

MODELOS COMPUTACIONAIS APLICADOS À NEUROCIÊNCIA COGNITIVA

Rodrigo Pavão

Departamento de Fisiologia, Instituto de Biociências, USP – São Paulo, SP, Brasil
rpavao@gmail.com

Editores responsáveis:

André Frazão Helene e Gilberto Fernando Xavier

Recebido 15dez09 / Aceito 14set10 / Publicação inicial 30dez10

Resumo. A ciência trabalha com modelos o tempo todo, assim como a neurociência cognitiva, que usa modelos para o estudo de funções mentais como a memória e a atenção. No entanto, a criação de modelos para cada uma das funções mentais é apenas uma das estratégias de estudo. A modelagem computacional é uma estratégia de construção de modelos centrada nos processos envolvidos nessas funções mentais; esses modelos são então estruturados através do desenvolvimento de algoritmos capazes de executar tais processos. A teoria de detecção de sinais pode ser usada na geração desses modelos, que podem ser aplicados no estudo da memória e atenção de modo a gerar os comportamentos envolvidos, sem a necessidade das separações presentes nos modelos tradicionais. Assim, a visão defendida aqui é a de que há grande similaridade entre essas funções cognitivas, de modo que seria vantajoso compreender tais fenômenos através da adoção de um mesmo modelo geral que fizesse a tradução dos processos neurofisiológicos para o comportamento.

Palavras-chave. Modelagem, atenção, memória, aprendizagem, teoria de detecção de sinais.

COMPUTATIONAL MODELS APPLIED TO COGNITIVE NEUROSCIENCE

Abstract. Science deals with models all the time, as well as cognitive neuroscience, which uses models for studying mental functions as memory and attention. However, creating models of each mental function is just one of the strategies of study. Computational modeling is a strategy of building models of the processes involved in such mental functions; these models are then structured by developing algorithms capable of performing such procedures. The signal detection theory can be used in the generation of computational models that can be applied in the study of memory and attention in order to generate the behaviors involved, without the need for the separations present on traditional models. Thus, the view advocated here is that there is great similarity between these cognitive functions, so that would be advantageous to understanding these phenomena adopt the same general model that makes the translation of the neurophysiological processes for behavior.

Keywords. Modeling, attention, memory, learning, signal detection theory.

Modelos de funções cognitivas são representações simplificadas das faculdades mentais. Os modelos propostos pela área de neurociência cognitiva descrevem sistemas (como memória, atenção, emoção etc.) e também as interações entre estes sistemas. Adicionalmente, os modelos podem representar características adicionais desses sistemas como as estruturas neuroanatômicas e os mecanismos neurofisiológicos envolvidos. Serão apresentados sucintamente duas funções cognitivas e alguns dos seus modelos tradicionais.

Exemplo 1 - Memória

Diversos modelos tentaram identificar a existência de múltiplas formas de memória associadas a sistemas neurais distintos, cada qual com diferentes características. Por exemplo, o modelo proposto por Atkinson e Shiffrin (1971), atualmente em desuso, define três tipos de estocagem mnemônica, incluindo (1) registros sensoriais, o primeiro estágio da percepção, cujo conteúdo seria transferido para (2) registros de curta duração, que consiste de um armazenamento temporário das informações, que poderiam vir a ser transferidas para (3) um

registro de longa duração (Figura 1). Nessa concepção, a informação fluiria através de estágios sucessivos de processamento, podendo ser estocada em uma memória de longa duração, o último estágio da cascata.



Figura 1 – Modelos de memória com estágios de estocagem sucessivos (modificado de Atkinson e Shiffrin, 1971).

No entanto, contrariamente a essa proposta de que a informação passaria sucessivamente por esses três estágios, há evidência de que a informação poderia fluir para memória de longa duração independentemente de sua permanência na memória de curta duração. Essa evidência é sintetizada pelo achado de que pacientes amnésicos apresentam memória de longa duração prejudicada e memória de curta duração preservada, enquanto pacientes com lesões no córtex frontal ou parietal apresentam o quadro oposto (Baddeley e Warrington, 1970).

Assim, como alternativa aos registros sensoriais e de curta duração do modelo de

memória (estágios 1 e 2 do modelo de Atkinson e Shiffrin), Baddeley e Hitch (1974) propuseram o modelo de memória operacional para descrever a retenção temporária e manipulação de informações. Esse modelo descreve um sistema de controle de atenção, o executivo central, auxiliado por dois sistemas de suporte responsáveis pelo arquivamento temporário e pela manipulação de informações, um de natureza visuo-espacial e outro de natureza fonológica (Figura 2).



Figura 2 – Modelo de memória operacional (modificado de Baddeley e Hitch, 1974).

Adicionalmente, como alternativa ao registro de longa duração (estágio 3 do modelo de Atkinson e Shiffrin) é concebido o sistema de memória de longa duração. Este pode ser dividido em conhecimento explícito e conhecimento implícito, com base na dupla dissociação envolvendo pacientes com lesões ou disfunções no lobo temporal medial (amnésicos, com lembrança da informação sob forma passível de relato verbal prejudicada e capacidade de desempenho habilidoso preservada; isto é, prejuízo exclusivamente explícito) e nos gânglios basais (parkinsonianos, com quadro inverso ao dos amnésicos; prejuízo exclusivamente implícito). Esses subsistemas podem ainda ser adicionalmente subdivididos (para mais detalhes sobre sistemas de memória em Pavão, 2008) (Figura 3).



Figura 3 – Modelo de memória de longa duração (modificado de Squire e Knowton, 1995).

Exemplo 2 - Atenção

Modelos da função atencional são menos consensuais que os modelos de memória. O debate existe, por exemplo, no modo em que ocorreria essa seleção: 1) como filtro (permitindo processamento adicional de apenas uma parte da informação transmitida pelo sistema sensorial), 2) filtro atenuador (manutenção do sinal a ser processado, associado à redução dos demais sinais não atendidos (isto é, que não receberam atenção), ou 3) intensificador (amplificação do sinal a ser processado, associado à manutenção dos demais sinais não atendidos) (Figura 4). Além disso, a seleção do que seria processado preferencialmente poderia ocorrer em diferentes níveis do sistema nervoso – desde o sistema sensorial até as áreas integrativas.

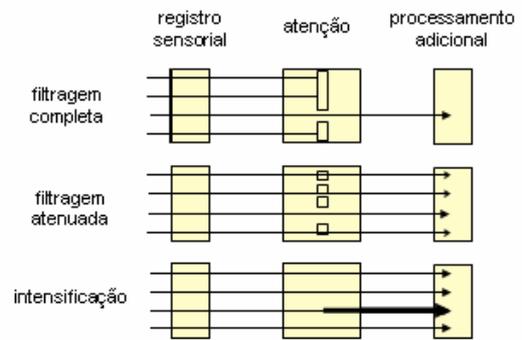


Figura 4 – Seleção por filtros simples, atenuador ou amplificador (acima) (modificado de Helene e Xavier, 2003).

Há também o debate sobre como ocorre o direcionamento da atenção. Este tem sido diferenciado entre atenção manifesta, que envolve direcionamento das superfícies sensoriais para o estímulo, e atenção encoberta, que envolveria apenas mecanismos centrais, sem direcionamento sensorial (Posner, 1980). O modelo dos mecanismos centrais de direcionamento atencional diferencia direcionamento exógeno (quando a atenção é automaticamente direcionada pelo estímulo) do direcionamento endógeno (quando a atenção é direcionada por ação voluntária do indivíduo), envolvendo diversas estruturas com diferentes funções (Aston-Jones e col., 1999; Posner e col., 1987) (Figura 5 – esquerda). Há ainda a interpretação de que a atenção seja um processo de seleção modulado pelo registro do passado, expectativa e funções superiores (LaBerge, 1989) (Figura 5 – direita).

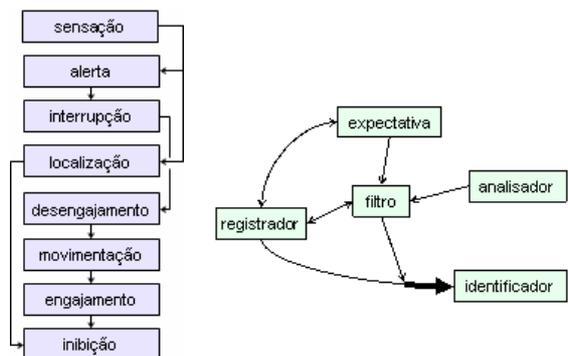


Figura 5 – Modelo de etapas do direcionamento da atenção visual (esquerda) (modificado de Posner, 1987). Interação do filtro atencional com outros processos cognitivos (direita) (modificado de LaBerge, 1989).

Construção de modelos cognitivos

A estratégia aplicada na neurociência cognitiva de assumir que existem módulos para cada uma das funções cognitivas tem seu ganho na organização do estudo da cognição. Essa abordagem levou à criação de modelos para cada uma dessas faculdades cognitivas, facilitando a compreensão dessas funções; porém, é clara a interação (e até mesmo sobreposição) entre as

diversas funções cognitivas. Isso sugere que talvez a estratégia de estudo centrada nas funções não seja a mais eficiente.

Essa interação/sobreposição permite que se investigue as funções cognitivas correlatas sob um mesmo prisma, isto é, adotando um mesmo modelo básico das computações ou processos envolvidos. A área da neurociência computacional aborda diretamente as computações realizadas em funções cognitivas. Um dos modelos dessa área de estudo será apresentado aqui, a teoria de detecção de sinais, que é aplicável de modo similar a diferentes funções cognitivas como atenção e memória (incluindo suas subdivisões).

De fato, a estreita relação entre atenção e memória já foi apresentada previamente por Helene e Xavier (2003). A visão a ser defendida aqui, entretanto, é que a computação dessas duas funções é de tal modo similar que haveria ganho na compreensão e na previsão de fenômenos através da adoção de um mesmo modelo geral que fizesse a tradução da neurofisiologia para o comportamento.

Modelagem Computacional

A neurociência cognitiva tem usado a modelagem computacional como ferramenta para explicação e entendimento dos mecanismos neurais subjacentes às funções cognitivas, por meio da implementação de programas de computador que traduzem modelos abstratos em simulações concretas de processos cognitivos. Uma ampla gama de processos pode ser modelada computacionalmente, desde a neurofisiologia neuronal até as computações envolvidas em funções cognitivas complexas. A modelagem computacional tem, portanto, um grande potencial na simulação de processos de integração incluindo os níveis da neurofisiologia, neuroanatomia e neuropsicologia, podendo oferecer *insights* sobre as computações envolvidas no funcionamento integrado de redes neuronais e na determinação do comportamento.

Um modelo computacional que vem sendo aplicado cada vez mais frequentemente nas neurociências é a teoria de detecção de sinais, que será apresentada a seguir.

Teoria de Detecção de Sinais

A teoria de detecção de sinais é uma adaptação da teoria de decisão estatística para o campo da percepção (Swets e col., 1961). Uma estratégia interessante de explicação dessa teoria é o uso do exemplo do diagnóstico de tumor por um médico observando imagens de tomografia computadorizada (adaptado de Heeger, 2007).

A interpretação de imagens de tomografia é difícil e demanda bastante treino. Em razão dessa dificuldade, há sempre incerteza sobre o julgamento. Pode existir um tumor (sinal presente) ou não (sinal ausente). O médico pode ver o tumor (resposta “sim”) ou não (resposta

“não”). Existem quatro possibilidades, duas boas (identificação e rejeição corretas) e duas ruins (omissão e alarme falsos) (Figura 6).

	resposta “sim”	resposta “não”
sinal presente	acerto	omissão
sinal ausente	alarme falso	rejeição correta

Figura 6 – Combinações possíveis entre presença/ausência de sinal e resposta sim/não da teoria de detecção de sinais. Acertos (sinal presente, resposta “sim”) e rejeições corretas (sinal ausente e resposta “não”) são positivos; alarmes falsos e omissões são negativos.

Dois fatores são fundamentais para a decisão: a aquisição de informação e o critério

A *aquisição de informação*, no nosso exemplo, se dá pela observação das imagens da tomografia: formato, cor, textura etc. do tecido observado. Com bastante treino, o médico consegue obter informação suficiente dessas imagens. Além disso, outros métodos poderiam ser usados, como ressonância magnética, que poderiam fornecer informação adicional. A aquisição de informação define a resposta interna (explicada mais adiante no texto).

O *critério*, por outro lado, é mais subjetivo ao próprio médico. Dois médicos diferentes com mesma capacidade de análise, observando o mesmo exame, podem ter diferentes opiniões sobre o que fazer. Um deles pode assumir que estará perdendo a oportunidade de fazer um diagnóstico precoce que pode significar a diferença entre a vida e a morte, e que um alarme falso poderia resultar em uma operação de rotina para biópsia; e, nesse contexto, opta pela resposta “sim”. Outro médico pode assumir que cirurgias desnecessárias, mesmo de rotina, são ruins, caras, estressantes etc.; e, nesse contexto, pode adotar uma postura mais conservadora e optar pela resposta “não”. Este último médico deixará de diagnosticar pacientes com tumor, principalmente em estágios iniciais, mas estará reduzindo o número de cirurgias desnecessárias. Assim, o critério não se refere à informação, mas sim à decisão que será tomada com essa informação.

Adicionalmente, existem ruídos que são processados juntamente com o sinal. Ruídos, no nosso exemplo, correspondem às limitações da técnica, ou algo no tecido sadio que é similar ao tumor. Além disso, o médico também exibe variações na maneira pela qual analisa o exame. A soma do sinal com os ruídos determina a resposta interna.

A *resposta interna* poderia ser colocada de forma mais concreta, supondo que o médico possuía “neurônios-tumor” que têm a frequência de disparo (em *spikes/s*) aumentada ao ver exame com evidência de tumor. Note que apesar de este ser um exemplo bastante didático, é bem

pouco provável que o processamento realmente se dê desse modo. No entanto, é bastante certo que o reconhecimento de tumores em exames de tomografia envolva atividade diferenciada em alguns circuitos neurais de médicos neurologistas. A atividade diferenciada nos circuitos neurais referentes ao reconhecimento de sinais será referido como resposta interna.

O processo pode ser formalizado como representado na Figura 7. A curva à esquerda expressa apenas ruído (tecido sadio), e a curva à direita expressa sinal (tumor presente) mais ruído. A abscissa representa a resposta interna, e a ordenada a probabilidade de ocorrência. Numa situação envolvendo apenas ruído haverá, em média, 10 unidades de resposta interna; porém, algumas vezes pode haver bem mais do que isso, i.e., até 18 ou 19 unidades de resposta interna. De maneira similar, numa situação envolvendo ruído mais sinal pode haver menos do que 20 unidades de resposta interna, podendo gerar uma sobreposição entre as curvas das duas condições.

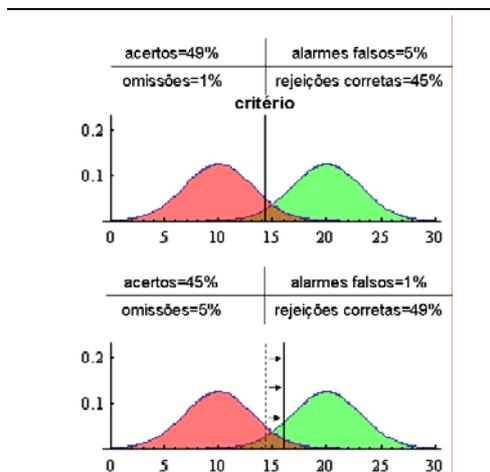
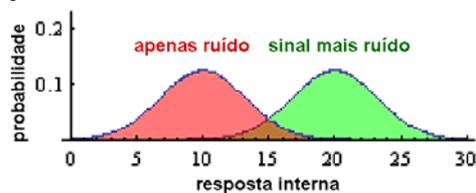


Figura 7 – Resposta interna do observador (no exemplo, o médico que analisa os exames) para as condições apenas ruído (tecido sadio) e sinal (tumor) mais ruído (acima). Dois médicos com a mesma habilidade podem adotar critérios distintos, levando a mais acertos e mais alarmes falsos (centro) ou menos alarmes falsos e menos acertos, i.e., omissões (abaixo).

Exemplo 1 - Memória e a Teoria de Detecção de Sinais

A teoria de detecção de sinais tem sido usada nos modelos formais de aprendizagem e memória. O modelo apresentado por Berry e col. (2008), por exemplo, expressa valores de familiaridade amostrados em uma distribuição normal (análogo à resposta interna) a cada item.

A familiaridade exprime a força da memória que, na prática, pode ser entendida como a facilidade de lembrar este item.

O treinamento de um item específico gera o aumento do valor da familiaridade daquele item (Figura 8); assim, assume-se que a média da familiaridade é maior para itens treinados do que para itens não treinados, já que a familiaridade aumenta face a exposições repetidas do item em questão.

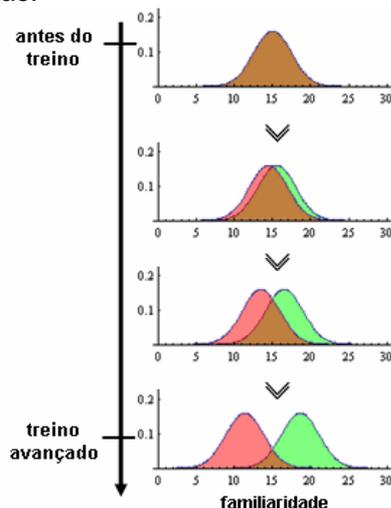


Figura 8. Ao longo do treino os valores de familiaridade são alterados, fazendo com que itens inicialmente indiferenciados (parte superior) tornem-se paulatinamente distintos (parte inferior).

O valor de familiaridade é usado para fazer julgamentos de reconhecimento (“já vi” se valor de “f” (familiaridade) for maior que um dado critério, e “não vi” se “f” for menor que o critério). A familiaridade é usada também para obter medidas de pré-ativação, por exemplo, o tempo de resposta para o item (Figura 9).

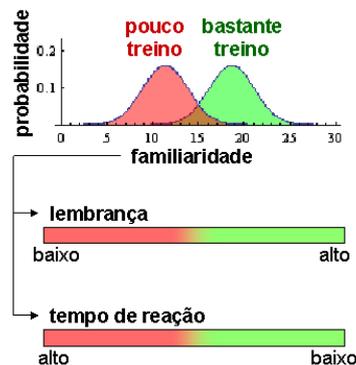


Figura 9 – Familiaridade para um item em função da quantidade de treino e seu reflexo sobre a lembrança e o tempo de reação. Esse modelo pode ser aplicado a diversas situações em que tradicionalmente se julga como necessários os sistemas de memória explícita (lembrança de lista de palavras, ou diferencial palavras apresentadas de não-apresentadas – inserindo critério de distinção dessas categorias) e implícita (como executar o mais rápido possível uma seqüência completa de posições, p.ex., 1-2-3-4, ou modificada, p.ex., 1-2-3-9).

Exemplo 2 - Atenção e a Teoria de Detecção de Sinais

A aplicação dos conceitos da teoria de detecção de sinais ao estudo da atenção leva à sugestão de que a atenção atua aumentando a resposta interna aos estímulos selecionados (Figura 10 – acima). Esse tipo de abordagem é bastante utilizada em experimentos de detecção de contraste (isto é, diferença de cor e brilho entre o estímulo e o fundo), havendo relatos de alterações neurofisiológicas associadas a estímulos aos quais a atenção foi direcionada. Por exemplo, quando a atenção é direcionada para um dado estímulo, a taxa de disparos de neurônios isolados aumenta em relação à apresentação de um estímulo de mesmo contraste, porém, sem o direcionamento da atenção ao mesmo (Kim e col., 2007) (Figura 10 – abaixo).

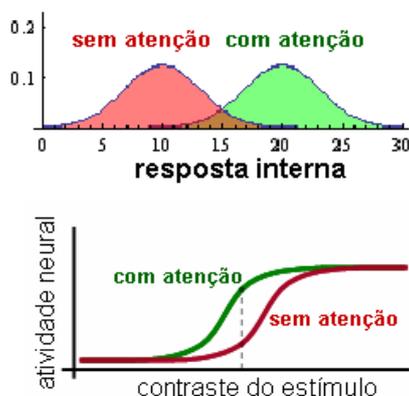


Figura 10 – Acima: distribuição de probabilidades da resposta interna, conforme a teoria de detecção de sinais aplicada à atenção. Abaixo: resposta neural a estímulos aos quais a atenção foi ou não direcionada; note na linha cinza pontilhada os diferentes níveis de atividade neural para estímulo de mesmo contraste quando atendidos e não atendidos. (Modificado de Kim e col., 2007).

Assim, da mesma maneira como apresentado anteriormente para memória, os processos atuantes na função atencional também podem ser modelados pela teoria de detecção de sinais. A seleção de estímulos envolvendo a facilitação do processamento (possibilitando a emissão de respostas mais rápidas ou melhor detecção de estímulos) poderiam, inclusive, ser interpretados como fundamentados nas mesmas computações que os presentes nas funções de memória. De fato, o experimento de Kim e col. (2007) consiste em apresentar uma pista indicando o lado provável de apresentação do estímulo (que pode ter diferentes contrastes) que se assemelha ao experimento de aprendizagem de seqüências de posições (em que estímulos anteriores indicam qual é o provável próximo estímulo); assim, parece bastante plausível o uso do mesmo modelo.

Conclusão

O princípio de utilização de modelos científicos é reduzir a complexidade dos fenômenos a serem estudados. A neurociência cognitiva avançou no estudo de funções como memória e atenção elaborando modelos usualmente centrados na distinção entre sistemas e subsistemas. Pouco esforço foi feito no sentido de apresentar as semelhanças entre os processos desempenhados pelas diferentes funções. A modelagem computacional tem preenchido exatamente essa lacuna, evidenciando computações semelhantes em funções distintas. A teoria de detecção de sinais, por exemplo, é um modelo que tem se mostrado capaz de atuar desse modo; de fato, a generalidade dessa teoria é tal que outros processos cognitivos poderiam vir a ser modelados vantajosamente. Nesse modelo, o processamento de estímulos seria facilitado de acordo com respostas internas; ou seja, os tempos de resposta, lembrança, detecção etc. seriam definidos pelo grau de preparação prévio do sistema nervoso. Esse grau de preparação é dado pela estrutura e atividade dos circuitos neurais. Assim, a força das sinapses, a quantidade ou a sincronização da atividade elétrica, entre outros, definiriam a facilidade de resposta aos eventos.

Agradecimentos. André Frazão Helene, Gilberto Fernando Xavier, Pedro Leite Ribeiro e Tatiana Hideko Kawamoto pelos comentários e sugestões.

Bibliografia

- Aston-Jones, G.S., Desimone R., Driver, J., Luck, S. J. e Posner, M. I. (1999) Attention. In: Zigmond, J. Z e col. (ed.) *Fundamental Neuroscience*. San Diego: Academic Press, 1385-1409.
- Atkinson, R.C. e Shiffrin, R. M. (1971) The control of short-term memory. *Scientific American* 225, 82-90.
- Baddeley, A. D. e Hitch, G. (1974). Working memory. In: Bower, G. A. (Ed.). *The Psychology of Learning and Motivation*. New York: Academic Press. 8, 47-89.
- Baddeley, A. D., Warrington, E.K. (1970). Amnesia and the distinction between long-and short- term memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*. v. 9, p. 176-189.
- Berry, C.J., Shanks, D.R., e Henson, R.N.A. (2008). A unitary signal-detection model of implicit and explicit memory. *Trends in Cognitive Sciences*. 12, 10.
- Heeger, D. (2007). Signal Detection Theory. Disponível no sítio eletrônico <http://www.cns.nyu.edu/~david/handouts/sdt/sdt.html>
- Helene, A. F. e Xavier, G. F. (2003). A construção da atenção a partir da memória. *Revista Brasileira de Psiquiatria*, 25(Supl.II), 12-20.
- Kim, Y.J., Grabowecy, M., Paller, K, Muthu K, Satoru Suzuki S (2007). Attention induces synchronization-based response gain in steady-state visual evoked potentials. *Nature Neuroscience* 10, 117 – 125.
- LaBerge, D. e Brown, V. (1989). Theory of attentional operations in shape identification. *Psychological Review*, 96, 101-124.
- Pavão (2008). Aprendizagem e memória. *Revista da Biologia*, 1, 16-20.

Posner, M. I., Inhoff, A. W., Friedrich, F. J. e Cohen, A. (1987) Isolating attentional systems: A cognitive-anatomical analysis. *Psychobiology*, 15, 107-121.

Posner, M.I. (1980). Orienting of attention, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32:2-25.

Squire, L.R. e Knowlton, B.J. (1995). Memory, hippocampus, and brain systems. In Gazzaniga, M S (Ed.). *The cognitive neurosciences*. Cambridge, A Bradford Book, 825-837.

Swets. J. A., Tanner, W. P. Jr e Birdsall, T. G. (1961). Decision processes in perception. *Psychology Review*. 68, 301-40.