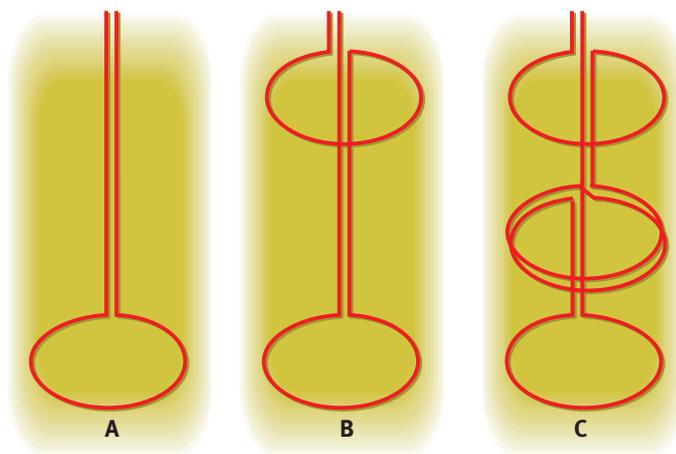
COMO ISOLAR O RUÍDO AMBIENTAL

Quando se consegue construir um dispositivo para medir campos magnéticos tão pouco intensos, surge um sério problema: o ruído magnético ambiental é, em alguns casos, dezenas de milhões de vezes mais intenso que os campos que se pretende detectar. Como superar esse problema? A solução mais simplista é a construção de uma câmara magneticamente blindada. Elas, de fato, existem, e são inevitáveis em certos casos, mas têm como grande inconveniente o custo elevado.

Outra solução engenhosa são os gradiômetros, dispositivos capazes de detectar as linhas de campos magnéticos que atravessam o interior de suas bobinas. Dependendo de sua construção, os gradiômetros podem registrar de forma seletiva esses cam-

Figura 9. Esquema de um *SQUID*, com um anel supercondutor (em azul) apresentando duas barreiras, as junções Josephson (setas), e com um sensor biogradiômetro (a bobina maior, à direita). A bobina menor (ao centro) transfere o fluxo entre o sensor e o *SQUID*, e os fluxos magnéticos produzidos pelos campos B_1 e B_2 são detectados cada um por uma espira (os dois 'aros' do gradiômetro, nos quais a corrente tem sentidos opostos). A corrente resultante equivale à subtração dos dois fluxos

Figura 10. O gradiômetro de ordem zero (A), com apenas uma espira, detecta todas as linhas de campo magnético que o atravessam, enquanto gradiômetros de primeira (B) ou segunda (C) ordem, com mais espiras, podem cancelar de modo seletivo certos tipos de campo magnético – quanto mais complexo o ruído ambiental, maior a ordem do gradiômetro usado para seu cancelamento



pos (figura 10) e conter apenas um detector (monocanal) ou vários (multicanal). Já existem biogradiômetros (gradiômetros conectados a SQUIDS) com 122 canais, capazes de cobrir toda a cabeça e realizar uma imagem instantânea dos campos magnéticos produzidos pela atividade cerebral.

FALTA RESOLVER O PROBLEMA INVERSO

A atividade elétrica presente em uma área limitada do cérebro pode ser vista como um segmento isolado de corrente. Essa corrente é a produzida pelos potenciais elétricos gerados nas sinapses dos neurônios. É possível calcular o campo magnético gerado por um dado segmento através da lei de Biot-Savart, segundo a qual o campo é diretamente proporcional à intensidade da corrente. Esse é o chamado problema direto (a partir da fonte, determinar o campo). Logo, localizar uma região cerebral que está sendo ativada é semelhante a achar um fio que gera um campo magnético. Para isso, é preciso medir o campo magnético (ou um de seus componentes) e resolver o chamado problema inverso (a partir do campo, determinar a fonte).

Mas por que usar medidas magnéticas e não elétricas? A resposta está em uma grande vantagem das primeiras: o tecido biológico não afeta os campos magnéticos, enquanto os campos elétricos ou potenciais medidos na pele sofrem interferências de diferenças de condutividade elétrica nos tecidos. Infelizmente, ainda não é possível determinar de modo preciso as fontes de corrente através da medição dos campos magnéticos que elas produzem (o problema inverso) – um mesmo campo pode ser o resultado de várias distribuições de corrente.

A resolução do problema inverso exige a simulação teórica das fontes que geram os campos, através de um modelo computacional ao qual são agregadas informações anatômicas e comparações com medidas experimentais diretas desses campos. A cada ano modelos mais realistas são desenvolvidos. O aumento da precisão dessas simulações possibilitará determinar, sem interferências nem exames invasivos, áreas eletricamente ativas ou que acumularam partículas magnéticas, abrindo uma nova era para os diagnósticos clínicos e para inúmeras outras aplicações. ■

Sugestões para leitura

ANDRÄ, W. & NOWAK, H. (Eds.). *Magnetism in medicine: a handbook*, Wiley-VCH, 1998.

HÄMÄLÄINEN, M. e outros. 'Magnetoencephalography – Theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain', in *Review of Modern Physics*, v. 65, p. 413 (1993).

ROMANI, G.L., WILLIAMSON, S.J. & KAUFMAN, L. 'Biomagnetic instrumentation', in *Review of Scientific Instruments*, v. 53, p. 1.815 (1982).

LOUNASMAA, O. & HARI, R. 'Le magnétisme du cerveau', in *La Recherche* n° 223, p. 874 (julho-agosto de 1990).

O sinal

As pesquisas sobre os campos magnéticos gerados pelo coração podem ajudar a diagnosticar doenças e a entender melhor como o órgão funciona. Esses campos, no entanto, estão misturados a muitos outros, milhões de vezes mais intensos, como o da Terra. Por isso, para medir e estudar o sinal magnético do coração é preciso antes isolá-lo, o que já é conseguido, de modo engenhoso, por técnicas sofisticadas.

Paulo Costa Ribeiro
Departamento de Física,
Pontifícia Universidade
Católica do Rio de Janeiro

magnético do coração

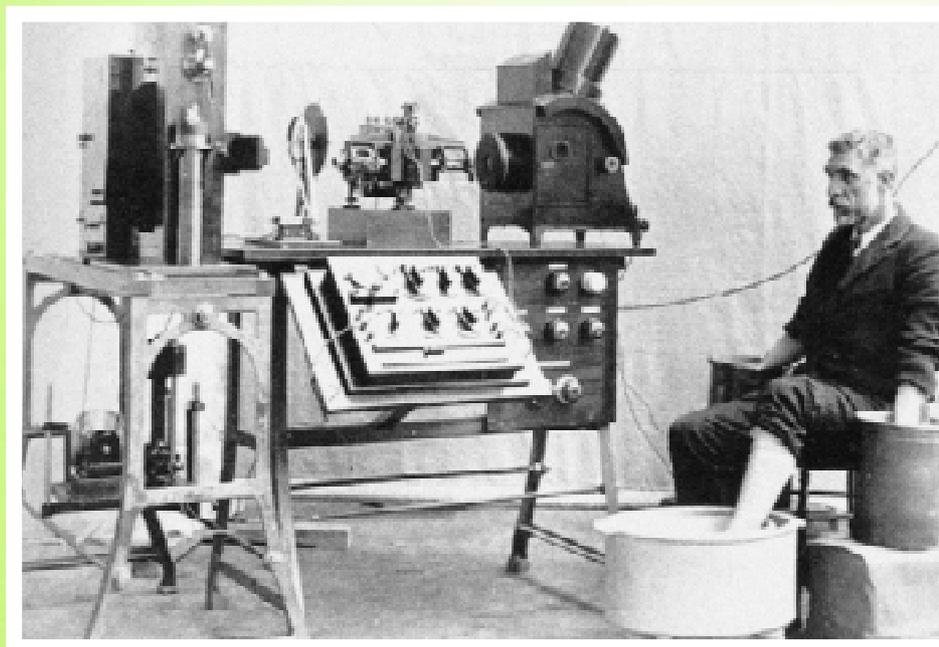


Figura 1. O eletrocardiógrafo original de Einthoven incluía três tinas, que continham uma solução condutora, para estabelecer o contato elétrico com os dois pulsos e uma das pernas do paciente

campo gerado é um milhão de vezes menor que o da Terra. Como identificar um sinal tão fraco? O problema não está só na sensibilidade do sensor, mas na necessidade de fazer a medição na presença de outro sinal (o do campo magnético terrestre), muito mais forte.

VENDO ESTRELAS AO MEIO-DIA

Para dar uma idéia dessa dificuldade, basta comparar essa detecção com a de outro tipo de sinal – o da luz.

Para fotografar as estrelas é preciso usar um filme muito mais sensível do que o normalmente usado para fotografar à luz do dia. Isso porque a intensidade da luz que vem das estrelas (e incide no filme dentro da câmera) também é cerca de um milhão de vezes menor do que a proveniente do céu claro durante o dia. O olho humano é sensível o bastante para observar as estrelas à noite, mas é incapaz de vê-las de dia, pois em condições de grande luminosidade ele não detecta pequenas variações de intensidade de luz um milhão de vezes menores.

Ao contrário do que ocorre com a luz do Sol, o campo magnético terrestre está sempre presente. Só pode ser excluído se for usada uma blindagem magnética, que exige uma liga especial de ferro, extremamente cara e pouco prática. Por isso, só em 1963 Gerhard Baule e Richard McFee, da Universidade de Siracusa (Nova York, Estados Unidos), detectaram o primeiro sinal magnético cardíaco, usando um complexo sistema de bobinas capaz de anular o campo magnético terrestre.

Detectar o sinal magnético do coração, sem anular o campo terrestre, equivale a ver estrelas ao meio-dia. Como conseguir isso? A maneira encon-

O magnetismo, embora já tenha sido muito estudado, ainda é uma promissora área de pesquisa, em especial no caso de campos magnéticos extremamente fracos. Esses campos só puderam ser estudados após a construção de aparelhos – os *SQUIDS* – capazes de detectar sinais magnéticos até 10 bilhões de vezes menores que o do campo da Terra, que orienta a agulha das bússolas.

Tais aparelhos baseiam-se na supercondutividade – a ausência de resistência à passagem de correntes elétricas, propriedade exibida por alguns materiais quando resfriados a temperaturas muito baixas. Os *SQUIDS* permitiram medir e estudar campos magnéticos tão fracos que nunca tinham sido detectados, como aqueles gerados por correntes elétricas muito fracas presentes no corpo humano.

As correntes elétricas do corpo já eram conhecidas há muito tempo. O primeiro eletrocardiógrafo, capaz de detectar as correntes produzidas pela atividade elétrica do coração (figura 1), foi construído em 1903 pelo fisiologista alemão Willem Einthoven (1860-1927). Essa atividade está diretamente ligada ao comportamento muscular do coração e seu registro é hoje importante para os diagnósticos cardíacos.

Se o corpo tem correntes elétricas, elas geram campos magnéticos. Isso ocorre no coração, mas o

Figura 2. O efeito estereoscópico, na visão, permite explicar a discriminação espacial usada, na magnetocardiografia, para separar o sinal magnético do coração (próximo) do ruído magnético ambiental (de fontes distantes)



As imagens de peças de um jogo de xadrez (próximas e distantes) recebidas pelo olho esquerdo (A) e pelo direito (B) são superpostas para compor a imagem final (C). Nesta, as imagens das peças distantes se confundem e as das peças próximas ficam ligeiramente deslocadas (o que dá ao cérebro a noção da distância)

Superpondo-se a imagem normal recebida no olho direito (B) e o negativo da imagem recebida no esquerdo (D), é possível ‘subtrair’ essas imagens, obtendo a diferença entre uma e outra (E). Aplicando-se um processo análogo aos sinais magnéticos captados, é possível ‘separar’ e reconhecer o sinal específico do coração

trada baseou-se em uma diferença essencial entre os sinais: enquanto as fontes dos campos magnéticos da Terra e de outros campos urbanos (como os de carros, 10 mil vezes maiores que o cardíaco) ficam longe do detector, este pode ser colocado bem perto do coração. Se fosse possível uma ‘discriminação espacial’, distinguindo a fonte próxima da afastada, o sinal do coração seria detectado sem blindagem magnética.

Na natureza, a informação sobre a distância da fonte (de luz ou de som) é obtida pelo uso de dois detectores idênticos. A visão e a audição utilizam dois sistemas de detecção espacialmente distanciados: os dois olhos e os dois ouvidos. Na visão, um mesmo objeto dá origem a duas imagens, uma em cada olho. Objetos próximos geram imagens diferentes nas retinas, enquanto os longínquos produzem imagens idênticas. É o efeito estereoscópico que produz a visão tridimensional (figura 2).

Esse efeito depende da superposição das duas imagens. As geradas por objetos distantes, por serem idênticas, confundem-se ao serem superpostas. Já as de objetos próximos, ligeiramente diferentes, ficam deslocadas uma da outra. Se tomarmos uma imagem final (com imagens superpostas de objetos distantes e próximos) e apa-

garmos (subtraímos) tudo o que está superposto, restarão apenas as partes deslocadas das imagens. Foi esse método de subtração dos sinais vindos de dois sítios separados no espaço que permitiu obter a ‘discriminação espacial’ entre o sinal magnético próximo, do coração, e os demais sinais espúrios afastados, sem blindagem magnética.

UM DISPOSITIVO ENGENHOSO

Para diferenciar, e assim detectar, o sinal do coração usa-se um sistema com duas bobinas sensoras enroladas em oposição. Os campos magnéticos, que variam no tempo, geram na primeira bobina uma corrente com sentido oposto ao gerado na segunda. Se a fonte de um campo está distante, a amplitude de variação do campo com o tempo é idêntica nas duas bobinas e as correntes induzidas anulam-se. Se a fonte está próxima, a variação do campo com o tempo é maior na bobina mais próxima da fonte. Com isso, as correntes induzidas não se anulam. Há uma corrente resultante que pode ser detectada pelo SQUID.

As bobinas sensoras são feitas, como o SQUID, de um material supercondutor, e precisam ser mantidas a uma temperatura muito baixa. O conjunto (bobinas e SQUID) fica, por isso, dentro de um recipiente térmico (vaso Dewar) com hélio líquido, que mantém os dois componentes à temperatura de cerca de -270°C. Assim como o complexo aparelho original de Einthoven evoluiu até o atual eletrocardiógrafo, é possível prever que o sofisticado magnetocardiógrafo (detector do sinal magnético car-

Figura 3. Representação das correntes primárias (que aparecem no coração) e das secundárias (geradas no resto do corpo)



díaco) evoluirá para um sistema mais simples. Mas essa evolução só ocorrerá se houver interesse, ou seja, se o magnetocardiograma puder fornecer informações que não aparecem no eletrocardiograma. Quais as chances de isso acontecer?

Como o corpo humano é condutor de eletricidade, as correntes (primárias) que ocorrem no músculo cardíaco geram correntes secundárias em outros tecidos (figura 3). O que o eletrocardiograma detecta, por eletrodos fixados na pele, são as correntes secundárias, mas é óbvio que seria mais importante medir e conhecer as primárias, diretamente ligadas à atividade muscular do coração. Portanto, a magnetocardiografia seria capaz de acompanhar, mais fielmente que a eletrocardiografia, o que se passa no coração, pois existem evidências de que o sinal magnético é produzido sobretudo pelas correntes primárias e pouco influenciado pelas secundárias.

Isso fica claro se compararmos o eletrocardiograma e o magnetocardiograma de um feto (figura 4). O primeiro, obtido por eletrodos colocados sobre o ventre da mãe, mostra, além do sinal elétrico do coração do feto, outro (de maior amplitude) vindo da atividade do coração da mãe, a quase meio metro de distância dos eletrodos. Já no magnetocardiograma só aparece o sinal magnético do coração do feto: o gerado pelas correntes secundárias produzidas pelo coração da mãe não é detectado.

Outros aspectos tornam a magnetocardiografia uma técnica interessante do ponto de vista clínico. Na eletrocardiografia, limitações técnicas impedem a medição de correntes que variam no tempo. Isso dificulta a detecção de um tipo de corrente constante denominado corrente de lesão, que aparece nos processos de sofrimento cardíaco, em isquemias e infartos. A magnetocardiografia, porém, pode registrar essa corrente, já que o *SQUID* é capaz de detectar correntes contínuas.

Os indícios são muito animadores, quanto ao futuro da magnetocardiografia. Mas uma resposta definitiva sobre seu interesse clínico só virá após estudos sistemáticos, como o realizado, por tempo limitado, no Instituto do Coração (Incor), da Universidade de São Paulo, com um protótipo de magnetocardiógrafo construído no Departamento de Física da Pon-



Figura 4. Magnetocardiograma e eletrocardiograma de um feto: no primeiro só aparece o sinal do feto, e no outro também estão presentes os sinais da atividade elétrica do coração da mãe (picos mais altos)

tifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Os pesquisadores, chefiados por Cândido de Pinto Melo, buscaram durante cinco anos, em conjunto com a equipe do Serviço de Informática Médica do Incor, aprimorar o uso clínico da técnica, mas o projeto foi interrompido por falta de financiamento.

Enquanto sua importância para a medicina continua a ser avaliada, a medida do sinal magnético produzido pela atividade elétrica do coração já pode ser considerada um trunfo importante em pesquisa fundamental. O método científico caracteriza-se por uma interação constante entre o modelo que traduz a nossa percepção da natureza e a própria natureza. Toda vez que se desenvolve um novo instrumento de medida, mais sensível que os anteriores, é possível prever novas mudanças nos modelos e teorias sobre os fenômenos da natureza. No caso da magnetocardiografia, as teorias envolvidas não se limitam às da eletrofisiologia cardíaca.

Grandes avanços foram obtidos pelo grupo do autor na técnica de discriminação espacial dos sinais magnéticos e no estudo de arritmias cardíacas. Uma medida pioneira obtida por esse grupo foi a localização precisa, por magnetocardiografia, da trajetória circular de correntes elétricas nos átrios, chamadas correntes de reentrada (figura 5). Tais correntes perturbam o ritmo de contração dos átrios – câmaras que formam (com os ventrículos) o coração. Esse distúrbio é conhecido como *flutter* atrial. A pesquisa permitiu identificar de forma clara essa arritmia cardíaca, e o próximo passo é tentar, usando um cateter de radiofrequência, cauterizar o tecido cardíaco e interromper a trajetória anômala das correntes. ■

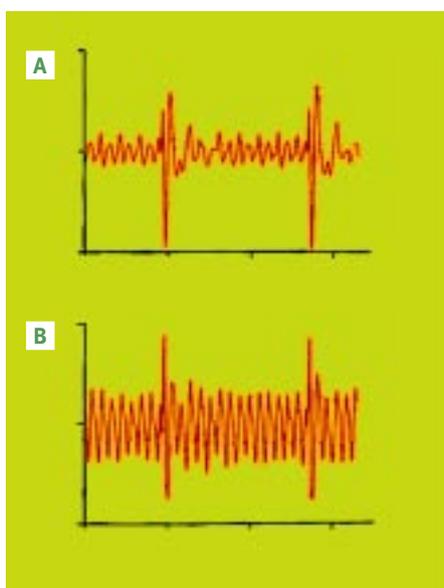


Figura 5. Eletrocardiograma (A) e magnetocardiograma (B) de um coelho com *flutter* atrial