Leopoldo Francisco Barletta Marchelli

O conceito de entropia informacional permite prever a aprendizagem serial, em ratos?

São Paulo
2011

Leopoldo Francisco Barletta Marchelli

O conceito de entropia informacional permite prever a aprendizagem serial, em ratos?

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, para a obtenção de Título de Mestre em Ciências, na Área de Fisiologia Geral.

Orientador: Gilberto Fernando Xavier

São Paulo
2011

Ficha Catalográfica

Marchelli, Leopoldo Francisco Barletta
O conceito de entropia informacional permite prever a aprendizagem serial, em ratos?
117 p.

Dissertação (Mestrado) - Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo. Departamento de Fisiologia.

1.Aprendizagem serial 2. Entropia informacional 3. Tarefa de tempo de reação serial 4. Memória Implícita 5. Atenção 6. Memória Operacional I. Universidade de São Paulo. Instituto de Biociências. Departamento de Fisiologia.

Comissão Julgadora:

_____ _____

Prof(a). Dr(a). Prof(a). Dr(a).

_____

Prof(a). Dr(a).

Orientador

Resumo

Prever eventos ambientais, com base em memórias sobre regularidades passadas, é uma das funções fundamentais de sistemas nervosos complexos. Eventos ordenados serialmente ou sequências estruturadas de estímulos permitem extrair informação passível de descrição formal que define seu padrão serial. Esse padrão inclui informações temporais e espaciais que facultam prever os próximos eventos da sequência, possibilitando a preparação prévia do organismo para lidar com sua ocorrência. Não surpreende que animais, incluindo o ser humano, aprendam, de maneira relativamente rápida, sobre regras e estruturas de padrões sequenciais de estímulos. O uso de tarefas de tempo de reação serial (TRS) é recorrente em estudos envolvendo a formação de associações, antecipação, atenção, as bases da memória e aprendizagem de relações complexas. Resumidamente, voluntários devem responder a estímulos apresentados em sequências repetitivas ou aleatórias. Com o treino, há redução no tempo de reação a cada estímulo, refletindo a aprendizagem de relações percepto-motoras. Essa redução, porém, é maior na sequência repetitiva em relação à sequência aleatória, indicando um aprendizado também sobre a sequência repetitiva, mesmo quando o voluntário não a percebe (conscientemente) e seja incapaz de relatar sua existência. Trata-se, portanto, de uma aquisição (inicialmente) implícita. A complexidade de uma sequência de estímulos pode ser expressa quantitativamente por meio de uma ferramenta matemática proposta por Shannon (1948), a entropia informacional (EI), que considera, entre outras coisas, a probabilidade de ocorrência dos estímulos em diferentes níveis. No presente trabalho, avaliamos em que extensão o conceito de EI permite prever o desempenho de ratos na tarefa de TRS envolvendo sequências com diferentes níveis de complexidade. Ratos foram treinados a reagir (1) a uma sequência repetitiva de estímulos, cuja quantidade de EI no nível “1” (que relaciona os estímulos da sequência 2 a 2) era 2,75. Após atingirem um nível assintótico de desempenho, os animais foram expostos (2) a sequências variáveis de estímulos com a mesma quantidade de EI no nível “1”, porém, com maior quantidade de EI no nível “2” (que relaciona os estímulos da sequência 3 a 3). Numa etapa posterior os animais foram expostos (3) a uma nova sequência repetitiva de estímulos, cuja quantidade de EI no nível “1” era 3,00; por fim, os animais foram submetidos (4) a sequências variáveis com a mesma quantidade de EI no nível “1”em relação à sequência anterior, porém, com maior quantidade de EI no nível 2 . Os resultados mostraram que os ratos aprenderam sobre os padrões seriais e, mais interessante, que seu desempenho esteve fortemente correlacionado à quantidade de EI no nível “2”. Em outras palavras, quanto maior a EI, pior o desempenho dos animais tanto em termos do tempo de reação como em termos da percentagem de respostas corretas. Portanto, o conceito de EI permite não apenas quantificar a complexidade de sequências empregadas em estudos envolvendo aprendizagem serial, mas também prever o desempenho dos animais.

Abstract

Prediction of environmental events, relying on memories of past regularities, is one of the fundamental functions of complex nervous systems. Sequences of serially ordered stimuli allow extracting information that defines its serial pattern. These patterns allow prediction of the next item in a sequence of events, facultating previous preparation to deal with its occurrence. Not surprisingly, animals, including humans, can identify rules present in serial structures of stimuli. Serial reaction time tasks (SRTT) have been extensively used in studies involving association, anticipation, attention, and learning and memory. Typically, subjects have to react to stimuli presented either in random or in repetitive sequences. As training proceeds, reaction time to each stimulus decreases, reflecting acquisition of this perceptual-motor skill. However, reaction time reduction is greater for repetitive sequences relative to the random sequences, indicating acquisition about the repetitive structure of the sequence. In human beings, this may occur even when the subject in uncapable of reporting the existence of a sequence, indicating that the acquisition was (at least initially) implicit rather than explicit. The complexity of a sequence of stimuli, at different levels, may be quantifyed by means of a mathematical tool proposed by Shannon (1948), the information entropy (IE). In this study we evaluated to which extent IE can predict performance of rats in SRTT involving sequences of stimuli organized at different levels of complexity. Rats were trained to react (1) a repeated sequence of stimuli which IE at the level "1" (i.e., expressing to which extent a given item allow prediction of the next) was 2.75. After reaching an asymptotic level of performance, the animals were exposed (2) a variable sequence of stimuli with the same amount of IE in the level "1", but with more IE in the level "2" (i.e., expressing to which extent two given items allow prediction of the next). Later the animals were exposed to (3) a new repeated sequence of stimuli, which IE at the level "1" was 3.00. Finally, the animals were submitted to (4) a random sequence of stimuli with the same amount of IE at the level "1", i.e., 3.00, but with greater IE in level “2”. Results showed that rats learned about the serial patterns and, more interestingly, their performance strongly correlated to the amount of IE at the level "2 ", both in terms of reaction times and in terms of percentage of correct responses. Therefore, IE allows not only to quantify complexity of sequences in studies involving serial learning, but also to predict performance of the subjects.

Aos meus pais Flora e Robson,
e irmãos Bruno e Clarissa,
por darem um significado especial a tudo.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Gilberto, meus sinceros agradecimentos, pelo conhecimento compartilhado, pela confiança no trabalho, pelas conversas esclarecedoras e, sobretudo pelo apoio, demonstrado através das formas mais sutis e sinceras.

Aos meus pais Flora e Robson e irmãos Bruno e Clarissa, pelo o amor, apoio constante e incondicional e pelas “cobranças”. Sobretudo agradeço pela formação humana, sem a qual a acadêmica jamais seria possível.

Ao Prof. André Frazão e Rodrigo Pavão, por toda a ajuda oferecida, pelo apoio e encorajamento no início dessa empreitada.

Ao grande amigo Ilton, pelo apoio e principalmente por estar invariavelmente presente em todos os momentos, desde as horas mais eufóricas até os momentos mais atribulados. Agradeço também aos grandes amigos de sempre, Felipe, Cyrus e Diego, com quem tive a felicidade de conviver nos últimos anos. Agradeço a eles pelo extremo companheirismo.

Aos amigos e companheiros de comissão organizadora do Curso de Inverno, Diego Orts, Marco Lapa, Ananda Brito, Aline Dal’Olio, pessoas com quem tive a sorte e imenso prazer em trabalhar junto, e também com quem muito aprendi. Agradeço também aos demais amigos do departamento de Fisiologia, em especial ao Bruno Madio e à Nathália, pelas conversas, risadas e cafés.

Aos amigos de laboratório, Renata, Bárbara, Pavão, Camile, Ilton, Felipe, Cyrus, Diego, Wataru, Elisa, Lívia e Manoel, pessoas com quem tive a oportunidade de trabalhar junto, pelas sugestões e críticas construtivas, pela amizade e pelos bons momentos vivenciados nos últimos anos.

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro (processo 08/551878-8).

Índice

Introdução……1
Objetivos……....37
Experimento 1……..…38
Material e Método…….39
Resultados…….52
Discussão……..57
Experimento 2……...62
Material e Método…….....63
Resultados.....72
Discussão.....92
Discussão Geral.....106
Conclusão.....112
Referências Bibliográficas.....115

Introdução

MEMÓRIA E ATENÇÃO: DA APRENDIZAGEM SERIAL A ANTECIPAÇÃO

Aprendizagem Serial

De formar geral, eventos ordenados serialmente são considerados como uma sequência estruturada de estímulos. Dessa sequência pode-se obter uma quantidade de informação que define seu padrão, é possível extrair regras que determinam como os elementos estarão organizados de maneira a gerar uma previsão acerca do próximo item da sequência. A estrutura desses padrões é passível de uma descrição formal. Nesses padrões estariam contidas combinações de informações temporais e espaciais que podem favorecer a previsão de eventos e determinar uma ação (resposta a esse evento). Isso possibilita a preparação prévia do organismo para lidar com a ocorrência de tal evento (Helene e Xavier, 2003).

Há que se ressaltar que gerar previsões acerca do ambiente com base em memórias sobre regularidades passadas é uma maneira muito eficiente e adaptativa de um individuo se relacionar com esse ambiente. Por esse motivo pode-se dizer que essa é uma das funções fundamentais de sistemas nervosos complexos. Com efeito, a habilidade de desenvolver uma estratégia comportamental de antecipação aos estímulos que ocorrem em uma ordem sequencial consistente e os mecanismos envolvidos nesse processo podem ser discutidos sob a ótica da aprendizagem serial (Fountain, 2008).

Além de estar relacionada com a antecipação de eventos, a aprendizagem serial permite uma organização sequencial do comportamento. Diante disso, não surpreende que animais, incluindo o ser humano, aprendam, de maneira relativamente rápida, sobre regras e estruturas que constituem um padrão sequencial de estímulos.

De acordo com essa noção, humanos seriam capazes de abstrair a estrutura formal do padrão e elaborar uma representação dessa estrutura a partir de uma sequência de estímulos. Uma vez codificada, essa representação pode ser usada posteriormente tanto para o reconhecimento quanto para o desdobramento da sequência conforme sua estrutura formal (Jones, 1964). A questão central desses estudos envolve antecipação baseada na aprendizagem de um padrão serial de recompensa. Hulse e Dorsky (1977; 1979) demonstraram que ratos também são sensíveis ao padrão de organização serial de uma sequência de estímulos.

Muitos desses estudos investigaram a participação de mecanismos associativos na aprendizagem de padrões seriais. De acordo com esse modelo, a associação entre os eventos da sequência é um fator crítico para o controle do comportamento sequencial. Através da discriminação e generalização de estímulos mediados por uma representação que associa os elementos da sequência a uma posição serial, os sujeitos aprendem a prever os eventos da sequência e, portanto, passam a antecipá-los (Capaldi e Miller, 2004; Wallace e Fountain, 2001). Outros autores argumentam que ratos podem aprender e elaborar representações de regras abstratas que representam a

estrutura encontrada nos padrões sequências (Hulse e Dorsky, 1977; 1979; Wallace e Fountain, 2001).

Tempo de reação serial em humanos

O uso de tarefas de tempo de reação serial é recorrente quando se estuda as bases da organização sequencial do comportamento, formação de associações e antecipação, e também as próprias bases da memória e aprendizagem de relações complexas. Esse tipo de tarefa apresenta versatilidade na medida em que diferentes processos são avaliados mediante modificações sutis do protocolo experimental.

A estrutura básica da tarefa é relativamente constante, incluindo a resposta requerida dos indivíduos. Entende-se que diferentes padrões de complexidade podem influenciar o comportamento sequencial de diferentes maneiras (Nissen e Bullemer, 1987). Seger (1994a) relatou três medidas comportamentais distintas associadas a tarefa capazes de indicar a correlação existente entre padrão das sequências e o comportamento: (1) fluência conceitual, que mede a habilidade dos indivíduos em ordenar ou classificar itens com base no conhecimento implícito, (2) eficiência, que avalia a aprendizagem através do aumento e/ou diminuição da velocidade de resposta em função dos estímulos apresentados e (3) previsão e controle, baseada na acurácia, essa medida se relaciona com a capacidade dos sujeitos preverem com precisão alguns aspectos dos estímulos. As modificações consistem em

manipulações da estrutura das sequências de estímulos que geram padrões sequenciais de diferentes complexidades.

Sistemas formais que possam ser usados para descrever o padrão de organização serial de elementos numa sequência podem envolver diferentes critérios. Uma sequência de estímulos é determinada pelo número e pelo arranjo dos diferentes itens que a compõe. De modo que, combinando-se números distintos de componentes obtém-se sequências variáveis. Por tanto, o limite para essas variações está sujeito à quantidade de estímulos e à organização sequencial desses elementos (Nissen e Bullemer, 1987; Reed e Johnson, 1994).

Um modelo amplamente utilizado para a construção de padrões sequenciais baseia-se nos arranjos de probabilidade das transições de um estímulo para outro, i.e., o padrão formal de uma sequência pode ser descrito pelas relações de probabilidade de ocorrência entre um estímulo e outro. Deste modo, uma sequência pode ser constituída de elementos que variem aleatoriamente, pode-se construir uma sequência em que todas as transições são igualmente prováveis (equiprováveis) (Figura 1). Alternativamente, pode-se manter a aleatoriedade da sequência, mas gerar transições entre estímulos particulares mais prováveis do que outras transições.

Elemento **N + 1** \ Elemento **N**	1	2	3	4
1		33%	33%	33%
2	33%		33%	33%
3	33%	33%		33%
4	33%	33%	33%	

Figura 1 – Matriz de probabilidades de uma sequência em que todas as transições são igualmente prováveis. Com essa matriz é possível obter as transições: 12 (leia-se “de 1 para 2”), 13, 14, 21, 23, 24, 31, 32, 34, 41, 42 e 43.

Por outro lado, em sequências ditas estruturadas as relações entre um estímulo e outro são determinadas por certo número de arranjos específicos e invariáveis de probabilidade de ocorrência entre um evento e outro. Ainda com relação às sequências estruturadas, elas podem ser de dois tipos: probabilísticas (ou variáveis) e determinísticas (ou fixas repetitivas). Sequências variáveis estão sujeitas a uma condição que determina a chance de aparecimento de cada um dos estímulos com base no estímulo anterior ou estímulos anteriores, dependendo da regra empregada. Assim, nessa modalidade de sequência a chance de cada evento ocorrer segue a probabilidade determinada por uma matriz de contingências (Figura 2). Por sua vez, sequências determinísticas são igualmente estruturadas por um arranjo de probabilidades em que chance de ocorrência de um estímulo também baseia-se no estímulo anterior. No entanto, uma sequência determinística é apresentada através de estrutura circular, ao longo da tarefa de tempo de reação serial essas sequências tornam-se repetitivas (Figura 2).

Elemento **N**

Elemento **N + 1**	1	2	3	4
1		50%	50%	
2				100%
3	50%	50%		
4	50%		50%	

Padrão determinístico
131423421

Padrão Probabilístico
213421423134231 42
423421423134213 14
313142342342142 13

Figura 2 – Exemplo de Matriz de probabilidades das transições de primeira ordem e as respectivas sequências geradas com padrão determinístico e probabilístico. Com essa matriz é possível obter somente as transições: 13, 14, 21, 23, 31, 34 e 42.

Com base nessa idéia, concluí-se que nas relações existentes entre os estímulos que compõem uma sequência as informações são muito variáveis. Em resumo, é possível criar sequências de estímulos cuja estrutura varia em

complexidade e avaliar seu impacto no desempenho dos indivíduos considerando a frequência de aparecimento dos estímulos, a ordem em que os mesmos estão dispostos, probabilidades de transição entre estímulos e o tamanho da sequência. A análise de alguns experimentos (ver adiante) leva a crer que essas probabilidades são fatores críticos envolvidos na aprendizagem serial (Cohen, Ivry e Keele, 1990; Reed e Johnson, 1994). Em processos de aprendizagem serial há justamente aquisição de informação sobre essas relações. Cleeremans e Jimenez (1998) acrescentam que a aprendizagem implícita consiste na aquisição involuntária de conhecimento probabilístico no que se refere a regularidades de uma sequência de estímulos.

Nissen e Bullemer (1987), através de variações de testes neuropsicológicos utilizados anteriormente em estudos de atenção, introduziram uma tarefa de tempo de reação serial em estudos envolvendo humanos. Nessa tarefa os voluntários deveriam apertar, “o mais rapidamente possível e evitando erros”, um de quatro botões específicos, cada qual relacionado a um de quatro estímulos visuais possíveis, apresentados sequencialmente na tela de um computador, evitando erros. A tecla mais à esquerda correspondia ao estímulo apresentado mais a esquerda, a tecla mais a direita ao estímulo mais a direita e assim por diante para as quatro teclas. Um grupo de voluntários desempenhou a tarefa em que estímulos eram apresentados numa sequência repetitiva de 10 posições (DBCACBDCBA) e outro grupo de voluntários desempenhou a tarefa contendo uma sequência aleatória (com a restrição de que não existiam repetições consecutivas da mesma posição, i.e., não existiam as transições A→A, B→B, C→C ou D→D).

Ambos os grupos exibiram redução do tempo de reação ao longo do treinamento (Figura 3). Porém, o grupo exposto à sequência repetitiva exibiu tempos de reação significantemente menores a partir da 70ª tentativa de treino (isso permite explicar porque os tempos de reação desse grupo são menores já no 1º. Bloco de 100 tentativas - Figura 3). Interessantemente, esses voluntários perceberam a existência de um padrão repetitivo na sequência de estímulos apenas a partir da 200ª tentativa, quando seus tempos de reação já eram substancialmente menores.

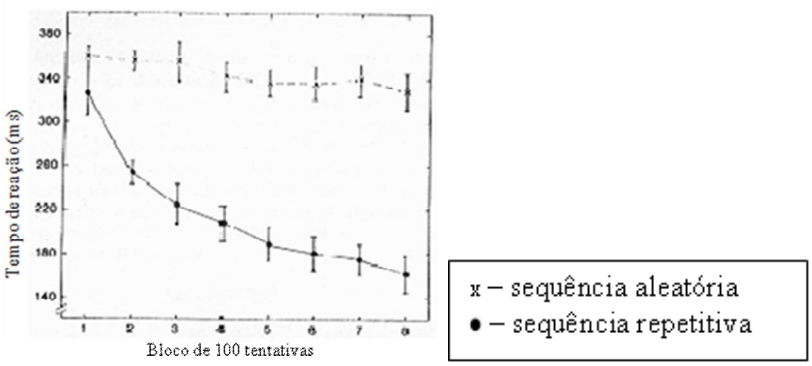


Figura 3 – Tempo de reação em função de Blocos de 100 tentativas de voluntários expostos a uma sequência repetitiva de 10 posições (DBCACBDCBA) e voluntários expostos a uma sequência aleatória (Modificado de Nissen e Bullemer, 1987).

O conhecimento implícito envolvendo aquisição de habilidades motoras pode ser avaliado por meio do desempenho habilidoso da tarefa percepto-motora. Embora a redução do tempo de reação exibida pelo grupo exposto à sequência aleatória seja discreta, ela reflete a familiarização com a tarefa e também a aquisição de associações entre o estímulo apresentado e a resposta correspondente emitida (Willingham, 1992). Uma característica relevante dessa tarefa desenvolvida por Nissen e Bullemer (1987) é que o estímulo em si não varia, o que varia é o padrão de apresentação desse estímulo no espaço.

Hoffmann e Koch (1997) ressaltaram a compatibilidade entre o estímulo e a resposta, i.e., as respostas emitidas pelos sujeitos dependem principalmente do padrão serial de apresentação do estímulo. Essa compatibilidade, dita espacial, é atribuída à relação que se estabelece entre o local onde o estímulo foi apresentado e a resposta emitida pelos sujeitos. Segundo os autores, existe uma tendência a automatização das respostas para o padrão de distribuição espacial do estímulo (Hoffmann e Koch, 1997).

Com relação ao grupo de voluntários que desempenhou a tarefa em que estímulo era apresentado numa sequência repetitiva, sem perceber esse padrão repetitivo, os voluntários exibiram uma capacidade de aprender relações entre os elementos e suas transições dentro das sequências, o que levou a uma diminuição no tempo de reação. Nesse contexto, Seger (1997) ressalta que a aprendizagem implícita consiste na aquisição involuntária de conhecimento sobre regularidades ambientais. Os sujeitos parecem experienciar essa sequência como um padrão repetitivo de distribuição espacial do estímulo. A diminuição do tempo de resposta exibida leva a crer que com base na aprendizagem dessas regularidades, os sujeitos se beneficiam do padrão repetitivo de estímulos o que leva a uma antecipação das respostas.

Por outro lado, Howard e col. (2004) sugeriram que essa informação é adquirida por meio da comparação da representação ativa de sucessivos acontecimentos coincidentes na memória operacional. Segundo o modelo de memória operacional proposto Baddeley (1992), existe um sistema de controle de atenção, a central executiva ou Sistema Atencional Supervisor (SAS),

auxiliado por dois sistemas de suporte responsáveis pelo arquivamento temporário e manipulação de informações, um de natureza vísuo-espacial e outro de natureza fonológica. O SAS conecta os sistemas de suporte à memória de longa duração, sendo responsável pela seleção de estratégias e planos. Sua atividade estaria relacionada ao funcionamento do lobo frontal que teria a função de supervisionar informações a serem codificadas, armazenadas e evocadas, concomitantemente ao seu ingresso no sistema. Nesse contexto, entende-se que a atenção desempenha um papel fundamental no processo de aquisição da informação.

Modelos antecipatórios podem estar pautados em processo atencionais, que além de manifestar-se no domínio motor, contempla aspectos perceptuais do comportamento. Do ponto de vista neurofisiológico, esses modelos geram processos preparatórios que pré-ativam certas estruturas no SNC de maneira a favorecer o processamento de informações. Esses mecanismos neurofisiológicos são tidos como processos seletivos em que há um aumento na ativação de estruturas relevantes para o processamento de determinadas informações e/ou há inibição de estruturas julgadas irrelevantes (Anderson, 1987; Sarter, Givens, Bruno, 2001). Isso faculta escolher ações adequadas a eventos, i.e., gerada a previsão sobre a pendência de um dado evento, pode-se acionar planos de ação adequados antes mesmo da ocorrência desse evento. Em outras palavras, além de planejar uma ação antes de sua execução, fazendo uso de processos antecipatórios, o individuo pode preparar-se para detectar o estímulo (Brunia, 1999).

A possibilidade de se gerar respostas antecipadas remete ao fato de que existe de alguma maneira uma expectativa acerca do padrão serial repetitivo de estímulos. Entende-se por expectativa a representação de um evento esperado e nessa representação estaria armazenado um conjunto de informações espaciais e temporais do evento em questão (Bubic, von Cramon, Schubotz, 2010). De maneira geral, processos atencionais são tidos como modelos antecipatórios muito sofisticados, pois deles resultam a geração de expectativas muito elaboradas (Brunia, 1999).

Em tarefas como a realizada no experimento de Nissen e Bullemer (1987), por exemplo, é provável que exista um processamento preferencial de informações relativas a localização espacial dos estímulos apresentados, pois como dito anteriormente, a distribuição espacial dos estímulos é uma característica do padrão serial altamente relevante. Assim, é possível que se crie expectativas acerca do padrão de distribuição espacial dos estímulos. Os estágios iniciais da aquisição de habilidades motoras envolvendo padrões seriais parecem depender fortemente do direcionamento da atenção, requerendo certo esforço e controle voluntário (Anderson, 1987).

Em estágios mais avançados da aquisição de habilidades motoras, respostas emitidas ao padrão de estímulos geram um padrão regular de movimentos, observável pelo desempenho habilidoso, que requer pouco esforço e controle voluntário. As respostas nesse estágio parecem depender cada vez menos do direcionamento atencional. Isso se deve, pelo menos em parte, ao estabelecimento de um plano motor de alta ordem decorrente do padrão de movimentos executados repetidas vezes. Uma vez estabelecido, o

plano motor assume o controle de respostas repetidas e subsequentes, tornando-as cada vez mais automatizadas e independentes dos estímulos apresentados. Deste modo, é notório que a aprendizagem serial esteja relacionada ao padrão de respostas geradas (Hoffmann e Koch, 1997).

Parece razoável defender que a existência de um plano motor de alta ordem contribui para um mecanismo que ativa estruturas nervosas relacionadas ao processamento sensorial e motor capaz de responder antecipadamente a estímulos apresentados sequencialmente. Dado esse caráter preparatório gerado por planos motores, pode-se concebê-lo como um modelo antecipatório. Neste caso um plano motor parece cumprir função similar a um mecanismo gerador de expectativas, pois nele residem informações provenientes de um padrão regular de movimentos relativos a um padrão repetitivo de estímulos. Em outras palavras isso quer dizer que, em um processo envolvendo respostas repetitivas e subsequenciais, a expectativa é de que um determinado padrão regular de movimentos seja gerado frente a uma sequência de estímulos, pois tendo em vista a maneira pela qual um plano motor é estabelecido, ele garante uma consonância entre o padrão de estímulos apresentados e o padrão de resposta para esses estímulos.

A idéia de gerar respostas antecipatórias com base na expectativa que se tem do padrão serial de estímulos, por exemplo, respostas baseadas num plano motor, parece consistente com o conceito de cópia eferente ou descarga corolária, que é, do ponto de vista anátomo-fisiológico, um exemplo conciso do que vem a ser uma a expectativa. A correlação que se estabelece entre esses dois elementos permite entender como uma expectativa pode ser confirmada

na medida em que uma resposta é gerada, isto é, como ocorre um processo de materialização de uma expectativa (para revisão ver Haddad, 2008; Crapse e Somer, 2008).

A definição do conceito de cópia eferente envolve a distinção de dois tipos básicos de entradas sensoriais que, sobretudo é realizado pelas vias de processamento sensorial. Uma delas se refere a entradas sensoriais geradas pelo ambiente externo, por exemplo, a apresentação de um padrão sequencial de estímulos visuais, que independem dos movimentos gerados pelo organismo. Essa estimulação sensorial é denominada exaferência. Por outro lado, existem as reaferências, que são entradas sensoriais referentes a uma ação motora gerada pelo organismo, por exemplo, ações geradas em resposta a um padrão sequencial de estímulos. Neste caso, as entradas sensoriais são geradas internamente, pois decorrem da própria ação motora executada pelo organismo. Uma vez gerada uma ação motora, o sistema nervoso central (SNC) é constantemente informado, por meio de receptores proprioceptivos, com sinais de retro-alimentação sobre os padrões de movimentos gerados.

Considerando uma ação motora, no momento em que o SNC envia comandos motores aos músculos que, por exemplo, estão envolvidos na resposta motora a um estímulo, concomitantemente uma cópia desse sinal é enviada para áreas responsáveis pelo processamento sensorial desses músculos, dessas partes do organismo. A esse sinal é atribuído o nome de cópia eferente ou descarga corolária. Denota-se que nas áreas responsáveis pelo processamento sensorial dos músculos, além de chegar um sinal de retro-

alimentação sobre os padrões de movimentos gerados, existe também a possibilidade de chegada da cópia eferente.

Com base na presença ou não dessa cópia do comando motor, o sistema sensorial é capaz de distinguir a origem do estímulo. Assim, uma entrada sensorial que por ventura esteja desprovida de uma cópia eferente é considerada pelo sistema sensorial uma exaferência; portanto, esse padrão de estimulação se refere a entradas sensoriais geradas pelo ambiente externo. No entanto, uma entrada de sinal nas vias de processamento sensorial acompanhada de uma cópia aferente seria interpretado por essas vias sensoriais como uma reaferência; portanto, os sinais que estão chegando às vias são provenientes de um padrão de estimulação interno, decorrente de uma resposta gerada pelo organismo. Deste modo, a cópia eferente forneceria um sinal de referência que permite às vias de processamento sensorial comparar e distinguir entradas sensoriais (para revisão ver Haddad, 2008; Crapse e Somer, 2008).

O modelo descrito pode, na medida do possível, ser aplicado ao entendimento de como uma expectativa gerada por meio de um plano motor pode ser confirmada através da execução de uma resposta motora a um estímulo. Em um processo envolvendo treino repetitivo tem-se uma tendência a automatização da resposta, tal qual o descrito anteriormente, um plano motor de alta ordem pode determinar que respostas motoras sejam emitidas a um padrão sequencial e repetitivo de estímulos através de um comando motor enviado aos respectivos músculos e estruturas envolvidos na execução dessa resposta. Essa resposta motora por sua vez, através de mecanismos

proprioceptivos, gera uma estimulação em áreas sensoriais relativas aos músculos envolvidos na resposta, denominada reaferência. Além disso, o plano motor de alta ordem pode também enviar uma cópia do comando motor diretamente para as áreas sensoriais relativas aos músculos envolvidos na resposta desencadeada pelo plano motor, a copia eferente. Quando a entrada sensorial desencadeada por mecanismos proprioceptivos é acompanhada pela cópia eferente, o sistema sensorial é informado de que o padrão de estimulação das vias sensoriais foi desencadeado por um mecanismo interno, i.e., o padrão de estimulação foi desencadeado pela resposta emitida pelo organismo. Uma vez que essa resposta emitida tenha decorrido de comandos gerados pelo plano motor de alta ordem, o sistema sensorial é informado que de fato a resposta gerada pelo organismo corresponde à resposta programada e ordenada pelo plano motor. Neste caso, a expectativa gerada pelo plano motor foi materializada pela resposta decorrente desse plano motor.

Em conclusão, planos motores de alta ordem, uma vez estabelecidos, geram expectativas acerca de qual resposta um organismo deve emitir para um determinado padrão de estimulação. Quando o organismo emite a resposta esperada, ou seja, a resposta programada e ordenada pelo plano motor, o SNC desse organismo consegue identificar que a resposta gerada é compatível com a expectativa que se tem da resposta esperada, e desta forma tem-se uma confirmação da expectativa. Haddad (2008) ressalta a importância da materialização da expectativa; segundo o autor isso é altamente informativo para o organismo, pois quando uma expectativa se confirma, indica que a experiência ou resposta motora gerada é compatível com a expectativa sobre a mesma.

Modelos antecipatórios que fazem uso dos aspectos atencionais são amplamente investigados na literatura. Tendo em vista processos atencionais envolvidos na aprendizagem serial, Cohen, Ivry e Keele (1990) investigaram a aprendizagem de sequências de diferentes níveis complexidade em arranjos experimentais envolvendo tarefas concorrentes. Sequências foram manipuladas a fim de se obter diferentes níveis de dificuldade, associado ou não a uma tarefa concorrente de contagem de tons. Participaram do estudo 3 grupos distintos de voluntários que executaram sequências aleatórias ou estruturadas com ou sem tarefa concorrente (ver Tabela 1). Cada grupo executou um tipo de sequência estruturada, incluindo sequências únicas (com transições únicas, com 5 elementos; e.g., ABCED); sequências ambíguas (sem transições únicas, com 3 elementos; e.g., ABCACB, a transição de C pode ser tanto para A quanto para B); ou sequências híbridas (com transições únicas e não únicas, com 4 elementos; e.g., ADBCAB, os elementos A pode combinar com B ou D, B pode combinar com A ou C. Já os elementos C e D só podem combinar com um elemento, no caso C com A e D com B). Os voluntários executaram a tarefa também com sequências aleatórias que apresentavam o mesmo número de elementos que as sequências estruturadas, mas eles apareciam numa sequência aleatória e imprevisível.

Tabela 01 – Matrizes de probabilidade que determinam as regras e estruturas das transições das sequências aleatórias e estruturadas “única”, “ambígua” e “híbrida”, utilizadas no trabalho de Cohen, Ivry e Keele (1990).

Estruturada
Única (ABCED)

		Elemento “N”				
		A	B	C	D	E
Elemento “N” + 1	A				20%	
	B	20%				
	C		20%			
	D					20%
	E			20%		

Aleatória

		Elemento “N”				
		A	B	C	D	E
Elemento “N” + 1	A		5%	5%	5%	5%
	B	5%		5%	5%	5%
	C	5%	5%		5%	5%
	D	5%	5%	5%		5%
	E	5%	5%	5%	5%	

Estruturada
Ambígua (ABCACB)

		Elemento “N”		
		A	B	C
Elemento “N” + 1	A		16,67%	16,67%
	B	16,67%		16,67%
	C	16,67%	16,67%	

Aleatória

		Elemento “N”		
		A	B	C
Elemento ‘N’+ 1	A		16,67%	16,67%
	B	16,67%		16,67%
	C	16,67%	16,67%	

Estruturada
Híbrida (ADBCAB)

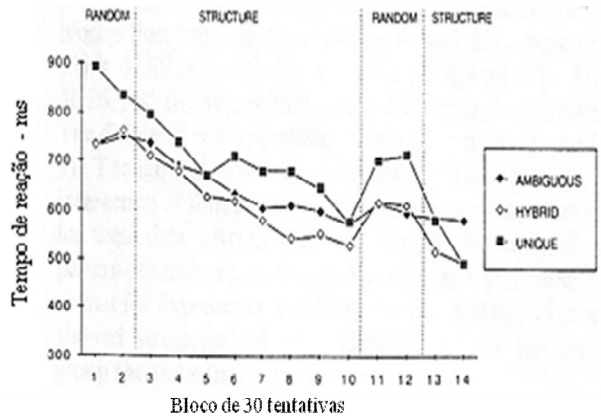
		Elemento “N”			
		A	B	C	D
Elemento “N” + 1	A		16,67%	16,67%	
	B	16,67%			16,67%
	C		16,67%		
	D	16,67%			

Aleatória

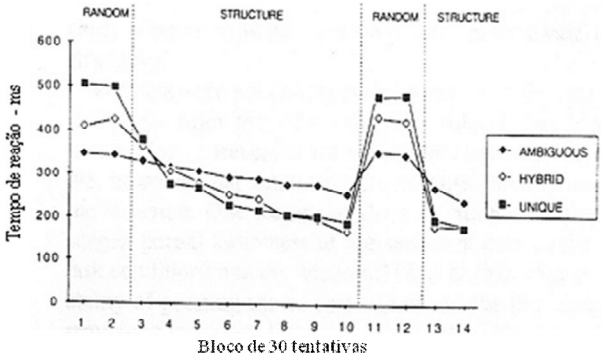
		Elemento “N”			
		A	B	C	D
Elemento “N” + 1	A		8,33%	8,33%	8,33%
	B	8,33%		8,33%	8,33%
	C	8,33%	8,33%		8,33%
	D	8,33%	8,33%	8,33%	

Os resultados desse estudo são mostrados na Figura 4A. Observa-se que os participantes aprenderam sequências híbridas e únicas juntamente com tarefas concorrentes; entretanto, o mesmo não ocorreu em relação as sequências ambíguas. Os autores encontraram que há prejuízo significativo no desempenho quando a sequência estruturada é substituída pela sequência aleatória apenas nos grupos treinados com sequências únicas e híbridas, e não para os treinados com a sequência ambígua. Houve uma diminuição no tempo de reação dos voluntários ao realizarem sequências estruturadas (bloco 3 ao 10). Nos blocos 11 e 12 os estímulos apresentados em sequência repetitiva foram substituídos por estímulos em sequência aleatória; nos blocos 13 e 14 os estímulos ocorreram novamente na respectiva sequência estruturada.

A Figura 4B mostra o resultado do desempenho quando não há tarefa concorrente. Os grupos treinados com os três tipos de sequência exibem prejuízo significativo; por conseguinte, os autores defenderam que os participantes foram capazes de aprender os 3 tipos de sequências sob essas condições experimentais. As alterações de sequências apresentadas seguiram o mesmo padrão anterior. Houve também uma diminuição no tempo de reação dos voluntários ao realizarem sequências estruturadas (bloco 3 ao 10). Nos blocos 11 e 12 os estímulos apresentados em sequência repetitiva foram substituídos por estímulos em sequência aleatória; nos blocos 13 e 14 os estímulos ocorreram novamente na respectiva sequência estruturada.



A



B

Figura 4 – **(A)** Tempo de reação para sequências de estrutura única, híbrida e ambígua. Desempenho juntamente com tarefa concorrente de contagem de sons. **(B)** Tempo de reação para sequências de estrutura única, híbrida e ambígua, sem a tarefa concorrente de contagem de sons. Extraído de Cohen, Ivry e Keele (1990).

A estratégia de substituir as três sequências estruturadas por sequências aleatórias diferentes leva a mudanças significativas na estrutura das transições. Por exemplo, na sequência com estrutura única, as transições que tem “A” como primeiro elemento exibe 20% de probabilidade do próximo elemento ser “B”. No entanto, na sequência de estrutura aleatória, a probabilidade de transição do elemento “A” para o elemento “B” é de 5%, ou seja, é um evento menos provável. A passagem da sequência estruturada única para sua correspondente sequência aleatória leva a uma maior perda de

informações do que em relação a sequências híbridas. Já a passagem da sequência estruturada ambígua para sua correspondente sequência aleatória, não leva a grandes alterações nas probabilidades de transição dos elementos da série.

No momento em que há substituição das sequências estruturadas pelas respectivas sequências aleatórias há um aumento no tempo de reação. Observa-se, porém, que o maior prejuízo ocorre na transição envolvendo sequências únicas, seguido pelas sequências híbridas e, por último, as sequências ambíguas (em que não há prejuízo quando desempenhada junto com a tarefa concorrente). Isso leva a crer que uma vez alteradas as probabilidades das transições e as possibilidades de combinação que formam as transições, é alterada a taxa de aprendizagem. Quanto maior a probabilidade de um evento ocorrer numa sequência, mais previsível ele é, e portanto, menor é o tempo de reação dos voluntários.

Posteriormente o conceito de probabilidade condicional ou probabilidade bayesiana embasou muitos estudos em tarefas de tempo de reação serial que utilizaram sequências estruturadas por arranjos de probabilidades (Remillard e Clark, 2001). A probabilidade condicional é uma medida formal da chance de ocorrência de um evento seguinte Xi dado o elemento anterior Xi-1, p(Xi|Xi-1). Essa estrutura p(Xi|Xi-1) é denominada probabilidade de primeira ordem (um elemento anterior definindo a probabilidade do elemento seguinte). Podem ser definidas as probabilidades condicionais de ordem mais altas, como a probabilidade de segunda ordem: a chance de Xi dado dois elementos anteriores Xi-1 e Xi-2, p(Xi|Xi-1;Xi-2).

Segundo Remillard e Clark (2001), o desempenho de indivíduos na tarefa de tempo de reação serial estaria ligado à previsibilidade dos eventos dada pelos valores de probabilidade das transições. Neste caso, quanto maior a previsibilidade, dada pela probabilidade alta, menor será o tempo de reação. O uso do modelo de probabilidade condicional consegue avaliar o impacto da complexidade das sequências (expressos nas diferentes probabilidades de transição) no desempenho de sujeitos em tarefas de tempo de reação serial e a partir disso consegue também gerar previsões acerca do desempenho (Remillard e Clark, 2001).

No entanto, Pavão (2011), e Pavão e colaboradores (em preparação), ressaltaram as limitações da aplicação do conceito de probabilidade condicional à aprendizagem serial. Seu primeiro argumento refere-se à probabilidade de primeira ordem. Na sequência 121212121212123412, por exemplo, as probabilidades de primeira ordem que preveriam os tempos de reação das respostas apenas para os estímulos 2 e 4 são iguais, dadas por p(2|1)=1.00 e por p(4|3)=1.00. De acordo com a idéia de que quanto maior a previsibilidade, menor seria o tempo de resposta a um estímulo, seria esperado que os tempos de resposta durante uma tarefa de tempo de reação serial aos estímulos 2 e 4 seriam os mesmos. Porém, se tal experimento fosse posto em prática, muito provavelmente a resposta para o evento 2 seria mais rápida do que para o evento 4. Isso deve ao fato de que o evento 2 é mais frequente do que o evento 4. Outro argumento apresentado pelos autores é que o modelo de probabilidade condicional não permite comparar o tempo de reação relativo à probabilidade de transição de mesma ordem em experimentos diferentes. Por exemplo, nos experimentos de Remillard e Clark (2001) foram utilizadas duas

condições diferentes, uma com 4 e outra com 6 botões como possibilidade de resposta ao estímulo apresentado. Dessas duas condições resultaram medidas diferentes de tempo de reação para os mesmos valores de probabilidade condicional. Mesmo que haja uma forte correlação entre a probabilidade condicional de cada evento e o tempo de reação, esse modelo não é capaz de explicar situações em que o desempenho não é dado somente pelas probabilidades, como é o caso dos experimentos citados acima, em que havia duas condições diferentes de ações envolvidas na resposta (4 ou 6 botões relativos a resposta). Assim, Pavão e colaboradores (em preparação) defendem que o modelo de probabilidade condicional não é capaz de explicar aspectos globais que determinam o desempenho de indivíduos em tarefas de tempo de reação serial.

Cleeremans e McClelland (1991) já haviam questionado a capacidade que esses modelos têm de representar a aprendizagem serial envolvendo relações de probabilidade. Segundo esses autores tais modelos assumem que de alguma maneira os indivíduos apresentam um desempenho baseado nas probabilidades condicionais das transições entre um estímulo e outro. No entanto, tais modelos falham ao mostrar como os indivíduos elaboram representações ou computam essas regras, i.e., eles não informam como o processamento de informações ocorre de fato.

O Conceito de Entropia Informacional aplicada ao aprendizado de sequências

Pavão (2011), e Pavão e colaboradores (em preparação) correlacionaram o desempenho de voluntários em tarefas de tempo de reação serial com uma medida de complexidade das sequências, a entropia informacional.

Baseado na "Teoria Matemática da Comunicação" desenvolvida por Shannon (1948), o conceito de entropia informacional relaciona a probabilidade de ocorrência de um determinado evento à quantidade de informação presente em uma sequência de eventos. Ao conceber o conceito de entropia informacional, Shannon (1948) definiu formalmente qual seria a mínima quantidade de informação necessária para representar todos os símbolos de uma mensagem conhecida; com isto ele tentaria otimizar uma codificação para a mensagem. O cálculo proposto por Shannon (1948) determina um valor, em "bits", para a codificação ótima possível. Numericamente, o valor em "bits" seria o número mínimo de algarismos que, em base dois, seria necessário para representar o conjunto de itens ou eventos que compõe a mensagem. A concepção por trás desta idéia pode ser vista integralmente no estudo de Pavão e colaboradores (em preparação).

Tomemos um primeiro caso em que uma fonte gera mensagens com os eventos A, B, C e D com mesma probabilidade. Neste caso seria necessário o uso de 2 bits/evento (e.g., "11" para A, "10" para B, "01" para C e "00" para D); esse é o limite mínimo de bits para representação de uma mensagem envolvendo esses quatro eventos com a mesma probabilidade de 1/4 cada.

Igualmente em uma série de 8 eventos tem-se algo como AABBCCDD, que exige o uso de 16 bits para ser representada. A determinação de que este seria o limite mínimo de bits é dado pela necessidade de que seja possível escrever uma série de N itens da maneira mais concisa e que, ainda assim, seja possível identificar individualmente cada um dos itens da sequência, ou seja que esta seja inequivocamente decodificável. No entanto, se a probabilidade de aparecimento de cada um dos mesmos quatro itens fosse diferente, não necessariamente a forma mais sucinta de representação se manteria. Se esses eventos aparecessem com a probabilidade de A com 1/2, B com 1/4, C com 1/8 e D com 1/8, respeitando esses valores de probabilidades espera-se que a mensagem de oito eventos seria algo como AAAABBCD. Neste caso o uso da codificação anterior deixará de ser o modo mais econômico (vale ressaltar que se fosse aplicada a proposta anterior esta ainda demandaria os mesmos 16 bits para a sua representação). Neste caso seria mais econômico e ainda garantiria que as representações fossem inequivocamente decodificáveis (i.e., que uma série longa de bits que tenha uma única possibilidade de leitura) se fosse adotado uma representação distinta, (“1” para A, “01” para B, “001” para C e “000” para D). Aplicando essa codificação, a mensagem AAAABBCD seria 11110101001000, que apresenta 14 bits (média de 1.75 bits/evento) e economia de 2 bits em relação à codificação anterior. Isto é possível pois apesar de haver os mesmos oito itens de antes, agora é muito mais comum encontrarmos “A” e muito menos comum encontrarmos “C” e “D”, o que nos permite economizar espaço de codificação como o uso de apenas 1 bit para “A” e de três bits para “C” e “D”.

Os valores obtidos para cada um dos exemplos, de 2 bits ou de 1.75 bits, são medidas de incerteza global da fonte, e a esta medida se aplica o termo “entropia informacional”. A entropia informacional de cada evento e da mensagem, são respectivamente, o número de bits de cada evento e o número médio de bits/evento, e podem ser calculados pela aplicação do método de Shannon (1948). Denota-se que a noção de “informação” está associada à probabilidade de ocorrência de um evento numa série de eventos. De acordo com os conceitos da Entropia Informacional um evento é informativo quando, numa série de eventos, ele é pouco provável e de alta complexidade. Isto é, se ele é pouco provável na série ele é informativo por não ser previsível. Na prática isso quer dizer que são necessários mais bits para representá-lo. Por outro lado, se este evento possui alta probabilidade de ocorrência, ele torna-se muito previsível na série, portanto pouco informativo e de baixa complexidade. Assim menos bits são necessários para representá-lo. Neste caso, há uma relação inversa entre a probabilidade de um evento ocorrer e a quantidade de informação dessa série. Quanto menor a probabilidade de ocorrência de um evento numa série, maior será a entropia informacional dessa série.

Através do cálculo da Entropia informacional é possível obter a quantidade de informação de um evento isolado na série e também a quantidade de informação da série como um todo. Para Shannon (1948), **H** é uma medida da entropia informacional, **pi** é a probabilidade de ocorrência de um evento **i** dentre vários possíveis numa série, e **fr** é a freqüência relativa desse evento. A entropia associada a um evento **i** inserido numa sequência de eventos é definida pelo logaritmo na base 2; dessa forma a entropia será expressa em bits como medida. O **h** indica a quantidade de incerteza contida

em um único evento da série, e é baseada na probabilidade de sua ocorrência. Então temos que:

$$\mathbf{h = - \log_2 (1/fr)}$$

H é uma medida ponderada da quantidade de informação contida numa sequência completa, calculada com base em todos os **h**. A entropia **H** em termos de probabilidades, aplica-se também no caso em que os diferentes eventos têm probabilidades diferentes. Se tivermos vários eventos possíveis, cada um com probabilidade de ocorrência **pi**, a quantidade de informação **H** é dada por:

$$\mathbf{H = - \Sigma\ pi \log_2 (1/fr)}$$

Esse constructo pode ser utilizado para medir a quantidade de informação disponível em uma dada sequência. Por exemplo, cada evento apresentado na tarefa de tempo de reação serial possui uma determinada probabilidade de ocorrer; por conseguinte, cada evento possui uma quantidade de informação, expressa por **h**. A probabilidade de ocorrência de cada evento (estímulo) numa sequência determina a complexidade dessa sequência, i.e., a medida de informação **H** de uma sequência como um todo depende da quantidade de informação em cada evento. A Tabela 2 exemplifica o cálculo da entropia h de cada evento isolado e da série inteira.

Tabela 2. Cálculo da entropia h dos eventos (estímulos) e da série H, da sequência estruturada DBCACBDCBA, utilizada no experimento de Nissen e Bullemer (1987).

Evento	Freqüência absoluta (fa)	Freqüência relativa (fr)	Entropia do evento $h = \log_2(1/fr)$	Entropia do evento ponderada para a série	Entropia da série $H = \Sigma\ pi \log_2 (1/fr)$

				fr * h	
A	2	0.20	h_A = 2.32 bits	0.46	1.93 bits
B	3	0.30	h_B = 1.74 bits	0.52	
C	3	0.30	h_C =1.74 bits	0.52	
D	2	0.20	h_D =2.32 bits	0.46	

Se os eventos da série estiverem organizados de modo estruturado deve-se considerar essa estrutura (ver Tabela 3). Ordem refere-se à quantidade de elementos estruturados numa série. Por exemplo, uma série cujos elementos são A, B, C, D etc, na ordem 0 os eventos aparecem separadamente (A, B, C, D), na ordem 1 os eventos aparecem agrupados dois a dois (AB, AC, AD etc), na ordem 2 os elementos aparecem agrupados três a três (ABA, ABC, ABD etc), e assim por diante.

Tabela 3. Cálculo da entropia dos eventos e da série, da sequência estruturada DBCACBDCBA (apenas um ciclo) utilizada no estudo de Nissen e Bullemer (1987).

Ordem	Evento	Freqüência absoluta (fa)	Freqüência relativa (fr)	Entropia do evento (h) $\log_2(1/fr)$	Entropia do evento ponderada para a série fr*h	Entropia da série (H)
0	A	2	0.20	h_A = 2.32 bits	0.46	H_0 = 1.93 bits
	B	3	0.30	1.74 bits	0.52	
	C	3	0.30	1.74 bits	0.52	
	D	2	0.20	2.32 bits	0.46	
1	AC	1	0.11	h_{AC} = 3.17 bits	0.35	H_1 = 2.95 bits
	BA	1	0.11	3.17 bits	0.35	

	BC	1	0.11	3.17 bits	0.35	
	BD	1	0.11	3.17 bits	0.35	
	CA	1	0.11	3.17 bits	0.35	
	CB	2	0.22	2.17 bits	0.48	
	DB	1	0.11	3.17 bits	0.35	
	DC	1	0.11	3.17 bits	0.35	
2	ACB	1	0.13	h_{ACB} = 3.00 bits	0.38	H_2 = 3.00 bits
	BCA	1	0.13	3.00 bits	0.38	
	BDC	1	0.13	3.00 bits	0.38	
	CAC	1	0.13	3.00 bits	0.38	
	CBA	1	0.13	3.00 bits	0.38	
	CBD	1	0.13	3.00 bits	0.38	
	DBC	1	0.13	3.00 bits	0.38	
	DCB	1	0.13	3.00 bits	0.38	

Sequências de eventos podem variar no que diz respeito à entropia informacional, ou seja, na probabilidade de ocorrência de determinados eventos. O conceito de entropia informacional de Shannon (1948), com rigor matemático, possibilita avaliar a quantidade de informação que define o padrão formal de uma sequência de eventos. O nível de complexidade extraído de uma sequência através dos devidos cálculos, reflete as regras e padrões que determinam como os elementos estão organizados de maneira a gerar uma sequência. Conforme dito no início do texto, esses padrões detêm combinações de informações temporais e espaciais que podem favorecer a previsão de eventos e suas consequências. A variação da probabilidade de ocorrência de eventos numa série pode, com maior ou menor intensidade, determinar o desempenho do sujeito durante o desempenho de tarefas

envolvendo aprendizagem de sequências, pois na medida em que um evento se torna mais provável ele também se torna mais previsível, possibilitando a preparação da resposta quando da sua pendência.

Estudos envolvendo tarefa de tempo de reação serial em ratos

Diversos estudos já demonstraram a capacidade que ratos têm de aprender sobre o padrão de organização de uma sequência de estímulos. Existe um especial interesse em como o sistema nervoso é capaz de processar tais padrões seriais de maneira a tornar esses animais proficientes em tarefas que envolvam a organização sequencial do comportamento (ver Robbins, 2002; Domenger e Schwarting, 2007; Schwarting, 2008).

Tendo em vista a aprendizagem serial, bem como as regras e estruturas que determinam padrões, tarefas de tempo de reação serial envolvendo ratos vêm sendo utilizadas para investigar mecanismos de associações de estímulos e respostas, controle atencional e estruturas nervosas subjacentes, assim como o efeito de drogas sobre essas funções. Por sua vez, a esses mecanismos atencionais, potencialmente envolvidos no desenvolvimento de estratégias comportamentais antecipatórias, associa-se a organização e processamento de informações aprendidas durante a elaboração de respostas antes mesmo de sua execução (Schwarting, 2008).

Muitos dos atributos das tarefas de tempo de reação serial para humanos são também válidos para tarefas envolvendo ratos. Os conceitos que embasam a tarefa para humanos são em grande parte aplicados à tarefa para ratos. A

partir das semelhanças existentes entre as duas tarefas, várias correlações podem ser estabelecidas entre elas, inclusive no plano teórico. Por exemplo, de maneira análoga a tarefa desenvolvida por Nissen e Bullemer (1987) para humanos, ratos têm que emitir respostas motoras para uma a série de estímulos visuais que lhes são apresentados. O local onde esses estímulos são apresentados varia permanentemente de maneira a se produzir diferentes padrões seriais de apresentação. Diferentes padrões de apresentação serial dos estímulos podem influenciar de diferentes maneiras as respostas emitidas pelos animais. Sob esse aspecto se concentram parâmetros críticos relacionados a tarefa de tempo de reação serial que caracterizam o aprendizagem serial: tempo de reação e acurácia das respostas (Nissen e Bullemer, 1987).

Diversos trabalhos demonstraram que ratos emitem respostas mais rápidas e precisas quando o padrão de apresentação dos estímulos segue uma ordem sequencial e regular em comparação com uma condição aleatória de apresentação dos estímulos (Domenger e Schwarting, 2005; 2006; 2007). Em outras palavras, pode-se dizer que os animais exibem um prejuízo no desempenho quando um padrão sequencial estruturado é substituído por um padrão aleatório. Essa correlação existente entre o padrão serial da sequência e o tipo de resposta exibida pelos animais denota a capacidade que ratos têm de aprender sobre padrões seriais, organizar sequencialmente o comportamento e principalmente antecipar eventos. A compreensão de como os animais aprendem sobre padrões formais que determinam a organização de uma sequência de estímulos, torna ainda mais direta essa correlação.

Em condições aleatórias de apresentação do estímulo, tal como ocorre com humanos, ratos também estabelecem associações entre o estímulo apresentado e a resposta correspondente emitida. Nessas condições não há como gerar previsões acerca do padrão serial de estímulos. Já em condições em que um padrão estruturado define a sequência de apresentação dos estímulos, é possível gerar previsões acerca do padrão serial dos estímulos (Willingham, 1992). Nesse sentido a mesma relevância que o padrão de distribuição espacial dos estímulos tem em tarefas com humanos (ver explicações anteriores, e.g., Hoffmann e Koch, 1997), pode também ser atribuída ao padrão de distribuição espacial dos estímulos na tarefa envolvendo ratos, pois o que de fato varia é o local de apresentação do estímulo.

Em uma condição em que os estímulos são apresentados segundo uma sequência estruturada definida, as respostas emitidas pelos ratos dependem principalmente desse padrão serial de apresentação dos estímulos que, sobretudo atende a uma distribuição espacial. Desta forma, é estabelecida uma relação muito forte entre o local de apresentação do estímulo e a resposta emitida pelos ratos. Dada essa relevância do local onde os estímulos são apresentados, parece razoável afirmar que em estágios iniciais da aquisição de habilidades motoras, informações relativas a localização espacial dos estímulos apresentados sejam processadas preferencialmente através do direcionamento atencional, possibilitando que os animais gerem respostas antecipadas aos estímulos. Conforme dito anteriormente, processos atencionais envolvem modelos antecipatórios eficientes, pois deles resultam pré-ativação de certas estruturas no SNC de maneira a favorecer o processamento de determinadas

informações e/ou inibição de estruturas julgadas irrelevantes (Anderson, 1987; Sarter, Givens, Bruno, 2001).

Já em estágios mais avançados, em que o padrão regular de movimentos gerados a partir do padrão regular de estímulos caracteriza um desempenho habilidoso e automatizado na tarefa, a aprendizagem serial está intensamente relacionada ao padrão de respostas geradas e de certa forma mais independente do padrão de estímulos apresentados. Tal automatização das respostas reflete a formação de um plano motor de alta ordem decorrente da aprendizagem sobre regularidades do padrão de movimentos executados repetidas vezes. Consequentemente, na formação de um plano motor de ordem elevada, estruturas nervosas relacionadas ao processamento sensorial e motor geram mecanismos de pré-ativação conferindo aos animais a capacidade de responder antecipadamente a estímulos apresentados sequencialmente (Hoffmann e Koch, 1997).

De maneira geral, tempos de reação reduzidos e elevadas taxas de acertos no desempenho da tarefa de tempo de reação serial associado a um padrão estruturado de sequências de estímulos, sugere que de alguma maneira os animais melhoram seu desempenho e antecipam eventos, seja por meio do direcionamento atencional nos estagio iniciais, seja pela automatização das respostas em estágios mais avançados. Portanto, a capacidade que ratos têm de aprender sobre padrões seriais determinam que as respostas emitidas por eles a um padrão estruturado sejam mais eficientes do que as respostas emitidas para estímulos apresentados aleatoriamente.

Domenger e Schwarting (2007) investigaram, por meio de uma modificação da tarefa de tempo de reação serial, os efeitos de uma alteração na estrutura da sequência previamente treinada, sobre o desempenho de ratos, almejando com isso avaliar o direcionamento da atenção após automatização da resposta aos estímulos da sequência. A tarefa foi realizada em uma caixa contendo quatro buracos, cada qual com uma luz que poderia ser acesa sob o controle de um computador. Os ratos deveriam focinhar o buraco cuja luz acendia. A ordem de acendimento de buracos era controlada de modo a se gerar sequências estruturadas. Foram utilizadas uma sequência fixa "3-2-4-1-3-4-2-1-2-3-1-4" e uma sequência idêntica, mas com uma violação no 9º elemento, pela exclusão do elemento presente nessa posição. Como resultado dessa alteração na sequência original pode-se obter uma sequência fixa como essa: "3-2-4-1-3-4-2-1-3-1-4-3" (se a exclusão resultasse num elemento repetido em relação ao anterior, este também era excluído).

A tarefa em si consistia em sessões diárias de 30 minutos, sendo que no intervalo de 0-10 minutos os animais foram expostos à sequência fixa. No intervalo de 10-30 minutos a sequência com violação foi alternada com a sequência fixa de modo que 52% das sequências eram violadas e 48% eram fixas. Ao completarem uma sequência correta, os ratos recebiam reforço e então iniciava-se outra sequência. O tempo de reação (TR) desde o aparecimento do estímulo até a inserção do focinho no buraco correspondente foi registrado com precisão de milissegundos. Foi considerada também a porcentagem de respostas corretas emitidas pelos animais.

As respostas emitidas pelos animais ao buraco cuja luz acendeu estavam, na maioria das vezes, corretas, inclusive nas sequências violadas. A violação interferiu no tempo de reação devido à incompatibilidade entre o estímulo esperado e o estímulo efetivamente apresentado (ver Figura 5).

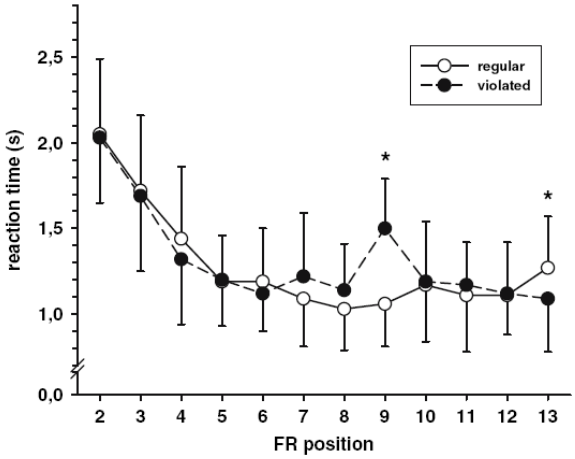


Figura 5. Média de tempo de reação dos 8 ratos nas sequências fixa e violada durante o intervalo de tempo de 10-30 minutos em que as sequências foram alternadas. Os autores desconsideraram o tempo de reação ao 1º item da sequência, pois os ratos demoravam a responder após terem recebido o reforço (16.0 ± 1.9 s) (Extraído de Domenger e Schwarting 2007).

Segundo os autores, este aumento do tempo de reação reflete o esforço cognitivo de inibir a resposta motora treinada (para o 9º item da sequência fixa) e de ativar a resposta motora alternativa (para o novo item da sequência violada). Os autores afirmam ainda que o fato de animais exibirem altas taxas de acerto mesmo quando a sequência foi violada, caracteriza um direcionamento atencional para a sequência de estímulos. No entanto, os animais exibiram também respostas, erradas, para o 9º elemento da antiga sequência (não violada). O tempo de reação dessas respostas erradas foi reduzido quando comparado com a resposta para o 9º elemento da série violada. Uma interpretação para tal fenômeno é a possibilidade dos animais

não estarem apenas atendendo à sequência de estímulos e sim respondendo de maneira automatizada com base em planos motores estabelecidos.

Deve-se considerar, porém, que a alteração da sequência altera sua complexidade, modificando a entropia informacional presente na sequência. Os autores restringiram sua discussão à alteração da demanda cognitiva imposta pela alteração na sequência. Ainda assim apenas dois padrões distintos de sequências são considerados: um único padrão estruturado (com ou sem violação) e um padrão aleatório. De acordo com os autores, a alteração no desempenho apresentado pelos animais está associado a mudança de um padrão para outro (Domenger e Schwarting, 2005; 2006; 2007; Schwarting, 2008).

De maneira geral, pouco ou nada é discutido sobre a possível influência da complexidade da sequência sobre o desempenho dos animais. Diferentemente das tarefas e discussões apresentadas em trabalhos envolvendo ratos, há, em tarefas com humanos, uma ampla discussão acerca de como diferentes padrões de complexidade podem influenciar a aprendizagem de sequências (Nissen e Bullemer, 1987). Conforme dito anteriormente, muitos desses trabalhos se valem de padrões embasados pelas relações de probabilidade de ocorrência entre um estímulo e outro (Cleeremans e Jimenez, 1998). Entende-se que o desempenho de indivíduos na tarefa de tempo de reação serial está ligado à previsibilidade dos eventos dada pelos valores de probabilidade das transições. Neste caso, quanto maior a previsibilidade, dada pela probabilidade alta, menor será o tempo de reação (Remillard e Clark, 2001). Adicionalmente, o conceito de entropia informacional

relaciona a probabilidade de ocorrência de um determinado evento à quantidade de informação presente em uma sequência de eventos e essa quantidade de informação, por sua vez, denota o grau de complexidade da sequência de eventos.

Uma vez que sistemas nervosos são sensíveis às probabilidades de ocorrência de eventos ambientais e, com base nessas informações, organizam temporalmente o comportamento favorecendo a adaptação (Harrison e col. 2005), o desenvolvimento de tarefas para ratos que tomem como base aprendizagem de sequências ordenadas segundo relações de probabilidade de ocorrência entre um estímulo e outro, pode beneficiar-se tremendamente da aplicação dos instrumentos da entropia informacional para sua análise.

Cabe ressaltar que o modelo de entropia informacional aplicado a aprendizagem serial traz a possibilidade de se analisar e discutir de maneira mais ampla e eficiente a estrutura de uma sequência de eventos utilizada e seus possíveis impactos na organização sequencial do comportamento de ratos. Tal abordagem permite inclusive correlacionar medidas de complexidade com medidas do desempenho apresentado na tarefa de tempo de reação serial de maneira a gerar previsões acerca do comportamento de ratos na tarefa.

Com efeito, o uso do conceito de entropia informacional em estudos envolvendo aprendizagem serial permite até mesmo discutir uma questão levantada pelos autores Cleeremans e McClelland, (1991) sobre qual seria o limite da quantidade de informação sequêncial que um organismo pode armazenar e processar.

Nos experimentos 1 e 2, que se seguem, serão apresentadas e discutidas variações do desempenho de ratos em tarefas de tempo de reação serial envolvendo sequências com diferentes níveis de complexidade. Conforme dito anteriormente, em processos de aprendizagem serial ocorre a aquisição de informações espaciais e temporais que definem o padrão serial de uma sequência de estímulos. Sobretudo, ocorre também a aprendizagem sobre as relações de probabilidades de ocorrência entre um estímulo e outro. Assim, diferentes padrões de apresentação serial dos estímulos podem influenciar de diferentes maneiras as respostas emitidas pelos animais.

O desempenho dos animais diante dessas sequências pode ser avaliado mediante modificações sutis do protocolo experimental. Muitas dessas modificações consistem na manipulação da estrutura das sequências de estímulo. Dessa forma pode-se obter sequências mais previsíveis ou sequências menos previsíveis. Ou então, de acordo com o conceito de entropia informacional aqui utilizado, pode-se obter sequências mais complexas e sequências menos complexas, com maior ou menor quantidade de informação. Caracterizar formalmente a medida de complexidade de uma sequência de estímulos, possibilitaria ainda correlacionar os padrões seriais obtidos com o desempenho dos animais na tarefa.

Objetivos

No presente estudo pretendeu-se avaliar em que extensão o conceito de entropia informacional [formalizado por meio de um modelo matemático proposto por Shannon (1948) no contexto da teoria da comunicação] permite prever o desempenho de ratos em tarefas de tempo de reação serial (TRS) envolvendo sequências com diferentes níveis de complexidade. Objetivou-se analisar ainda o impacto de diferentes níveis de complexidade, considerando-se as ordens de entropia informacional das sequências, no desempenho dos animais.

Paralelamente, o presente projeto teve como objetivo desenvolver um protocolo experimental com maior controle sobre a estrutura das sequências, algo ainda não utilizado na literatura da área, através de um procedimento análogo ao empregado em seres humanos envolvendo aprendizagem sequencial, cuja construção de padrões sequenciais baseia-se nos arranjos de probabilidade das transições de um estímulo para outro.

Experimento 1

APRENDIZAGEM DE SEQUÊNCIAS E TEMPO DE REAÇÃO SERIAL, EM RATOS.

Ratos submetidos a sessões de treino numa tarefa de tempo de reação serial envolvendo sequências aleatórias de estímulos, foram, em seguida, expostos a sessões de teste envolvendo sucessivas apresentações de uma única sequência fixa de estímulos (13241324); por fim, esses animais foram novamente submetidos a sessões cujas sequências de estímulos eram aleatórias. Esse tipo de arranjo experimental é usualmente empregado em experimentos envolvendo humanos; neste caso, entretanto, as variações de sequências aleatórias, para sequências estruturadas e então sequências aleatórias novamente, são feitas dentro de uma única sessão (Nissen e Bullemer, 1987; Cohen, Ivry e Keele, 1990; Reed e Johnson, 1994; Cleeremans e Jimenez, 1998; Remillard e Clark, 2001; Pavão e col., em preparação). Esse arranjo experimental revela pelo menos três efeitos importantes: (1) benefício por aprendizado de associações percepto-motoras comumente observadas na reação a cada item nas sequências aleatórias iniciais; (2) benefício do aprendizado do padrão serial durante a execução das sequências fixas repetitivas e, por fim, (3) prejuízo do desempenho quando a sequência fixa repetitiva é substituída pela sequência aleatória. Vale ressaltar que todos esses efeitos são revelados por meio da análise dos tempos de reação, que variam de acordo com as respectivas condições.

O desenvolvimento de um protocolo para tarefas de tempo de reação serial em ratos envolvendo a aprendizagem serial de uma sequência (como é o caso da sequência fixa 13241324 utilizada no presente experimento), possibilita que outras sequências, com diferentes níveis de complexidades, possam ser utilizadas nesse tipo de arranjo experimental. Assim, seria possível correlacionar os diferentes níveis de complexidade das sequências com o desempenho dos ratos na tarefa.

MATERIAL E MÉTODO

Animais

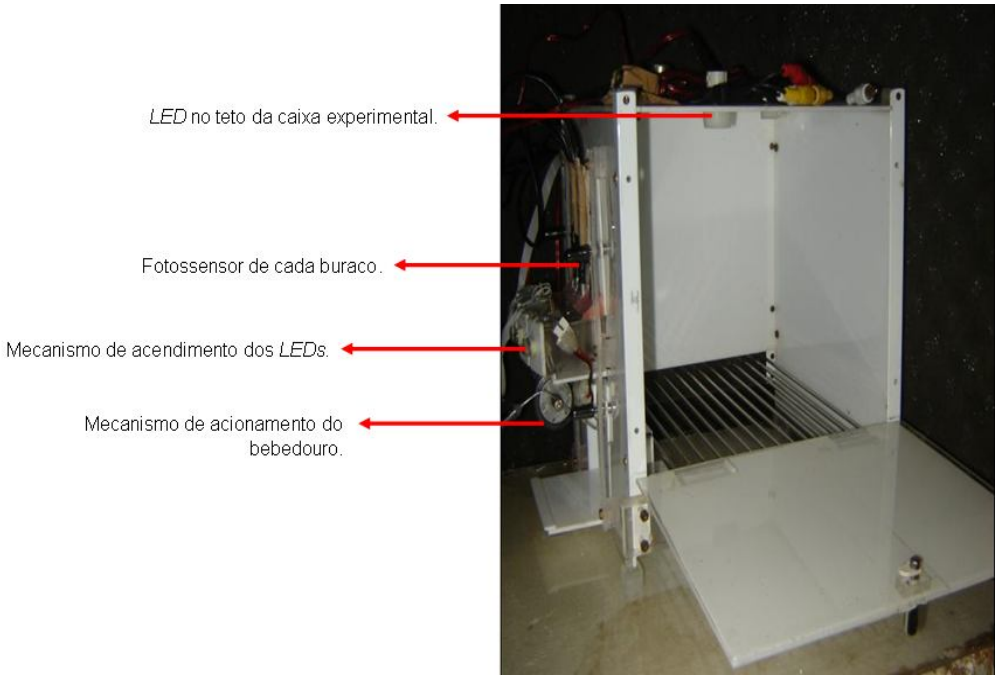
Foram utilizados 8 ratos machos da linhagem Wistar, com 3 meses de idade no início do experimento, alojados em gaiolas convencionais (4 animais em cada gaiola-residência). Os animais foram fornecidos pelo biotério do Departamento de Fisiologia do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo e ficaram submetidos a um ciclo claro/escuro de 12-12h (luzes acesas às 7h00).

Uma semana antes do início do experimento e durante toda sua execução, os animais foram submetidos a um regime de privação alimentar controlado: água *ad libitum* e 18 g (± 0,4) de ração por dia, por animal, fornecida assim que o último animal terminasse a sessão de treino ou sessão de teste.

Aparelho experimental

Foi utilizada uma caixa de condicionamento operante de acrílico, branca, medindo 26 x 26 x 26 cm e composta por dois módulos internos (um conjunto de 4 buracos e um bebedouro) e três módulos externos (o mecanismo de acionamento do bebedouro, o mecanismo de funcionamento dos *LEDs* - do inglês: Diodo Emissor de Luz) utilizados na sinalização (Figura 6A), e fotossensores que permitem detectar a inserção do focinho nos buracos, posicionados na entrada dos mesmos. Cada um dos 4 buracos é confeccionado com um tubo quadrado de aço inoxidável medindo 2,5 cm de lado e 4,5 cm de comprimento. Os 4 buracos estão dispostos lado a lado, horizontalmente (Figura 6B). Na parte de trás de cada um dos buracos existem *LEDs* brancos que podem ser ligados por curtos períodos de tempo (com precisão de milissegundos) e emitir uma luz de 200 lux (medida na entrada do buraco), sob controle de um microcomputador. A 0,5 cm da entrada de cada buraco há um fotossensor conectado a um microcomputador que registra interrupções de um feixe de luz infravermelha quando o animal insere o focinho no mesmo. Imediatamente abaixo dos buracos e 1 cm acima do assoalho está localizado o bebedouro, onde o animal recebe reforço (20 µl de sacarose a 10%) (Figura 6B). A caixa experimental está inserida em uma caixa de madeira forrada com espuma de poliuretano, que confere isolamento acústico ao ambiente experimental (Figura 6C). Os *LEDs*, as fotocélulas e o motor do bebedouro estão ligados a uma interface e esta a um microcomputador que os aciona e promove o monitoramento do desempenho dos animais através de um programa computacional desenvolvido na plataforma MEL 2.0. Com esse programa é possível controlar precisamente os estímulos, sua duração, os intervalos de tempo entre os estímulos, e sua sequência de apresentação.

Além disso, o programa registra também as respostas emitidas pelos animais, o tempo decorrido entre o surgimento do estímulo e a emissão da resposta. Estando todos esses parâmetros de acordo com contingências experimentais desejadas.



A

B

Figura 6. (A) Módulos externos da caixa experimental. **(B)** Interior da caixa experimental. **(C)** Estante com o aparelho usado na tarefa comportamental.

Modelagem Comportamental

A fim de levar os animais a exibirem a sequência comportamental avaliada na etapa de teste, eles foram submetidos a uma modelagem comportamental composta por seis etapas distintas. **(1)** pré-exposição à sacarose; **(2)** habituação à caixa experimental e treino ao bebedouro; **(3)** modelagem da resposta ao buraco; **(4)** fortalecimento da resposta modelada na etapa 3 e inserção da luz como estímulo discriminativo; **(5)** estabelecimento do esquema de reforçamento por razão fixa (RF) 2 e **(6)** aumento do esquema de reforçamento por razão fixa, com estabelecimento de critérios de tempo de respostas (critério de resposta) e critérios mínimos de tempo alcançados. Isto é, para os animais receberem o reforço eram requeridas respostas corretas abaixo de um intervalo de tempo que variava de acordo com o próprio desempenho dos animais, de modo que, em num bloco de 10 sequências, se 8 delas fossem respondidas corretamente e abaixo do critério de resposta

requerido, esse critério diminuía ainda mais. Deste modo, para receber o reforço o animal deveria responder para os estímulos ainda mais rapidamente, caso contrário, o critério de resposta aumentava.

O desempenho dos animais poderia ser tal que o critério de resposta poderia ser reduzido sucessivas vezes. Tendo ocorrido essas reduções, os três valores mais baixos de critério de resposta obtidos pelos animais foram denominados critérios mínimos de resposta. A cada bloco de 10 tentativas se 8 delas não tivessem respostas corretas abaixo do critério de resposta, esse critério tornava a aumentar. Nota-se que o desempenho dos animais determina uma oscilação dos valores dos critérios de resposta ao longo da sessão; portanto, é possível que os animais atinjam os três critérios mínimos de resposta diversas vezes. Tendo o animal passado por um desses critérios mínimos de resposta 6 vezes, ocorria a mudança do esquema de reforço por razão fixa. Desta forma os animais poderiam atingir um desempenho assintótico, respondendo o mais rápido possível em cada razão fixa, estando então aptos para as próximas condições desta etapa (para detalhes ver adiante).

Etapa 1 – Pré-exposição à sacarose.

Um bebedouro com sacarose à 10% foi inserido na gaiola-residência por duas horas para que os animais pudessem experimentá-la e familiarizar-se com seu sabor. Nessa e em todas as etapas de treino os animais estavam submetidos ao regime de restrição alimentar descrito acima.

Etapa 2 – Habituação à caixa experimental e treino ao bebedouro.

Os animais foram colocados individualmente na caixa experimental. Era oferecido frequentemente ao animal 5 microlitros da solução de sacarose através da cuia do bebedouro. Assim que o animal consumisse a sacarose disponível, outra alíquota era oferecida. Seu condicionamento se iniciou com a "captura de comportamentos" para o treino ao bebedouro de forma que o animal pudesse associar o som (clique do bebedouro) com a presença da solução na cuia. Nessa etapa os mecanismos de acionamento do bebedouro eram controlados manualmente e cada animal permaneceu nessa sessão por 40 minutos.

Etapa 3 – Modelagem de resposta ao buraco.

Foram inicialmente reforçados manualmente nessa etapa comportamentos de aproximação em relação a qualquer um dos 4 buracos (que estavam apagados). Nesta mesma etapa, assim que o animal inserisse o focinho em qualquer um dos 4 buracos, a interrupção do feixe de luz infravermelha levava à liberação do reforço. Cada resposta adequada corresponde a uma tentativa. Neste momento o monitoramento da modelagem passou a ser feito pelo computador. A sessão compreendia uma série de 500 tentativas (focinhadas).

Etapa 4 – Fortalecimento da resposta modelada na etapa 3 e inserção do estímulo discriminativo (LED aceso).

Após realizadas 100 tentativas de modelagem na etapa anterior, foi introduzido o acendimento do *LED* em um dos quatro buracos; o animal deveria focinhá-lo apenas quando este estivesse aceso. Assim que o animal inserisse o

focinho no buraco, a interrupção do feixe de luz infravermelha levava ao apagamento da luz do buraco e a liberação do reforço, desta forma, cada resposta correta do animal é reforçada e considerada como uma tentativa. A ordem de acendimento do *LED* de cada buraco foi organizada de maneira equiprovável, i.e., todos os estímulos tinham a mesma chance de ocorrer. O número de vezes que o *LED* de cada buraco foi aceso era igual. O controle de acendimento e registro de respostas corretas foi feito pelo computador. A sessão compreendia uma série de 500 tentativas.

Etapa 5 – Estabelecimento do esquema de reforçamento por razão fixa 2.

Nesta etapa o rato recebia reforço depois de emitir resposta a dois buracos distintos, um em seguida ao outro (RF 2). Assim que o *LED* de um primeiro buraco era aceso o rato deveria focinhar esse buraco; ainda com o focinho no primeiro buraco, o *LED* de outro buraco era aceso exigindo que o animal respondesse a esse novo estímulo. Respondendo corretamente era liberado o reforço. Nesta etapa o esquema de reforçamento por razão fixa permaneceu apenas em 2. As transições, sequência de acendimento dos *LED*s de cada buraco, eram equiprováveis e controladas pelo computador. Caso o rato emitisse uma resposta errada em qualquer momento, assim que focinhasse um buraco errado apresentava-se um som de 160 Hz e 75 dB, por 500 ms, no intuito de sinalizar o erro. Ainda sim, o rato continuava respondendo a mesma sequência até focinhar corretamente o buraco que estivesse aceso, uma sequência completa foi considerada como sendo o acendimento de dois buracos distintos. A sessão teve duração de 500 sequências.

Etapa 6 – Aumento do esquema de reforçamento por razão fixa, estabelecimento de critérios de tempo para execução de respostas e critérios mínimos de tempo alcançados.

Inicialmente, o esquema de reforço contava com uma razão fixa igual a 2. Assim que o *LED* de um primeiro buraco era aceso, o rato deveria focinhar esse buraco; ainda com o focinho no primeiro buraco, o *LED* de outro buraco era aceso (seguindo um padrão aleatório de acendimento) exigindo que o animal respondesse a esse novo estímulo. Entretanto, para o animal receber o reforço, ele deveria responder a sequência de estímulos com tempo de resposta inferior a um critério de tempo que funcionava da seguinte forma: após ter focinhado corretamente o primeiro buraco o animal tinha 800 ms para responder ao próximo estímulo apresentado; tendo respondido à sequência de dois estímulos corretamente e com tempo de resposta abaixo do critério de tempo, o animal recebia reforço. Igualmente a etapa anterior, uma sequência completa foi considerada como sendo o acendimento de dois buracos distintos; respostas erradas eram seguidas da apresentação do som. Os animais eram penalizados caso o tempo de resposta fosse superior ao intervalo de tempo disponível. Neste caso, a tarefa era totalmente interrompida por dois segundos, a luz do teto da caixa ficava apagada durante esse período, e as contingências de reforço eram suspensas. Se em 8 de cada 10 sequências as respostas fossem corretas (i.e., com tempo de resposta inferior a 800 ms) esse critério diminuía em 20 ms; assim, o animal teria 780 ms para responder ao segundo estímulo. Se o número de respostas corretas, em cada 10, fosse inferior a 8, havia um aumento de 20 ms no tempo disponível para a resposta. Assim, por exemplo, se o critério de tempo para execução da resposta estivesse em 780

ms, ele era aumentado para 800 ms. Portanto, os critérios de resposta aumentavam ou diminuíam em função do desempenho do animal. O critério inicial de 800 ms com variações de 20 ms foi adotado para o esquema de razão fixa 2. A Tabela 4 mostra os critérios iniciais e respectivas variações para cada um dos esquemas de razão fixa utilizados. Cada sessão teve duração máxima de 400 sequências.

Tabela 4. Valores dos critérios iniciais de resposta e variações dos critérios utilizados para cada esquema de razão fixa (ver explicações no texto).

Razão Fixa	Critério inicial de resposta (ms)	Variação do Critério (ms)
2	800	20
3	1360	40
4	2040	60
5	2560	80
6	3200	100
7	3840	120
8	4480	140
9	5120	160

A Figura 7 ilustra o critério adotado para que o rato passasse para um novo esquema de razão fixa. A sessão de treino foi iniciada com razão fixa igual a 4 e critério de resposta igual a 1860 ms (desempenho obtido pelo rato na sessão anterior). Do segundo ao nono bloco de tentativas houve 7 reduções do critério de resposta, de 1860 ms para 1440 ms (a cada bloco de 10 tentativas com 8 respostas abaixo do critério de resposta, reduzia esse critério em 60 ms; caso contrário, haveria um aumento de 60 ms). Até o bloco 11 os três critérios mínimos de resposta atingidos pelo rato foram 1560 ms, 1500 ms e 1440 ms, sendo que o rato passou uma vez pelo critério de 1560 ms (bloco

7), duas vezes pelo critério de 1500 ms (blocos 8 e 10) e duas vezes pelo critério 1440 ms (blocos 9 e 11). No bloco 12 o rato diminui ainda mais o critério de tempo, agora para 1380 ms. Depois disso, iniciou-se uma nova contagem do número de vezes que o rato passou pelos critérios mínimos de resposta; note que desta vez os novos critérios mínimos eram 1500 ms, 1440 ms e 1380 ms. A partir do bloco 12 os critérios de resposta oscilam ao redor desses valores, o que caracteriza um desempenho assintótico. Quando o animal passou por um desses critérios mínimos de resposta 6 vezes, ocorreu mudança do esquema de razão fixa. Isso ocorreu no bloco 27, no critério de resposta de 1440 ms. Nesse momento o animal passou da razão fixa 4 para a 5, no Bloco 28. Uma vez nesse novo esquema de razão fixa, o rato deveria passar pelas mesmas condições, i.e., reduzir o critério de tempo de resposta para pelo menos 3 níveis inferiores e passar 6 vezes por qualquer um dos três critérios mínimos de tempo para aumentar a razão fixa.

Os animais foram treinados até atingirem um esquema por reforçamento de razão fixa 9. Toda essa etapa de treinos foi monitorada por um computador programado para esse fim.

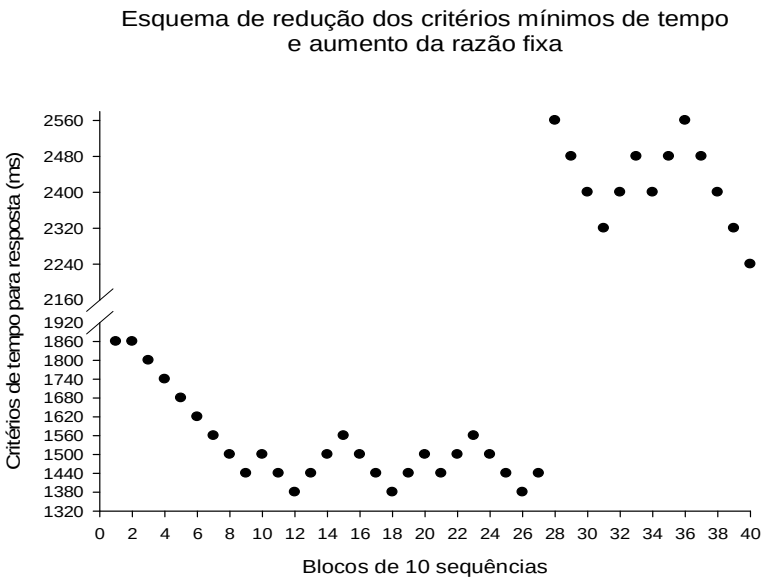


Figura 7. Critérios de tempo de resposta e aumento do esquema de razão fixa em função de blocos de 10 sequências, numa sessão com 400 tentativas. Para o esquema de razão fixa 4, os três critérios mínimos atingidos pelo rato foram 1500 ms, 1440 ms e 1380 ms. Após ter passado 6 vezes por um desses três critérios mínimos de resposta, a razão fixa passou de quatro para cinco (Bloco 28).

Etapa de Teste

A fase de teste, incluindo 240 tentativas por sessão em esquema de reforçamento por razão fixa igual a 9, contou com 3 etapas. O critério inicial de tempo de resposta no teste foi 5120 ms. A emissão de respostas adequadas aos 9 estímulos apresentados em sequência abaixo do critério de tempo de resposta estabelecido levava ao reforço. Similarmente a etapa 6 de treino, 8 sequências corretas com tempo de resposta inferior a 5120 ms em cada 10 sequências levava a uma redução de 160 ms no critério da resposta (ver Tabela 5). Neste caso, o animal teria 4960 ms para responder na próxima sequência de estímulos. Em caso contrário, havia uma aumento de 160 ms do critério de resposta. A cada dia os animais iniciavam a sessão utilizando o critério de resposta em que se encontravam no dia anterior.

A primeira etapa do teste envolveu 6 sessões com sequências aleatórias, porém com probabilidade das transições entre os estímulos controlada (Figura 8). Não havia repetições sucessivas de um mesmo estímulo (por exemplo, 11, 22, 33 e 44). Nesta etapa os animais foram expostos às seguintes transições: 12, 13, 14, 21, 23, 24, 31, 32, 34, 41, 42 e 43. Conforme representado na Figura 8, as sequências levavam a transições equiprováveis, i.e., todas as transições têm igual chance de ocorrência (33%).

Elemento **N**

Elemento **N + 1**

	1	2	3	4
1		33%	33%	**33%**
2	33%		**33%**	33%
3	**33%**	33%		33%
4	33%	**33%**	33%	

Padrão Aleatório

134132**41**2
41**32**31424
4123**13**232
3**12**413212

Figura 8. Representação da estrutura formal de uma sequência aleatória de eventos. Ao lado encontram-se exemplos de sequências obtidas a partir dessa estrutura.

Após obterem um desempenho assintótico nessa condição experimental, os animais passaram para segunda etapa de teste envolvendo 17 sessões compostas de estímulos apresentados repetidamente numa sequência fixa e repetitiva de 4 elementos (132413241). Conforme representado na Figura 9, as transições tinham 100% de chance de ocorrência.

Elemento **N**

Elemento **N + 1**

	1	2	3	4
1	0			100,00%
2		0	100,00%	
3	100,00%		0	
4		100,00%		0

Padrão Repetitivo

132413241

Figura 9. Representação da estrutura formal de uma sequência repetitiva de eventos. Ao lado encontram-se o exemplo de sequência obtidas a partir dessa estrutura.

Prosseguiu-se o treinamento com essa sequência fixa e repetitiva até os animais apresentarem um nível assintótico de desempenho na execução das

transições 13, 32, 24 e 41 que compunham a sequência. Por fim, na terceira etapa de teste, os animais foram novamente submetidos a sequências aleatórias ao longo de 4 sessões. Novamente as transições 12, 13, 14, 21, 23, 24, 31, 32, 34, 41, 42 e 43 foram executadas nessa etapa, conforme representado na Figura 8. Note que as transições são equiprováveis, i.e., todas as transições têm igual chance de ocorrência (33%).

O tempo de reação (TR) desde o aparecimento do estímulo até a inserção do focinho no buraco correspondente foi registrado com precisão de milissegundos. A acurácia, i.e., a proporção de respostas corretas em relação ao total de respostas emitidas em cada transição, foi registrada (ver Domenger e Schwarting, 2005; 2006; 2007).

Análise dos Dados

De cada sessão foi extraído o valor mediano do tempo de reação e a percentagem de acertos, definida como a razão entre o número de transições realizadas corretamente sobre o total de transições realizadas na sessão (incluindo, neste último caso, tanto as corretas quanto as incorretas). Foram também extraídos de cada sessão os valores medianos do Tempo de Reação e percentagem de acertos para cada uma das transições comuns a ambos os tipos de sequências (13, 24, 32 e 41).

Os resultados das quatro últimas sessões envolvendo sequências fixas repetitivas e das quatro sessões seguintes envolvendo sequências aleatórias foram comparados, incluindo-se apenas os dados das transições 13, 24, 32 e 41, que são comuns a ambas as sequências. Tais dados foram analisados por

meio da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA), tendo como fatores intra-sujeitos “Sequência” em dois níveis (fixa repetitiva versus aleatória), “Sessão” em 4 níveis e “Transição” em 4 níveis. O fator “Sequência” compara o desempenho dos animais nas duas condições as quais foram submetidos, i.e., sequência fixa repetitiva e sequência aleatória. O fator “Sessão” denota a variação de desempenho entre as sessões. O fator “Transição” compara o desempenho dos animais relativo a cada transição (13, 24, 32 e 41).

Foi executada uma ANOVA para cada parâmetro distinto, incluindo Tempo de Reação global da sessão, Tempo de Reação em cada transição, Acurácia global da sessão e Acurácia em cada transição.

Todas as análises foram feitas utilizando o pacote estatístico STATISTICA 7.

RESULTADOS

Tempo de reação e taxa de acertos nas sequências fixas repetitivas e nas sequências aleatórias

Os resultados são apresentados na Figura 10. A ANOVA revelou diferenças significantes em relação ao fator Sequência ($F(1, 7) = 7,5011$, $p = 0,0289$). Em relação ao fator Sessão não houve diferenças significantes ($F(3, 21) = 1,0246$, $p = 0,40$). No entanto, as análises indicam diferenças significantes na interação entre os fatores Sequência e Sessão ($F(3, 21) = 3,8911$, $p = 0,0234$).

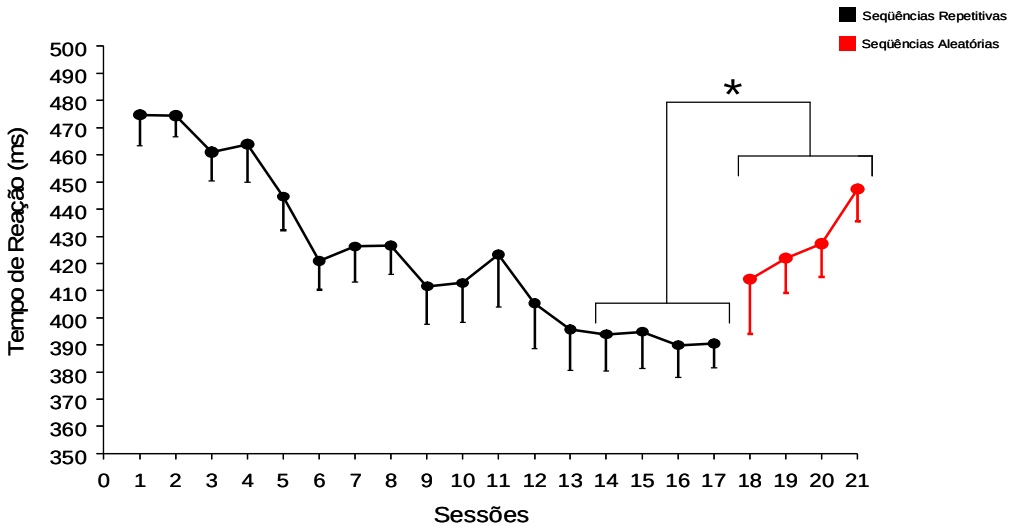


Figura 10. Média das medianas dos tempos de reação ao longo das sessões (1 a 17) com sequências repetidas e sessões seguintes (18 a 21) com sequências aleatórias, levando em consideração apenas as transições 13, 24, 32 e 41, comuns a ambas as sequências.

Em relação as análises envolvendo as percentagens de acerto da sessão incluindo apenas os dados das transições comuns (13, 24, 32 e 41) das quatro últimas sessões com sequência fixa repetitiva e das quatro sessões subsequentes com sequências aleatórias (Figura 11) a ANOVA revelou diferenças significantes em relação ao fator Sequência ($F(1, 7) = 46{,}399$, $p < 0{,}001$). Para o fator sessão não houve diferenças significantes ($F(3, 21) = 1{,}3282$, $p = 0{,}29$). A análise revelou ainda uma forte interação entre os fatores Sequência e Sessão ($F(3, 21) = 15{,}047$, $p = 0{,}00002$) (Figura 11).

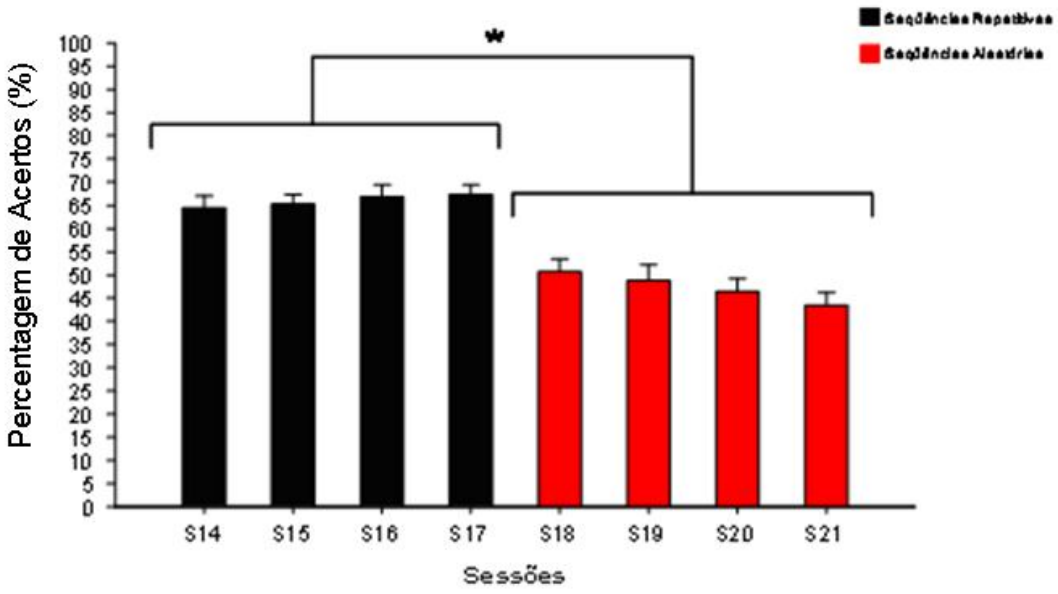


Figura 11. Percentagens de acertos obtidos nas quatro últimas sessões com sequências fixas repetitivas (14 a 17) e sessões seguintes (18 a 21) com sequências aleatórias, levando em consideração apenas as transições 13, 24, 32 e 41, comuns a ambas as sequências.

Tempo de Reação e Acurácia em cada transição

A mediana do tempo de reação envolvendo cada uma das transições (13, 24, 32 e 41), de cada sessão, foi também obtida (Figura 12). Os tempos de reação obtidos para cada transição nas quatro últimas sessões com sequências fixas repetitivas foram comparados com os parâmetros correspondentes das quatro sessões seguintes com sequências aleatórias. A ANOVA realizada para cada transição revelou diferença significante para o fator Sequência ($F(1, 7) = 11,162$, $p = 0,0124$). Para o fator Sessão os dados estatísticos não mostram diferenças significantes ($F(3, 21) = 0,39707$, $p = 0,7564$). Os resultados mostram diferenças significantes para o fator Transição ($F(3, 21) = 14,502$, $p = 0,00002$). Na análise da interação entre os fatores Sequência e Sessão a ANOVA indica que houve diferenças para esses fatores

(F(3, 21) = 3,2193, p = 0,0434). A ANOVA mostra que há uma tendência quase significante na interação entre os fatores Sequência e Transição (F(3, 21) = 2,9804, p = 0,0546). Comparações específicas realizadas pelo teste post hoc de Tukey mostra diferenças significantes na interação entre os fatores Sequência e Transição apenas para a transição 41 (F(3, 21) = 2,9804, p = 0,0304). Para as demais transições não há diferenças significantes: Transição 13 (F(3, 21) = 2,9804, p = 0,9980), Transição 24 (F(3, 21) = 2,9804, p = 0,9975) e transição 32 (F(3, 21) = 2,9804, p = 0,9998) (Figura 12).

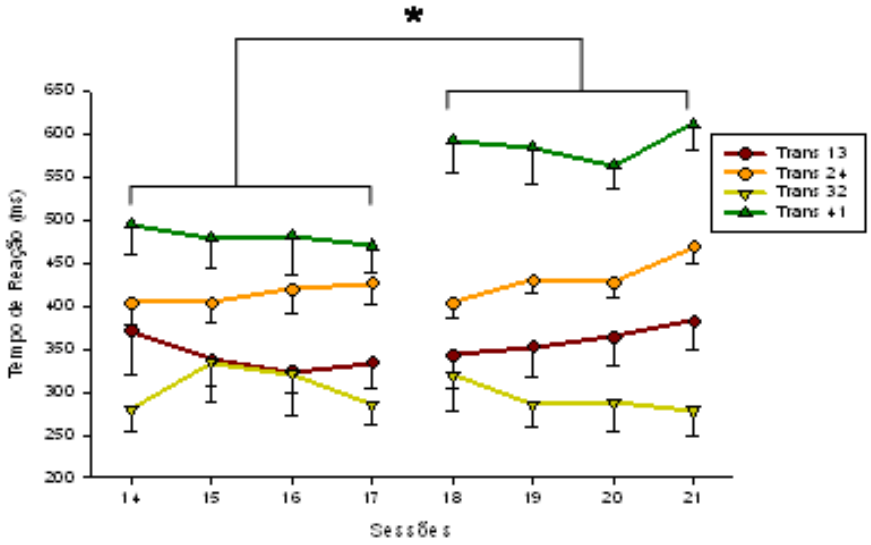


Figura 12. Média das medianas dos tempos de reação para as transições 13, 24, 32 e 41 das quatro últimas sessões (14 a 17) com sequências fixas repetitivas e sessões seguintes (18 a 21) com sequências aleatórias.

As percentagens de acerto em cada um dos tipos de transição envolvendo as quatro últimas sessões de sequência fixa repetitiva e as quatro sessões de sequências aleatórias foram calculadas. As percentagens de acerto obtidas para cada transição nas quatro últimas sessões com sequências fixas repetitivas foram comparados com os parâmetros correspondentes das quatro sessões seguintes com sequências aleatórias. A ANOVA envolvendo cada uma

das transições revelou diferença significante para o fator Sequência (F(1, 7) = 46,002, p = 0,0002). Com relação ao fator Sessão os resultados não mostram diferença significante (F(3, 21) = 1,3639, p = 0,2810). Para o fator Transição há diferenças significantes (F(3, 21) = 10,899, p = 0,00016). Houve também diferenças significantes na interação entre os fatores Sequência e Sessão (F(3, 21) = 15,158, p = 0,00002) e na interação entre os fatores Sequência e Transição (F(3, 21) = 8,2532, p = 0,00081). Comparações específicas realizadas pelo teste post hoc de Tukey mostra diferenças significantes na interação entre os fatores Sequência e Transição apenas para a transição 41 (F(3, 21) = 8,2532, p = 0,0001), isso indica que há um aumento significativo no tempo de reação para a transição 41 quando o padrão fixo é substituído pelo padrão aleatório. Para as demais transições não há diferenças significantes: Transição 13 (F(3, 21) = 8,2532, p = 0,2441), Transição 24 (F(3, 21) = 8,2532, p = 0,5658) e transição 32 (F(3, 21) = 8,2532, p = 0,9999).

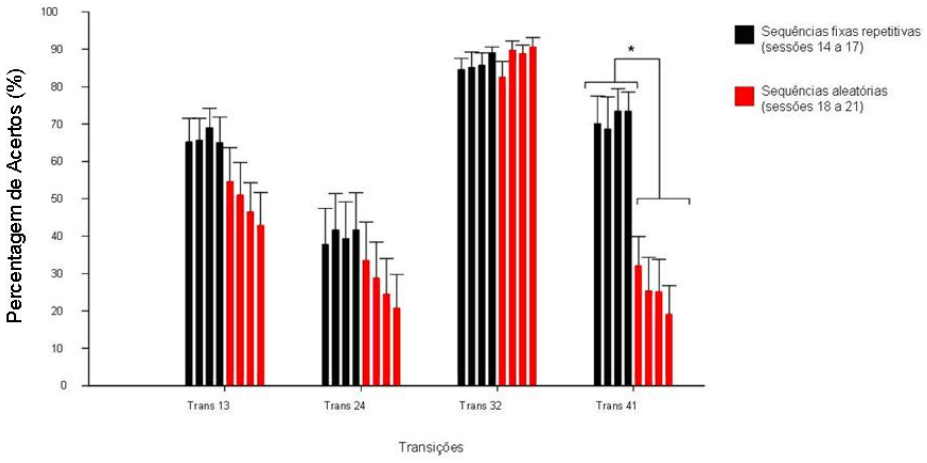


Figura 13. Percentagem de acerto para as transições 13, 24, 32 e 41 das quatro últimas sessões (14 a 17) com sequências repetitivas e sessões seguintes (18 a 21) com sequências aleatórias.

DISCUSSÃO

No conjunto, esses resultados sugerem que os animais foram capazes aprender sobre a sequência dos estímulos apresentados. Isso refletiu-se diretamente na redução do tempo de reação (Figura 10) e no aumento das percentagens de acerto (Figura 11) ao longo das sessões envolvendo a sequência fixa em relação às sequências aleatórias. Nesse sentido, diversos estudos com arranjos experimentais semelhantes envolvendo aprendizagem serial em ratos já evidenciaram que ratos aprendem sobre padrões seriais. Muitos desses estudos mostram um efeito de aprendizagem serial caracterizado por respostas mais rápidas e precisas quando o padrão de apresentação dos estímulos segue uma ordem sequencial e regular em comparação com uma condição aleatória de apresentação dos estímulos (e.g., Bailey e Mair, 2006; 2007; Domenger e Schwarting, 2005; 2006; 2007).

Após sucessivas apresentações do padrão repetitivo de estimulação, os animais mostraram-se capazes de combinar e armazenar informações temporais e espaciais desses padrões, informações essas que compõem a base do comportamento antecipatório (Brunia, 1999). Em sequências que são definidas por um padrão estruturado de eventos, as associações estímulo-estímulo e estímulo-resposta permitem gerar previsões acerca do padrão serial dos estímulos (Willingham, 1992). Conforme mostram as Figuras 10 e 11, redução do tempo de reação e o aumento na percentagem de acertos ao longo das sessões evidenciam que com a aquisição de conhecimento sobre a sequência de estímulos, decorrente do treino repetitivo, os animais passam a antecipar estímulos apresentados em sequências repetitivas.

No momento em que o padrão fixo de sequências é alterado para um padrão aleatório, imediatamente os animais exibem prejuízos no desempenho, tanto em termos do tempo de reação (Figura 10) como em termos da taxa de acertos (Figura 11). Isso ressalta a idéia de que diferentes padrões de apresentação serial dos estímulos podem influenciar de diferentes maneiras as respostas emitidas (Nissen e Bullemer, 1987). O aumento do tempo de reação e a queda nas percentagens de acerto indicam claramente a correlação existente entre o padrão sequencial dos estímulos e o desempenho dos animais frente a esses padrões. O prejuízo que os animais tiveram na tarefa quando a sequência fixa repetitiva é substituída por sequências aleatórias, denota um importante efeito que caracteriza a aprendizagem serial.

Além do prejuízo imediato na tarefa apresentado pelos animais, é possível notar também um aumento do tempo de reação ao longo das sessões de sequências aleatórias. Muito provavelmente esse aumento seja reflexo da imprevisibilidade gerada pelas sequências aleatórias. Somado a isso, os animais parecem não estar engajados na tarefa tanto quanto estavam nas quatro últimas sessões de sequências repetitivas em que apresentaram tempos de reação reduzidos e elevadas taxas de acertos.

No trabalho realizado pelos autores Reed e Johnson (1994) envolvendo a aprendizagem implícita em humanos, os autores defendem a idéia que o desempenho obtido pelos sujeitos experimentais ocorre em parte pela aquisição de informações acerca da complexidade da estrutura da sequência de estímulos. Além disso, segundo os autores o desempenho pode estar

associado a uma simples aprendizagem da frequência relativa de movimentos realizados inerentes a tarefa.

A idéia de desempenho associado a fatores inerentes a tarefa pode também ser aplicada na interpretação dos resultados obtidos nas análises para cada transição, neste caso o desempenho dos animais parece ter relação com a distância entre um estímulo e outro. Note que as transições analisadas envolvem estímulos posicionados a diferentes distâncias (ver Figura 6B). Por exemplo, na transição 32 os estímulos aparecem lado a lado. Nas transições 13 e 24 entre um estímulo e outro existe um buraco interposto. Já para a transição 41, existem dois buracos interpostos entre um estímulo e outro. Tendo em vista as diferentes distâncias entre um estímulo e outro, é possível correlacionar o desempenho para cada transição com essa distância entre um estímulo e outro (ver Figura 12).

A análise realizada revelou principalmente para a transição 41 tempos de reação reduzidos e taxas superiores de acerto quando a sequência é repetitiva em relação a sequência aleatória. Para as transições 13 e 24 não há diferenças estatísticas de desempenho tanto para os tempos de reação quanto para as taxas de acerto. Entretanto, é possível notar na figura 12 que os tempos de reação para essas transições aumentam ao longo das sessões de sequências aleatórias, sugerindo uma alteração do desempenho nessas transições em uma condição de imprevisibilidade. Como pode ser observado na Figura 13, para as taxas de acerto, essas variações decorrentes da alteração do padrão fixo para o aleatório são ainda mais notórias.

Para a transição 32 não existe qualquer variação de desempenho em função do padrão das sequências de estímulos. Levando em consideração o desempenho apresentando pelos animais para as transições 13, 24 e 41, pode-se dizer que o desempenho global (Figuras 10 e 11) apresentado pelos animais é reflexo do desempenho para essas transições, principalmente para a transição 41. Portanto, percebe-se que tanto o benefício obtido pela previsibilidade do padrão fixo (redução dos tempos de reação e aumento nas taxas de acertos), quanto o prejuízo decorrente da imprevisibilidade do padrão aleatório interferem no desempenho das transições cujos estímulos estão posicionados a uma certa distância um do outro. Sendo que, o benefício e o prejuízo obtido pelos animais, manifestam-se principalmente na transição que apresenta a maior distância entre um estímulo e outro.

É interessante notar que embora as transições 31 e 24 apresentem as mesmas distâncias entre um estímulo e outro, o desempenho para cada uma delas é diferente tanto para os tempos de reação quanto para as taxas de acerto. Hipotetizamos que esse resultado está associado ao fato de que a probabilidade do lado em que o segundo elemento da transição será apresentado é diferente para as duas transições. Por exemplo, na transição 13, após a apresentação do estímulo 1 a única possibilidade é que o próximo estímulo seja apresentado à direita do estímulo 1, i.e., a chance do estímulo 3 ser apresentado à direita do estímulo 1 é de 100%. Para a transição 24, após a apresentação do estímulo 2 o próximo estímulo pode tanto ser à direita quanto à esquerda do estímulo 2. Em outras palavras, considerando que a probabilidade de apresentação dos estímulos em cada um dos 4 buracos era de 25% e que não havia apresentação do estímulo num mesmo buraco em

sequência, a chance do estímulo 4 ser apresentado à direita do estímulo 2 é de 66%, o que resulta numa menor previsibilidade do lado em que o segundo elemento da transição será apresentado em relação a transição 13. Não surpreende portanto que o desempenho para cada uma dessas transições sejam diferentes entre si. Neste caso para a transição 13, os animais apresentam tempos de reação reduzidos e maiores taxas de acerto em relação a transição 24.

Além do desempenho dos animais depender da distância entre um estímulo e outro da transição, o desempenho também esta relacionado a previsibilidade do local onde o próximo estímulo da transição será apresentado.

Em suma, o benefício trazido pelo treinamento com a sequência fixa repetida em relação à sequência aleatória sugere que o presente arranjo experimental pode ser utilizado na investigação da aprendizagem serial em ratos por meio da tarefa de tempo de reação serial. O prejuízo exibido pelos animais no momento em que a sequência fixa repetitiva foi substituída pelas sequências aleatórias, tanto em termos do tempo de reação como em termos da percentagem de acertos, referem-se às transições específicas comuns a ambas as sequências. Cabe perguntar em que extensão um arranjo experimental que incluísse sequências fixas repetitivas e sequências aleatórias, e que permitisse incluir todas as transições na análise, geraria um padrão de resultados similar.

Experimento 2

ENTROPIA INFORMACIONAL E O DESEMPENHO DE RATOS NA TAREFA DE TEMPO DE REAÇÃO SERIAL.

No presente experimento o nível de complexidade de cada padrão foi planejado com rigor matemático por meio do conceito de entropia informacional. Com essa ferramenta é possível obter controle sobre o nível de complexidade de uma sequência. Tal complexidade é reflexo de regras e padrões utilizados nas combinações de informações temporais e espaciais. Por sua vez, essas informações podem favorecer a previsão de eventos e suas consequências. A variação da complexidade de uma sequência de eventos numa série pode, com maior ou menor intensidade, determinar o desempenho em tarefas envolvendo aprendizagem de sequências, pois na medida em que um evento se torna mais provável ele também se torna mais previsível, possibilitando a preparação da resposta quando da sua pendência.

Neste experimento os animais foram treinados a executar uma sequência fixa repetitiva com uma quantidade definida de entropia em ordem 1, H_1=2,75, permitindo prever o próximo elemento. Após atingirem um nível assintótico de desempenho os animais foram submetidos a sequências variáveis, porém com probabilidades de transições idênticas às da sequência fixa repetitiva, ou seja, com a mesma quantidade de entropia em ordem 1, H_1=2,75, mas cuja sequência específica era imprevisível (ver adiante). Em uma nova etapa houve um aumento na quantidade de entropia das sequência em

relação às condições anteriores. Os animais foram novamente submetidos a uma sequência fixa repetitiva e sequências variáveis, no entanto ambas as sequências possuíam quantidades de entropia em ordem 1, H_1=3,00.

MATERIAL E MÉTODO

Animais

Foram utilizados 7 ratos machos da linhagem Wistar, com 3 meses de idade no início do experimento, alojados em gaiolas convencionais (4 animais em cada gaiola-residência). Os animais foram fornecidos pelo biotério do Departamento de Fisiologia do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo e foram submetidos a um ciclo claro/escuro de 12-12h (luzes acesas às 7h00).

Uma semana antes do início do experimento e durante toda sua execução, os animais foram submetidos a um regime de privação alimentar controlado: água *ad libitum* e diariamente 18 g (± 0,4) de ração por dia, por animal, fornecida assim que o último animal terminasse a sessão de treino ou sessão de teste.

Aparelho experimental

Foi utilizado o mesmo aparelho descrito no Experimento 1.

Modelagem Comportamental

Tipicamente, as etapas iniciais do treino são as mesmas descritas no Experimento 1. No entanto alguns ajustes foram realizados no intuito de aprimorar o protocolo comportamental, maximizar a aquisição das habilidades

desejadas e principalmente reduzir o tempo de treino. Tendo em vista o protocolo utilizado no Experimento 1, principalmente as condições estabelecidas na etapa 6 de treino daquele experimento, é possível afirmar que as condições implementadas não influenciaram o desempenho dos animais na tarefa. O fato de o animal atingir um desempenho assintótico em cada razão fixa (caracterizado pelos critérios mínimos de resposta alcançados), parece não ser determinante para que responda o mais rapidamente possível errando menos durante a etapa de teste. Portanto, na sexta etapa do presente experimento foi utilizado apenas o critério de tempo para resposta (ver abaixo).

As etapas foram delineadas e encadeadas a fim de levar o animal a exibir a sequência comportamental avaliada na etapa de teste. Sendo elas constituídas dos seguintes elementos: **(1)** pré-exposição à sacarose; **(2)** habituação à caixa experimental e treino ao bebedouro; **(3)** modelagem da resposta ao buraco; **(4)** fortalecimento da resposta modelada na etapa 3 e inserção do estímulo discriminativo de luz; **(5)** estabelecimento do esquema de reforçamento por razão fixa (RF) 2, e **(6)** aumento do esquema de reforçamento por razão fixa, estabelecimento de critérios de tempo para execução de respostas.

Etapa 6 – Aumento do esquema de reforçamento por razão fixa, estabelecimento de critérios de tempo para execução de respostas

O procedimento nesta etapa foi em tudo idêntico ao adotado na etapa correspondente do Experimento 1, exceto pelo fato de que a razão fixa aumentava diariamente.

Etapa de Teste

Na etapa de teste os animais foram submetidos a sessões diárias compostas por 240 tentativas (correspondentes a uma sequência de 9 estímulos) num esquema de reforçamento por razão fixa igual a 9. Além disso, foi adotado como critério de tempo de resposta o valor de 3040 ms. A emissão de respostas adequadas a 9 estímulos apresentados em sequência e abaixo do critério de tempo levava ao reforço. Como na etapa 6 de treino, nas sessões de teste foram também utilizados os critérios de tempo para resposta, i.e., a cada 10 sequências respondidas corretamente pelos animais, se no mínimo 8 delas fossem com tempo de resposta inferior a 3040 ms, esse critério diminuía em 160 ms (ver Tabela 4), deste modo o animal teria 2880 ms para responder à próxima sequência de estímulos. De maneira geral, a fase de teste contou com 2 etapas, sendo cada uma delas sub-dividida em 3 sub-etapas.

Etapa 1

Sequência fixa repetitiva e Sequências variáveis, ambas com entropia em ordem 1 H_1=2,75

A primeira etapa do teste incluiu 31 sessões envolvendo uma sequência fixa repetitiva, cada sessão com 240 sequências, e uma sessão subsequente envolvendo 60 apresentações da sequência fixa repetitiva e 180 apresentações das sequências variáveis (ver adiante); ambos os tipos de sequências tinham um valor de entropia em ordem 1 H_1=2,75. Por fim, foram realizadas 4 sessões adicionais envolvendo sequências variáveis com entropia em ordem 1 H_1=2,75.

Em qualquer caso, não havia repetições seguidas de um mesmo estímulo (por exemplo, 11, 22, 33 e 44).

A partir da matriz de probabilidades (Figura 14), foram elaboradas 13 sequências variáveis que foram apresentadas aleatoriamente em parte da sessão mista e ao longo das 4 últimas sessões da etapa 1. Embora as probabilidades de transições das sequências variáveis sejam idênticas às da sequência fixa repetitiva (Figura 14), a primeira é imprevisível diferindo assim desta última que é previsível. Por exemplo, a probabilidade do elemento 2 vir depois do elemento 1 é de 50% e a probabilidade do elemento 3 vir depois do elemento 1 é também de 50%. Já a probabilidade do elemento 4 vir depois do elemento 2 é 100%; ou seja, depois do elemento 2 sempre se apresenta o elemento 4 (note que a transição 24 aparece duas vezes na sequência).

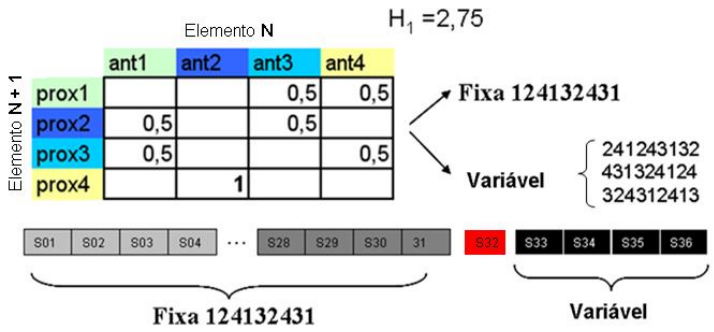


Figura 14. Matriz de probabilidades que determina o padrão formal tanto da sequência fixa repetitiva quanto das variáveis com entropia em ordem 1 H_1=2,75. A sequência fixa repetitiva "124132431" foi apresentada ao logo das sessões de 1 a 31. As sequências variáveis foram apresentadas nas 4 últimas sessões dessa etapa 1 do Experimento 2.

Etapa 2

Sequência fixa repetitiva e Sequências variáveis, ambas com entropia em ordem 1 H_1=3,00

A segunda etapa foi idêntica à primeira, exceto que a entropia de ambos os tipos de sequências em ordem 1 foi H_1=3,00. A Figura 15 representa as probabilidades das transições entre os estímulos (também existentes na sequência fixa repetitiva: 13, 14, 23, 24, 31, 32, 41 e 42). Nota-se que não há repetição de estímulos e que a probabilidade do próximo elemento aparecer dado um anterior é de 50% para todas as transições.

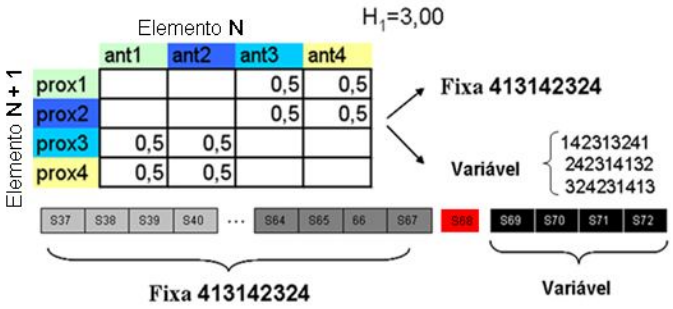


Figura 15. Matriz de probabilidades que determina o padrão formal tanto da sequência fixa repetitiva quanto das variáveis com entropia em ordem 1 H_1=3,00. Após a etapa 1, a sequência fixa repetitiva "413142324" foi apresentada ao logo das sessões de 37 a 67. As sequências variáveis foram apresentadas nas 4 últimas sessões dessa etapa 2 do experimento 2.

O tempo de reação (TR) desde o aparecimento do estímulo até a inserção do focinho no buraco correspondente foi registrado com precisão de milissegundos. A acurácia, i.e., a proporção de respostas corretas em relação ao total de respostas emitidas em cada transição, foi registrada (Domenger e Schwarting, 2005; 2006; 2007).

Cálculo da entropia das sequências usadas nas Etapas 1 e 2

Conforme descrito acima, nas 31 sessões iniciais de cada etapa de testes os estímulos foram apresentados em sequência fixa repetitiva. Assim, as transições entre um estímulo e outro exibiam probabilidades pré-determinadas (ver Figuras 14 e 15). As sequências fixas repetitivas diferiram, porém, na

quantidade de entropia em ordem 1, já que no primeiro caso ela foi H_1=2,75 e no segundo caso ela foi H_1=3,00. Nas respectivas sequências variáveis, embora as probabilidades de ocorrência de cada tipo de transição tenham sido as mesmas (ver Figuras 14 e 15), assim como a quantidade de entropia em ordem 1, as sequências não são previsíveis. Assim, a quantidade de entropia em ordens superiores do que 1 pode variar (ver adiante).

Tendo em vista que em cada transição os elementos estão agrupados dois a dois, pode-se dizer que eles estão em ordem 1, pois um elemento anterior está definindo a probabilidade do elemento seguinte. Cada transição dessas sequências foi considerada como um evento e, com base na frequência de cada evento ocorrer na sequência foram calculadas a probabilidade e a entropia da sequência (ver explicações anteriores do cálculo, acima). Em ordem 2 os elementos estão agrupados três a três. As Tabelas 6, 7 e 8 abaixo mostram os cálculos da entropia para as sequências fixas repetitivas e variáveis utilizadas na Etapa 1, em ordem 1 e 2. Nota-se que em ordem 1 as duas modalidades de sequência possuem os mesmos eventos ocorrendo com as mesmas probabilidades na sequência. Portanto, em ordem 1 têm a mesma quantidade de entropia informacional, o que não ocorre em ordem 2.

Tabela 6. Cálculo da entropia dos eventos e da série em ordem 1. Na terceira coluna a probabilidade de ocorrência de cada evento na sequência; na quarta coluna a entropia do evento e na quinta coluna a entropia ponderada do evento para a sequência, cuja somatória desses valores resulta na entropia em ordem 1 H_1=2,75.

freq	evento	p	h = -logp	p*-logp
240	12	0,125	3,00	0,38
240	13	0,125	3,00	0,38
480	24	0,250	2,00	0,50
240	31	0,125	3,00	0,38
240	32	0,125	3,00	0,38
240	41	0,125	3,00	0,38
240	43	0,125	3,00	0,38
			H =	2,75

Tabela 7. Cálculo da entropia em ordem 2 da sequência fixa repetitiva (que em ordem 1 tem entropia H_1=2,75). Na segunda coluna estão os eventos, agrupados três a três. Na terceira coluna está probabilidade de ocorrência de cada evento na sequência; na quarta coluna a entropia do evento e na quinta coluna a entropia ponderada do evento para a sequência, cuja somatória desses valores resulta na entropia em ordem 2 H_2=2,81.

freq	evento	p	h = -logp	p*-logp
240	124	0,14	2,81	0,401
240	132	0,14	2,81	0,401
240	241	0,14	2,81	0,401
240	243	0,14	2,81	0,401
240	324	0,14	2,81	0,401
240	413	0,14	2,81	0,401
240	431	0,14	2,81	0,401
			H =	2,81

Tabela 8. Cálculo da entropia em ordem 2 das sequências variáveis (que em ordem 1 tem entropia H_1=2,75). Na segunda coluna estão os eventos, agrupados três a três. Na terceira coluna está probabilidade de ocorrência de cada evento na sequência; na quarta coluna a entropia do evento e na quinta coluna a entropia ponderada do evento para a sequência, cuja somatória desses valores resulta na entropia em ordem 2 H_2=3,33.

freq	evento	p	h = -logp	p*-logp
202	124	0,12	3,06	0,37
18	131	0,01	6,54	0,07
183	132	0,11	3,20	0,35
203	241	0,12	3,05	0,37
205	243	0,12	3,03	0,37
132	312	0,08	3,67	0,29
108	313	0,06	3,96	0,25
204	324	0,12	3,04	0,37
108	412	0,06	3,96	0,25
132	413	0,08	3,67	0,29
185	431	0,11	3,18	0,35
			H =	3,33

Foram também calculadas as probabilidades de cada evento (transição) ocorrer na sequência e a quantidade de entropia para as sequências fixa repetitiva e variáveis utilizadas na segunda etapa. Os cálculos abaixo são para

entropia em ordem 1 e entropia em ordem 2 (ver Tabela 9, 10 e 11). Nota-se que em ordem 1 essas sequências não possuem transições repetidas o que determina um aumento da quantidade de entropia informacional da sequência, pois aumenta-se o número de possibilidades de como os eventos podem estar organizados dentro da sequência. Em comparação com as sequências utilizadas na etapa anterior (etapa 1) tem-se um aumento da complexidade e uma diminuição da previsibilidade que se pode gerar acerca da sequência. Já em ordem 2, a sequência fixa repetitiva possui o mesmo número de eventos ocorrendo com a mesma probabilidade que os eventos da sequência fixa repetitiva utilizada na etapa anterior. Embora sejam eventos distintos, a quantidade de entropia em ordem 2 é a mesma.

Tabela 9. Cálculo da entropia dos eventos e da série em ordem 1. Na terceira coluna probabilidade de ocorrência de cada evento na sequência; na quarta coluna a entropia do evento e na quinta coluna a entropia ponderada do evento para a sequência, cuja somatória desses valores resultam na entropia em ordem 1 H_1=3,00.

evento	FREQ	p	h = -logp	p*-logp
13	240	0,125	3,00	0,38
14	240	0,125	3,00	0,38
23	240	0,125	3,00	0,38
24	240	0,125	3,00	0,38
31	240	0,125	3,00	0,38
32	240	0,125	3,00	0,38
41	240	0,125	3,00	0,38
42	240	0,125	3,00	0,38
			H =	3,00

Tabela 10. Cálculo da entropia em ordem 2 da sequência fixa repetitiva que em ordem 1 tem entropia H_1=3,00. Na segunda coluna estão os eventos, agrupados três a três. Na terceira coluna está probabilidade de ocorrência de cada evento na sequência; na quarta coluna a entropia do evento e na quinta coluna a entropia ponderada do evento para a sequência, cuja somatória desses valores resultam na entropia em ordem 2 H_2=2,81.

FREQ	evento	p	h = -logp	p*-logp
240	413	0,14	2,81	0,401
239	131	0,14	2,81	0,401
239	314	0,14	2,81	0,401
239	142	0,14	2,81	0,401
239	423	0,14	2,81	0,401
239	232	0,14	2,81	0,401
239	324	0,14	2,81	0,401
			H =	2,81

Tabela 11. Cálculo da entropia em ordem 2 das sequências variáveis que em ordem 1 tem entropia H_1=3,00. Na segunda coluna estão os eventos, agrupados três a três. Na terceira coluna está probabilidade de ocorrência de cada evento na sequência; na quarta coluna a entropia do evento e na quinta coluna a entropia ponderada do evento para a sequência, cuja somatória desses valores resultam na entropia em ordem 2 H_2=3,62.

FREQ	evento	p	h = -logp	p*-logp
19	131	0,0113	6,47	0,07
183	132	0,1089	3,20	0,35
107	141	0,0637	3,97	0,25
133	142	0,0792	3,66	0,29
185	231	0,1101	3,18	0,35
133	241	0,0792	3,66	0,29
107	242	0,0637	3,97	0,25
77	313	0,0458	4,45	0,20
125	314	0,0744	3,75	0,28
185	324	0,1101	3,18	0,35
126	413	0,075	3,74	0,28
77	414	0,0458	4,45	0,20
205	423	0,122	3,03	0,37
18	424	0,0107	6,54	0,07
			H =	3,62

Análise dos Dados

De cada sessão foi extraído o valor mediano do tempo de reação em milissegundos e a percentagem de acertos, definida como a razão entre o número de transições realizadas corretamente sobre o total de transições realizadas na sessão (incluindo, neste último caso, tanto as corretas quanto as incorretas). Foram também extraídos de cada sessão os valores medianos do Tempo de Reação e percentagem de acertos para cada uma das transições comuns a ambos os tipos de sequências (13, 24, 31, 32, 41).

Os resultados obtidos foram analisados por meio da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA), tendo como fatores intra-sujeitos: “Entropia” em dois níveis (entropia em ordem 1, H_1=2,75, versus entropia em ordem 1, H_1=3,00); “Sessão” (ora em 31 níveis, ora em 4 níveis); “Inicio-Fim” em dois níveis (sessões fixas iniciais da 1ª e 2ª etapa versus sessões fixas finais da 1ª e 2ª etapa); “Sequência” em dois níveis (sequências fixas versus sequências

variáveis). O fator “Entropia” compara o desempenho dos animais nas duas condições as quais foram submetidos, i.e., sequências com entropia em ordem 1, H_1=2,75 (1ª etapa) e sequências com entropia em ordem 1, H_1=3,00 (2ª etapa). O fator “Sessão” mostra a variação de desempenho entre as sessões. O fator “Inicio-Fim” afere a diferença de desempenho existente entre as sessões fixas iniciais da 1ª e 2ª etapa (sessões de 1 a 4 e sessões de 37 a 40) e as sessões fixas finais da 1ª e 2ª etapa (sessões de 28 a 31 e sessões de 64 a 67). O fator “Sequência” refere-se a diferença de desempenho entre as sessões finais de sequências fixas da 1ª e 2ª etapa (sessões de 28 a 31 e sessões de 64 a 67) e as sessões de sequências variáveis da 1ª e 2ª etapa (sessões de 33 a 36 e sessões de 69 a 72).

Foi executada uma ANOVA para cada parâmetro distinto, incluindo Tempo de Reação global da sessão, Acurácia global da sessão, Tempo de Reação e Acurácia para cada transição comum a ambos os tipos de sequências (13, 24, 31, 32, 41).

Todas as análises foram feitas utilizando o pacote estatístico SAS.

RESULTADOS

Os resultados envolvendo tempo de reação total e a percentagem de acerto total nas Etapas 1 e 2 são apresentados nas Figuras 16A e 16B, respectivamente. Os tempos de reação e as percentagens de acerto incluindo apenas as transições comuns a ambos os tipos de sequências nas Etapas 1 e 2 são apresentados nas Figuras 17A e 17B, respectivamente. Os tempos de

reação e as percentagens de acerto das sessões mistas da primeira e segunda etapa (sessões 32 e 69, respectivamente) são apresentados nas figuras 18A e 18B, respectivamente.

Os resultados envolvendo o tempo de reação e a percentagem de acerto em cada uma das transições comuns as Etapas 1 e 2 (transições 13, 24, 31, 32, 41) são apresentados nas Figuras 19A e 19B.

Tempos de reação e percentagem de acertos nas sequências fixas

Os tempos de reação total (Figura 16A) e as percentagens de acerto total (Figura 16B) de cada uma das 31 sessões com a sequência fixa repetitiva com entropia em ordem 1 H_1=2,75 (sessões 1 a 31) foram comparados com os parâmetros correspondentes das 31 sessões envolvendo a sequência fixa com entropia em ordem 1 H_1=3,00 (sessões de 37 a 68).

Em relação aos tempos de reação total, a ANOVA revelou diferenças significantes em relação ao fator Entropia ($F(1, 6) = 15,856$; $p = 0,0073$), sendo os tempos de reação para a sequência de menor entropia informacional (H_1=2,75) inferiores aos da sequência de maior complexidade (H_1=3,00) (Figura 16A) e para o fator Sessão ($F(30, 180) = 17,038$; $p < 0,0001$). A ANOVA também revelou diferenças significantes para a interação dos fatores Entropia e Sessão ($F(30, 180) = 3,0287$; $p < 0,0001$), indicando que a sessões variaram diferentemente nas duas entropias.

Em relação as percentagens de acerto total, a ANOVA revelou diferenças significantes em relação ao fator Entropia ($F(1, 4) = 43,86$; $p = 0,0027$), sendo as percentagens de acerto para a sequência de menor entropia

informacional (H_1=2,75) superiores as da sequência de maior complexidade (H_1=3,00) (Figura 16B) e para o fator Sessão (F(30, 120) = 15,59; p < 0,0001). A ANOVA também revelou diferenças significantes para a interação dos fatores Entropia e Sessão (F(30, 120) = 8,53; p < 0,0001), indicando que a sessões variaram diferentemente nas duas entropias.

Similarmente, os tempos de reação e as percentagens de acerto incluindo apenas as transições comuns a ambos os tipos de sequências (Figuras 17A e 17B) em cada uma das 31 sessões com a sequência fixa repetitiva com entropia em ordem 1 H_1=2,75 (sessões 1 a 31) foram comparados com os parâmetros correspondentes das 31 sessões envolvendo a sequência fixa com entropia em ordem 1 H_1=3,00 (sessões de 37 a 68).

Em relação aos tempos de reação incluindo apenas as transições comuns a ambos os tipos de sequências, a ANOVA não revelou diferenças significantes em relação ao fator Entropia (F(1, 6) = 3,05; p = 0,1313), (Figura 17A). No entanto revelou diferenças significantes para o fator Sessão (F(30, 180) = 3,46; p < 0,0001), mostrando que o tempo de reação diminui ao longo das sessões de sequências fixas. A ANOVA também mostrou que há interação entre os fatores Entropia e Sessão (F(30, 180) = 2,26; p = 0,0006), revelando que o tempo de reação varia diferentemente nas sessões da primeira etapa em relação as sessões da segunda etapa.

Em relação a percentagem de acerto incluindo apenas as transições comuns a ambos os tipos de sequências, a ANOVA revelou diferenças significantes em relação ao fator Entropia (F(1, 6) = 6,42; p = 0,0444) (Figura 17B), provavelmente porque os animais exibem maiores percentagens de

acerto nas sessões finais de sequência fixa da segunda etapa. Os dados estatísticos mostram também diferenças significantes e para o fator Sessão ($F(30, 180) = 16,95$; $p < 0,0001$), mostrando que o os animais exibem aumentos nas percentagens de acerto ao longo das sessões de sequências fixas. A ANOVA também revelou que há interação entre os fatores Entropia e Sessão ($F(30, 180) = 7,27$; $p < 0,0001$), mostrando que as percentagens de acerto variam diferentemente na etapa 1 e 2.

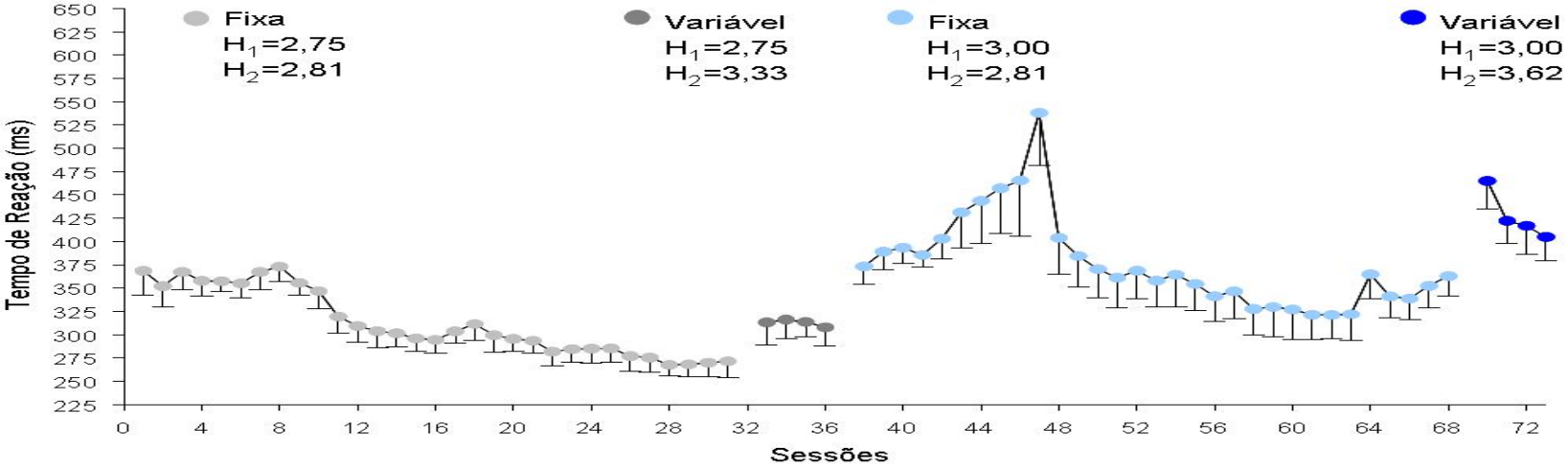
Tempos de reação e percentagem de acertos nas sessões inicias e sessões finais de sequências fixas

Os tempos de reação e as percentagens de acerto incluindo apenas as transições comuns a ambos os tipos de sequências das 4 sessões iniciais de sequências fixas, tanto da Etapa 1 quanto da Etapa 2 (sessões de 1 a 4 e sessões de 37 a 40), foram comparados com os parâmetros correspondentes das 4 sessões finais de sequências fixas, tanto da Etapa 1 quanto da Etapa 2 (sessões de 28 a 31 e sessões de 64 a 67).

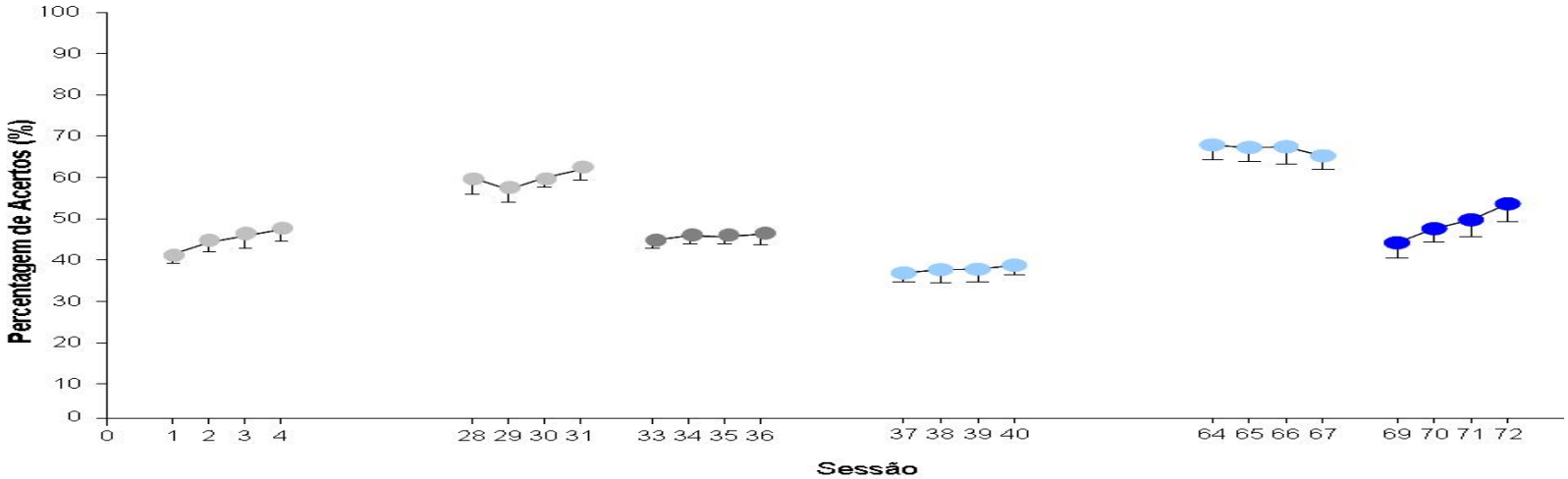
Em relação aos tempos de reação incluindo apenas as transições comuns a ambos os tipos de sequências, a ANOVA não revelou diferenças significantes em relação ao fator Entropia ($F(1, 6) = 0,46$; $p = 0,5225$) (Figura 17A). No entanto revelou diferenças significantes para o fator Inicio-Fim ($F(1,6) = 32,95$; $p = 0,0012$), mostrando que os tempos de reação nas sessões iniciais de sequências fixas (de ambas as etapas) são superiores aos tempos de reação nas sessões finais de sequências fixas (de ambas as etapas). Para o fator Sessão não houve diferenças significantes ($F(3, 18) = 0,24$; $p = 0,8668$), mostrando que os animais apresentam desempenho assintótico nas referidas

sessões. A ANOVA também mostrou que não há interação entre os fatores Entropia e Início-Fim ($F(1,6) = 3,02$; $p = 0,1327$) e também não há interação entre fatores Entropia e Sessão ($F(3,18) = 0,89$; $p = 0,4629$).

Para as percentagens de acerto incluindo apenas as transições comuns a ambos os tipos de sequências, a ANOVA revelou diferenças significantes em relação ao fator Entropia ($F(1, 6) = 17,78$; $p = 0,0056$) (Figura 17B); provavelmente isso se deve ao fato dos animais exibem um aumento nas percentagens de acerto nas sessões de sequências fixas finais da segunda etapa (sessões de 64 a 67). Para o fator Início-Fim houve diferenças significantes ($F(1, 6) = 64,82$; $p = 0,0002$), mostrando que as percentagens de acerto nas sessões iniciais de sequências fixas (de ambas as etapas) são inferiores as percentagens de acertos nas sessões finais de sequências fixas (de ambas as etapas). Para o fator Sessão não houve diferenças significantes ($F(3, 18) = 2,30$; $p = 0,1121$), mostrando que os animais apresentam desempenho assintótico nas referidas sessões. A ANOVA revelou também que não há interação entre os fatores Entropia e Início-Fim ($F(1,6) = 3,49$; $p = 0,1110$) e também não há interação entre fatores Entropia e Sessão ($F(3,18) = 1,23$; $p = 0,3267$).

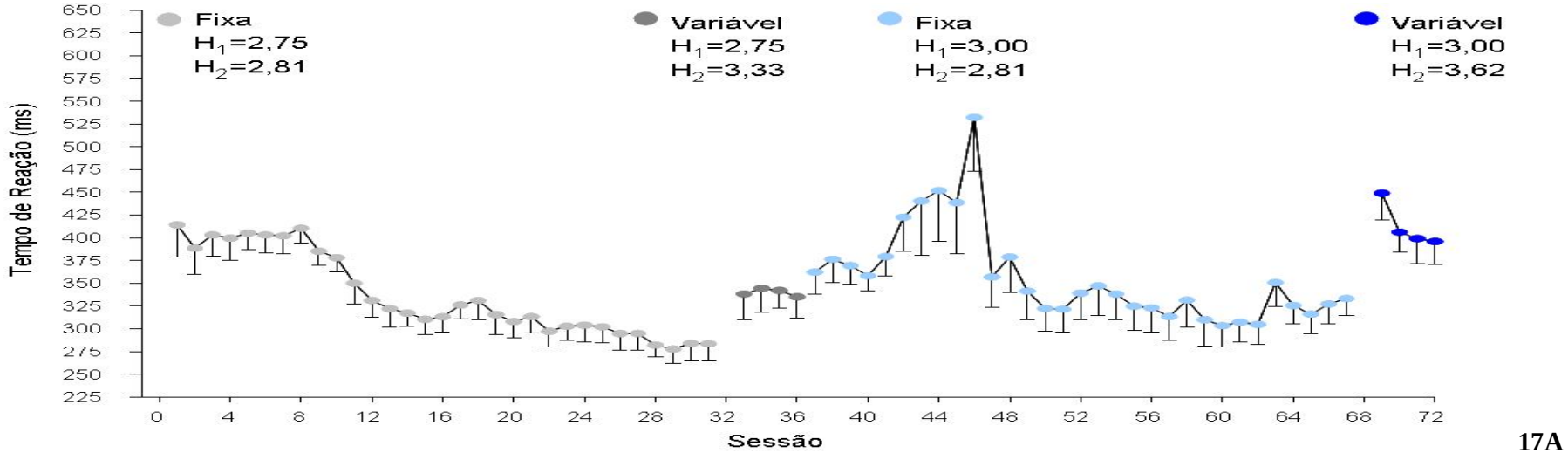


16**A**

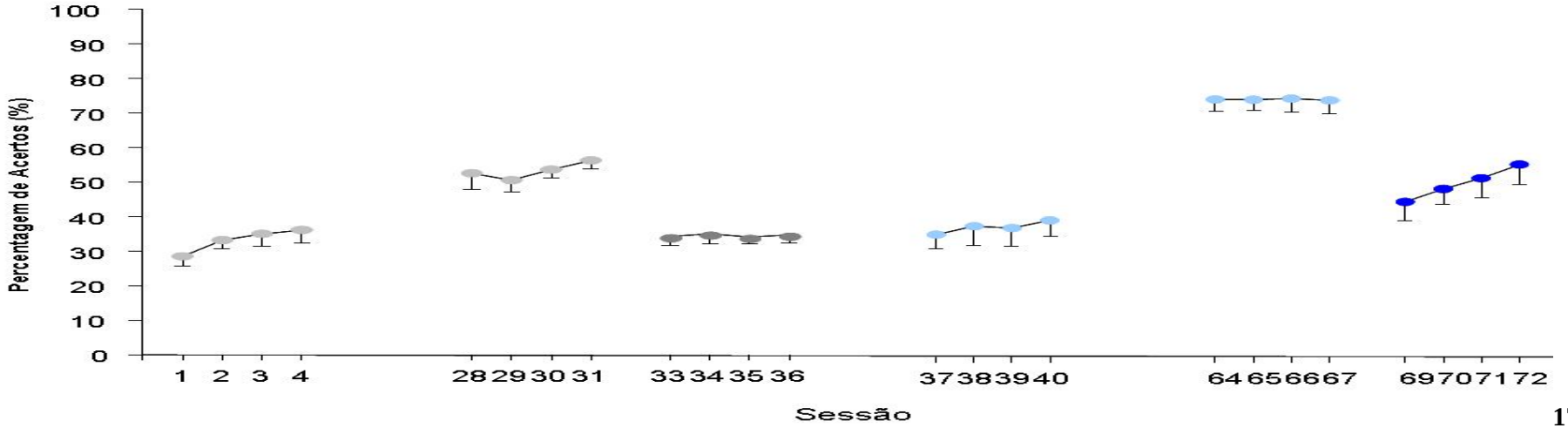


16**B**

Figura 16. Média **(A)** das medianas do tempo de reação total, **(B)** das percentagens de acerto total, de todas as sessões analisadas, incluindo Sessões 1 a 31, envolvendo sequências fixas repetitivas com entropia em ordem 1 H_1=2,75, Sessões 33 a 36, envolvendo sequências variáveis com entropia em ordem 1 H_1=2,75, Sessões 37 a 67, envolvendo sequências fixas repetitivas com entropia em ordem 1 H_1=3,00, e Sessões 69 a 72 envolvendo sequências variáveis com entropia em ordem 1 H_1=3,00.



17A



17B

Figura 17. Média (A) das medianas dos tempos de reação incluindo apenas as transições comuns a ambas as sequências e (B) das percentagens de acerto incluindo apenas as transições comuns a ambos os tipos de sequências, de todas as sessões analisadas, incluindo Sessões 1 a 31, envolvendo sequências fixas repetitivas com entropia em ordem 1 H_1=2,75, Sessões 33 a 36, envolvendo sequências variáveis com entropia em ordem 1 H_1=2,75, Sessões 37 a 67, envolvendo sequências fixas repetitivas com entropia em ordem 1 H_1=3,00, e Sessões 69 a 72 envolvendo sequências variáveis com entropia em ordem 1 H_1=3,00.

Tempos de reação e percentagens de acerto nas sessões "mistas" (sessões 32 e 68)

Para efeito de análise do momento exato em que o padrão fixo repetitivo foi alterado para o padrão variável, as sessões mistas da Etapa 1 e da Etapa 2 (sessões 32 e 68, respectivamente) foram divididas em dois blocos. O Bloco 1, tanto da sessão 32 quanto da sessão 68 é composto por 60 sequências fixas iniciais. Por sua vez o Bloco 2, tanto da sessão 32 quanto da sessão 68 é composto por 180 sequências variáveis finais.

Os tempos de reação e as percentagens de acerto incluindo apenas as transições comuns a ambos os tipos de sequências do Bloco 1 das sessões mistas da Etapa 1 e da Etapa 2, foram comparados com os parâmetros correspondentes do Bloco 2, tanto da Etapa 1 quanto da Etapa 2. Nas análises os blocos foram considerados como sendo o fator Sequência.

No que se refere aos tempos de reação incluindo apenas as transições comuns a ambos os tipos de sequências, a ANOVA revelou diferenças significantes em relação ao fator Entropia ($F(1, 6) = 35,720$; $p= 0,0009$) (Figura 18A). Isso indica que de maneira geral os tempos de reação dos animais na sessão 32, com entropia em ordem 1 $H_1=2,75$, são menores que os tempos de reação dos animais na sessão 69, com entropia em ordem 1 $H_1=3,00$. Houve diferença significante em relação ao fator Sequência ($F(1, 6) = 41,962$; $p = 0,0006$), mostrando que as sequências fixas (Bloco 1 da sessão 32 e Bloco 1 da sessão 68) exibem menores tempos de reação do que as sequências variáveis (Bloco 2 da sessão 32 e Bloco 2 da sessão 68). A ANOVA revelou ainda diferenças significantes nas interações entre Entropia e Sequências (F(1,

6) = 8,9633; p = 0,0242). Essas diferenças informam que no momento exato em que o padrão fixo repetitivo é substituído por um padrão variável a alteração dos tempos de reação na Etapa 2 é maior do que na Etapa 1.

Em relação as percentagens de acerto incluindo apenas as transições comuns a ambos os tipos de sequências, a ANOVA revelou a existência de efeito significante para o fator Entropia (F(1, 6) = 26,706; p = 0,0020), mostrando que os animais apresentam percentagens de acerto na sessão 68, com entropia em ordem 1 H1=3,00, superiores as percentagens de acerto na sessão 32, com entropia em ordem 1 H1=2,75 (Figura 18B). Para o fator Sequência houve também diferenças significantes (F(1, 6) = 1091,6; p < 0,0001). De maneira geral, os animais apresentam maiores percentagens de acerto nas sequências fixas (Bloco 1 da sessão 32 e Bloco 1 da sessão 68) do que nas sequências variáveis (Bloco 2 da sessão 32 e Bloco 2 da sessão 68). A ANOVA não revelou diferenças significantes para a interação entre os fatores Entropia e Sequência (F(1, 6) = 1,1527; p = 0,3242).

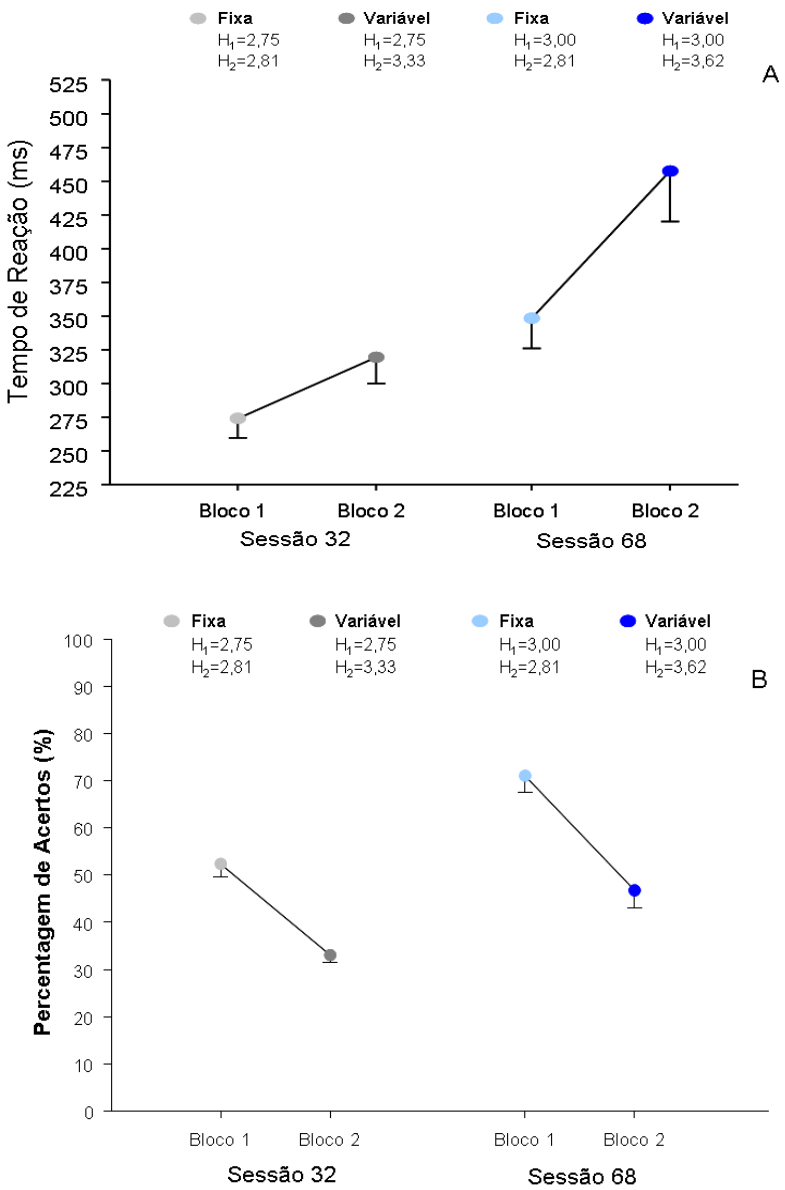


Figura 18. Média **(A)** das medianas dos tempos de reação incluindo apenas as transições comuns a ambas as sequências incluindo o Bloco 1 das sessões 32 e 68 (sequências fixas das respectivas sessões) e o Bloco 2 das sessões 32 e 68 (sequências variáveis das respectivas sessões) e **(B)** das percentagens de acerto incluindo apenas as transições comuns a ambos os tipos de sequências incluindo o Bloco 1 das sessões 32 e 68 (sequências fixas das respectivas sessões) e o Bloco 2 das sessões 32 e 68 (sequências variáveis das respectivas sessões).

Tempos de reação e percentagem de acertos nas passagens da sequência fixa para a variável

Os tempos de reação e as percentagens de acerto incluindo apenas as transições comuns a ambos os tipos de sequências das 4 sessões finais de sequências fixas e 4 sessões de sequências variáveis da Etapa 1 (sessões de 28 a 31 e sessões de 33 a 36), foram comparados com os parâmetros correspondentes das 4 sessões finais de sequências fixas e 4 sessões de sequências variáveis da Etapa 2 (sessões de 64 a 67 e sessões de 69 a 72).

Note que na Etapa 1 a sequência fixa repetitiva com entropia em ordem 1 H_1=2,75 tem um valor de entropia em ordem 2 H_2=2,81. A sequência variável com entropia em ordem 1 H_1=2,75 tem um valor de entropia em ordem 2 H_2=3,33. Na Etapa 2 a sequência fixa com entropia em ordem 1 H_1=3,00 tem um valor de entropia em ordem 2 H_2=2,81. A sequência variável com entropia em ordem 1 H_1=3,00 tem um valor de entropia em ordem 2 H_2=3,62 (ver Tabela 12).

Tabela 12. Valores de entropia das sequências fixas e variáveis tanto em ordem 1 quanto em ordem 2.

Ordem	Entropia Sequência Fixa	Entropia Sequência Variável
1	2,75	2,75
2	2,81	3,33
1	3,00	3,00
2	2,81	3,62

Em relação aos tempos de reação incluindo apenas as transições comuns a ambos os tipos de sequências, a ANOVA revelou diferenças significantes em relação ao fator Entropia ($F(1, 6) = 6,82$; $p = 0,0400$) (Figura 17A), indicando que os tempos de reação para as sequências das sessões de

28 a 31 e sessões de 33 a 36 da primeira etapa (sequências fixas e variáveis, respectivamente) são inferiores ao tempos de reação para as sequências das sessões de 64 a 67 e sessões de 69 a 72 da segunda etapa (sequências fixas e variáveis, respectivamente). Há também diferenças significantes para o fator Sequência ($F(1,6) = 13,61$; $p = 0,0102$), mostrando que os tempos de reação nas sessões finais de sequências fixas (de ambas as etapas) são inferiores aos tempos de reação nas sessões de sequências variáveis (de ambas as etapas). Isso significa que os tempos de reação para as sequências com entropia em ordem 2 H_2=2,81 (sessões finais de sequência fixa em ambas as etapas) são inferiores ao tempos de reação para as sequências com entropia em ordem 2 H_2=3,33 e H_2=3,62 (sessões de sequências variáveis da etapa 1 e sessões de sequências variáveis da etapa 2, respectivamente). Para o fator Sessão houve diferenças significantes ($F(3, 18) = 3,27$; $p = 0,0452$), provavelmente tal fato está relacionado com a diminuição do tempo de reação nas sessões de sequências variáveis da etapa 2 (sessões de 69 a 72). A ANOVA mostrou que não há interação entre os fatores Entropia e Sequência ($F(1,6) = 0,94$; $p = 0,3702$) e também não há interação entre fatores Entropia e Sessão ($F(3,18) = 1,67$; $p = 0,2081$).

Para as percentages de acerto incluindo apenas as transições comuns a ambos os tipos de sequências, a ANOVA revelou diferenças significantes em relação ao fator Entropia ($F(1, 6) = 11,72$; $p = 0,0141$) (Figura 17B), mostrando que as percentagens de acerto para as sequências das sessões de 28 a 31 e sessões de 33 a 36 da Etapa 1 (sequências fixas e variáveis, respectivamente) são menores do que as percentagens de acerto para as sequências das sessões de 64 a 67 e sessões de 69 a 72 da Etapa 2 (sequências fixas e

variáveis, respectivamente). Há também diferenças significantes para o fator Sequência ($F(1,6) = 514,30$; $p < 0,0001$), mostrando que as percentagens de acerto nas sessões finais de sequências fixas (de ambas as etapas) são superiores as percentagens de acerto nas sessões de sequências variáveis (de ambas as etapas). Isso indica que as percentagens de acerto para as sequências com entropia em ordem 2 H_2=2,81 (sessões finais de sequência fixa em ambas as etapas) são superiores as taxas de acertos para as sequências com entropia em ordem 2 H_2=3,33 e H2=3,62 (sessões de sequências variáveis da etapa 1 e sessões de sequências variáveis da etapa 2, respectivamente). Para o fator Sessão houve diferenças significantes ($F(3, 18) = 5,01$; $p = 0,0106$), provavelmente tal fato está relacionado com o aumento na percentagem de acertos ao longo das sessões de sequências variáveis da etapa 2 (sessões de 69 a 72). A ANOVA mostrou que não há interação entre os fatores Entropia e Sequência ($F(1,6) = 0,83$; $p = 0,3987$) e também não há interação entre fatores Entropia e Sessão ($F(3,18) = 1,54$; $p = 0,2383$).

Tempos de reação e percentagem de acertos nas sequências fixas, para cada uma das transições comum a ambos os tipos de sequências

Os tempos de reação e as percentagens de acerto para cada uma das transições comuns a ambos os tipos de sequências, em cada uma das 31 sessões com a sequência fixa repetitiva com entropia em ordem 1 H_1=2,75 (sessões 1 a 31), foram comparados com os parâmetros correspondentes das 31 sessões envolvendo a sequência fixa com entropia em ordem 1 H_1=3,00 (sessões de 37 a 68) (Figuras 19A e 198B).

Os resultados da análise para cada uma das transições podem ser observados integralmente na Tabela 13, abaixo.

Tabela 13. Resultados da análise dos tempos de reação (TR) e percentagem de acertos (ACC) para cada uma das transições comum a ambos os tipos de sequências, incluindo os fatores Entropia, Sessão e a interação entre os fatores Entropia e Sessão.

	Transição	Entropia	Sessão	Entropia X Sessão
TR	13	F(1,6) = 14,61; P = 0,0087	F(30,180) = 5,19; P < 0,0001	F(30,180) = 3,02; P < 0,0001
ACC	13	F(1,6) = 2,85; P = 0,1423	F(30,180) = 11,65; P < 0,0001	F(30,180) = 9,70; P < 0,0001
TR	24	F(1,6) = 3,54; P = 0,1090	F(30,180) = 13,99; P < 0,0001	F(30,180) = 2,07; P = 0,0019
ACC	24	F(1,6) = 20,73; P = 0,0039	F(30,180) = 9,69; P < 0,0001	F(30,180) = 8,69; P < 0,0001
TR	31	F(1,6) = 7,25; P = 0,0359	F(30,180) = 2,10; P = 0,0016	F(30,180) = 1,94; P = 0,0044
ACC	31	F(1,6) = 65,00; P = 0,0002	F(30,180) = 14,44; P < 0,0001	F(30,180) = 14,10; P < 0,0001
TR	32	F(1,6) = 0,52; P = 0,4996	F(30,180) = 3,79; P < 0,0001	F(30,180) = 2,91; P < 0,0001
ACC	32	F(1,6) = 0,15; P = 0,7095	F(30,180) = 1,77; P = 0,0124	F(30,180) = 1,04; P = 0,4131
TR	41	F(1,6) = 4,57; P = 0,0764	F(30,180) = 2,37; P = 0,0003	F(30,180) = 1,99; P = 0,0031
ACC	41	F(1,6) = 0,87; P = 0,3866	F(30,180) = 12,76; P < 0,0001	F(30,180) = 4,08; P < 0,0001

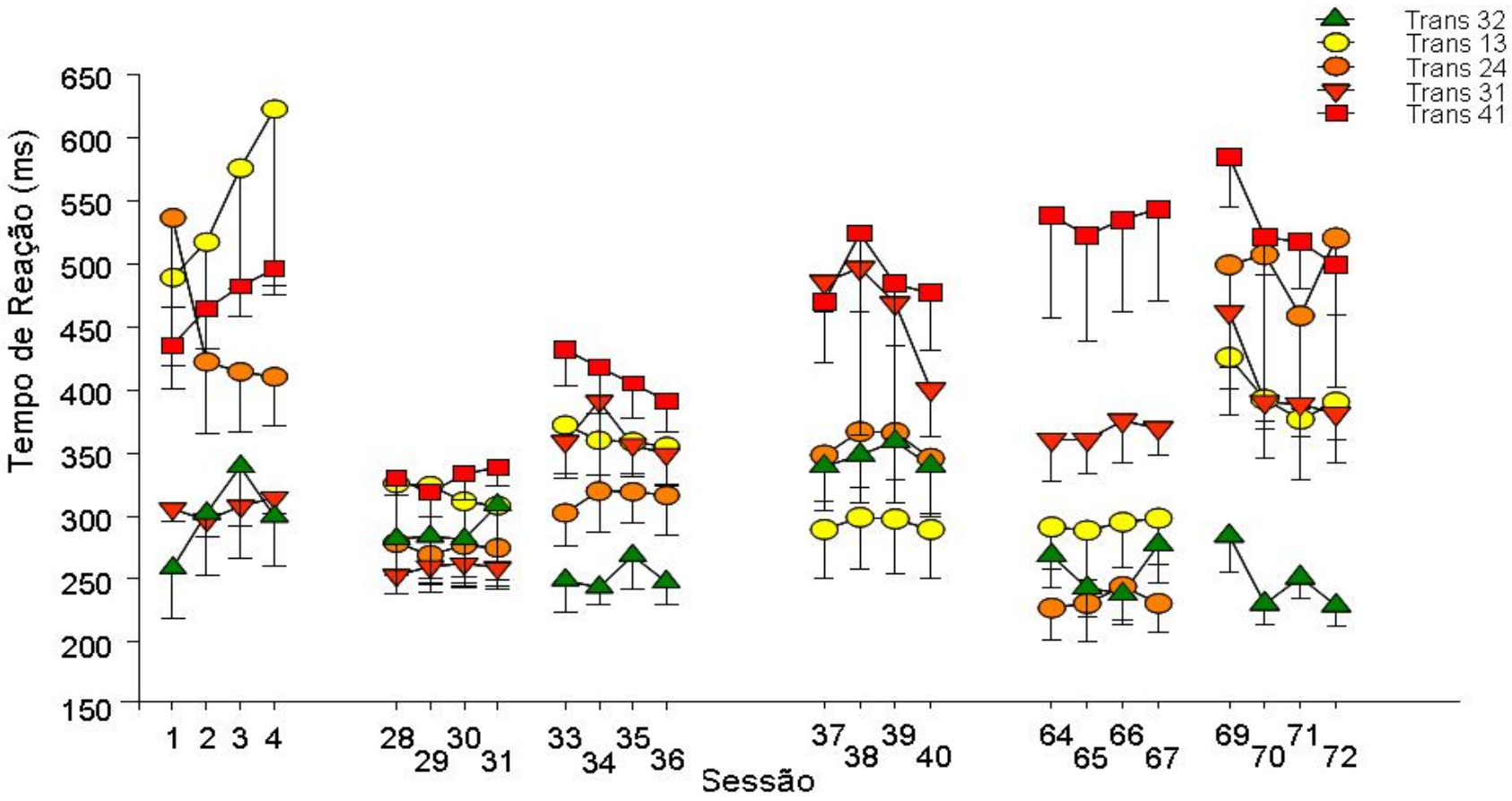
Tempos de reação e percentagem de acerto nas sessões inicias e sessões finais de sequências fixas, para cada uma das transições comuns a ambos os tipos de sequências

Os tempos de reação e as percentagens de acerto para cada uma das transições comuns a ambos os tipos de sequências das 4 sessões iniciais de sequências fixas, tanto da Etapa 1 quanto da Etapa 2 (sessões de 1 a 4 e sessões de 37 a 40), foram comparados com os parâmetros correspondentes das 4 sessões finais de sequências fixas, tanto da Etapa 1 quanto da Etapa 2 (sessões de 28 a 31 e sessões de 64 a 67) (Figuras 19A e 19B).

Os resultados da análise para cada uma das transições podem ser observados integralmente na Tabela 14, abaixo.

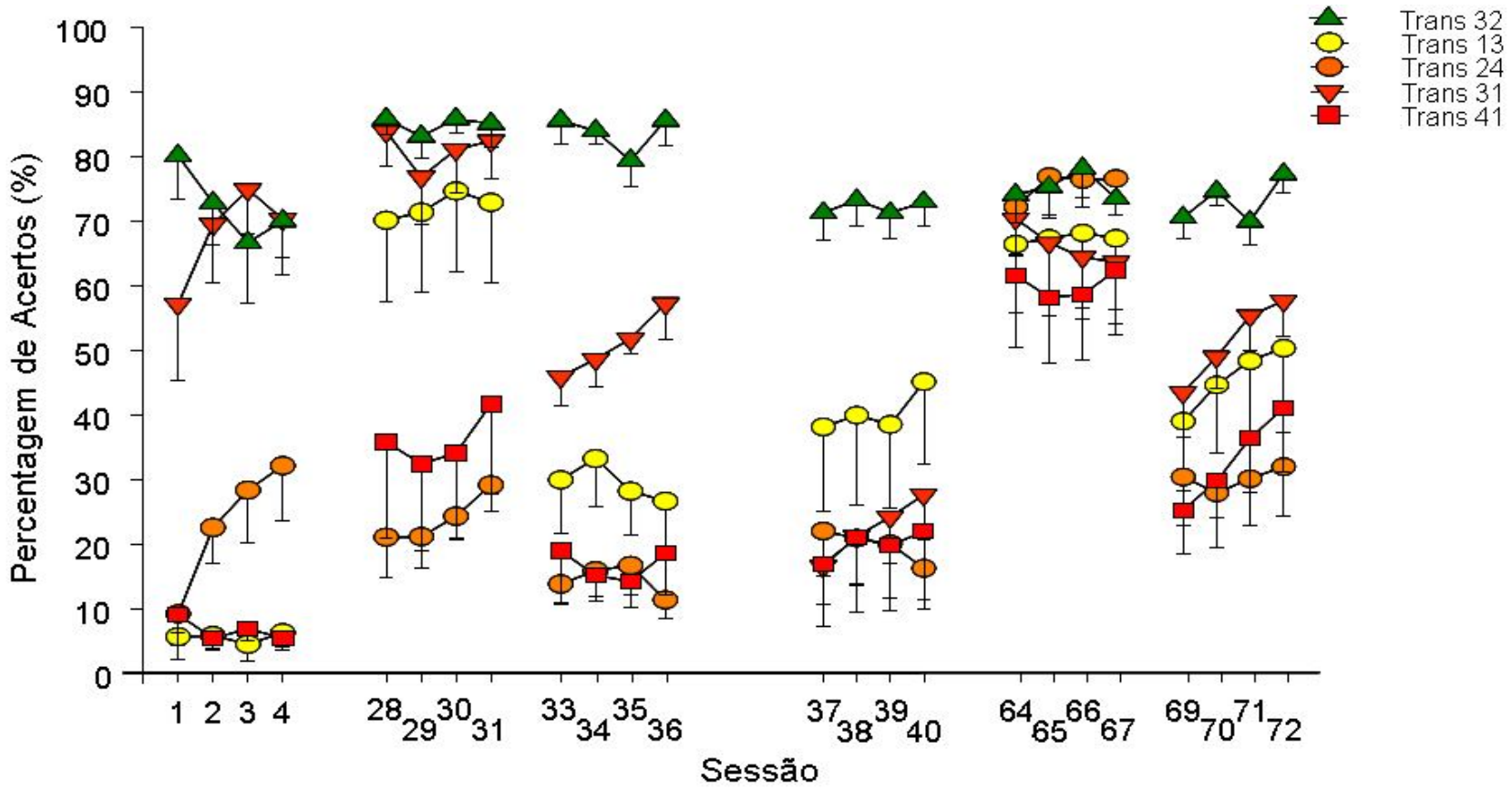
Tabela 14. Resultados da análise dos parâmetros tempos de reação (TR) e percentagens de acerto (ACC) para cada uma das transições comum a ambos os tipos de sequências, incluindo os fatores Entropia, Início-Fim, Sessão e a interação entre os fatores Entropia e Início-Fim e interação entre os fatores Entropia e Sessão.

	Transição	Entropia	Início-Fim	Sessão	Entropia X Início-Fim	Entropia X Sessão
TR	13	F(1,6) = 8,67; P = 0,0258	F(1,6) = 8,69; P = 0,0257	F(3,18) = 1,27; P = 0,3143	F(1,6) = 6,77; P = 0,0406	F(3,18) = 0,80; P = 0,5087
ACC	13	F(1,6) = 9,91; P = 0,0199	F(1,6) = 24,61; P = 0,0025	F(3,18) = 1,49; P = 0,2506	F(1,6) = 4,49; P = 0,0784	F(3,18) = 1,49; P = 0,2506
TR	24	F(1,6) = 2,70; P = 0,1514	F(1,6) = 27,92; P = 0,0019	F(3,18) = 2,28; P = 0,1145	F(1,6) = 0,71; P = 0,4313	F(3,18) = 5,72; P = 0,0062
ACC	24	F(1,6) = 98,20; P < 0,0001	F(1,6) = 39,82; P = 0,0007	F(3,18) = 6,95; P = 0,0027	F(1,6) = 35,14; P = 0,0010	F(3,18) = 8,00; P = 0,0013
TR	31	F(1,6) = 8,69; P = 0,0257	F(1,6) = 1,51; P = 0,2652	F(3,18) = 0,37; P = 0,7748	F(1,6) = 0,24; P = 0,6416	F(3,18) = 0,73; P = 0,5501
ACC	31	F(1,6) = 8,08; P = 0,0295	F(1,6) = 30,50; P = 0,0015	F(3,18) = 1,63; P = 0,2173	F(1,6) = 13,65; P = 0,0102	F(3,18) = 0,49; P = 0,6924
TR	32	F(1,6) = 0,42; P = 0,5407	F(1,6) = 3,27; P = 0,1207	F(3,18) = 0,36; P = 0,7827	F(1,6) = 1,16; P = 0,3228	F(3,18) = 0,53; P = 0,6652
ACC	32	F(1,6) = 0,16; P = 0,7050	F(1,6) = 4,21; P = 0,0861	F(3,18) = 0,38; P = 0,7688	F(1,6) = 1,16; P = 0,3220	F(3,18) = 1,01; P = 0,4100
TR	41	F(1,6) = 6,63; P = 0,0421	F(1,6) = 2,03; P = 0,2042	F(3,18) = 0,76; P = 0,5298	F(1,6) = 7,19; P = 0,0364	F(3,18) = 0,96; P = 0,4347
ACC	41	F(1,6) = 9,26; P = 0,0227	F(1,6) = 21,82; P = 0,0034	F(3,18) = 0,81; P = 0,5061	F(1,6) = 0,64; P = 0,4526	F(3,18) = 0,18; P = 0,9062



19A

Figura 19A. Média das medianas do tempo de reação total para cada uma das transições comuns a ambos os tipos de sequências, incluindo as sessões de 1 a 4 e as sessões de 28 a 31, envolvendo sequências fixas repetitivas com entropia em ordem 1 H_1=2,75, Sessões 33 a 36, envolvendo sequências variáveis com entropia em ordem 1 H_1=2,75, Sessões 37 a 40 e sessões de 64 a 67, envolvendo sequências fixas repetitivas com entropia em ordem 1 H_1=3,00, e sessões 69 a 72 envolvendo sequências variáveis com entropia em ordem 1 H_1=3,00.



19B

Figura 19B. Média das percentagens de acertos para cada uma das transições comuns a ambos os tipos de sequências, incluindo sessões de 1 a 4 e sessões de 28 a 31, envolvendo sequências fixas repetitivas com entropia em ordem 1 H_1=2,75, Sessões 33 a 36, envolvendo sequências variáveis com entropia em ordem 1 H_1=2,75, Sessões 37 a 40 e sessões de 64 a 67, envolvendo sequências fixas repetitivas com entropia em ordem 1 H_1=3,00, e sessões 69 a 72 envolvendo sequências variáveis com entropia em ordem 1 H_1=3,00.

Tempos de reação e percentagens de acerto nas sessões "mistas" (sessões 32 e 68), para cada uma das transições comuns a ambos os tipos de sequências

Os tempos de reação e as percentagens de acerto para cada uma das transições comuns a ambos os tipos de sequências do Bloco 1, das sessões mistas da Etapa 1 e da Etapa 2 (sequências fixas das sessões 32 e 68, respectivamente), foram comparados com os parâmetros correspondentes do Bloco 2, tanto da Etapa 1 quanto da Etapa 2 (sequências variáveis das sessões 32 e 68, respectivamente) (Figuras 20A e 20B). Nessas análises, blocos foram tratados como se fossem o fator Sequência.

Os resultados da análise para cada uma das transições podem ser observados integralmente na Tabela 15, abaixo.

Tabela 15. Resultados da análise para os parâmetros tempos de reação (TR) e percentagem de acertos (ACC) para cada uma das transições comuns a ambos os tipos de sequências, incluindo os fatores Entropia, Sequência (Blocos) e a interação entre os fatores Entropia e Sequência (Blocos).

	Transição	Entropia	Sequência (Blocos)	Entropia X Sequência (Blocos)
TR	13	F(1,6) = 4,0311; P = 0,0914	F(1,6) = 15,828; P = 0,007	F(1,6) = 1,3257; P = 0,2933
ACC	13	F(1,6) = 1,677; P = 0,2428	F(1,6) = 29,757; P = 0,0015	F(1,6) = 7,7060; P = 0,0321
TR	24	F(1,6) = 2,1424; P = 0,1936	F(1,6) = 10,050; P = 0,0193	F(1,6) = 10,369; P = 0,0181
ACC	24	F(1,6) = 27,816; P = 0,0018	F(1,6) = 23,358; P = 0,0029	F(1,6) = 10,781; P = 0,0167
TR	31	F(1,6) = 9,5643; P = 0,0213	F(1,6) = 5,3243; P = 0,0604	F(1,6) = 0,9971; P = 0,3565
ACC	31	F(1,6) = 3,8718; P = 0,0966	F(1,6) = 22,264; P = 0,0032	F(1,6) = 2,1968; P = 0,1888
TR	32	F(1,6) = 0,2027; P = 0,6649	F(1,6) = 0,0004; P = 0,9835	F(1,6) = 16,689; P = 0,0064
ACC	32	F(1,6) = 1,7270; P = 0,2368	F(1,6) = 0,7310; P = 0,4253	F(1,6) = 0,73108; P = 0,4253
TR	41	F(1,6) = 19,248; P = 0,0046	F(1,6) = 10,630; P = 0,0172	F(1,6) = 2,6472; P = 0,1548
ACC	41	F(1,6) = 1,0951; P = 0,3356	F(1,6) = 24,863; P = 0,0024	F(1,6) = 0,2132; P = 0,6605

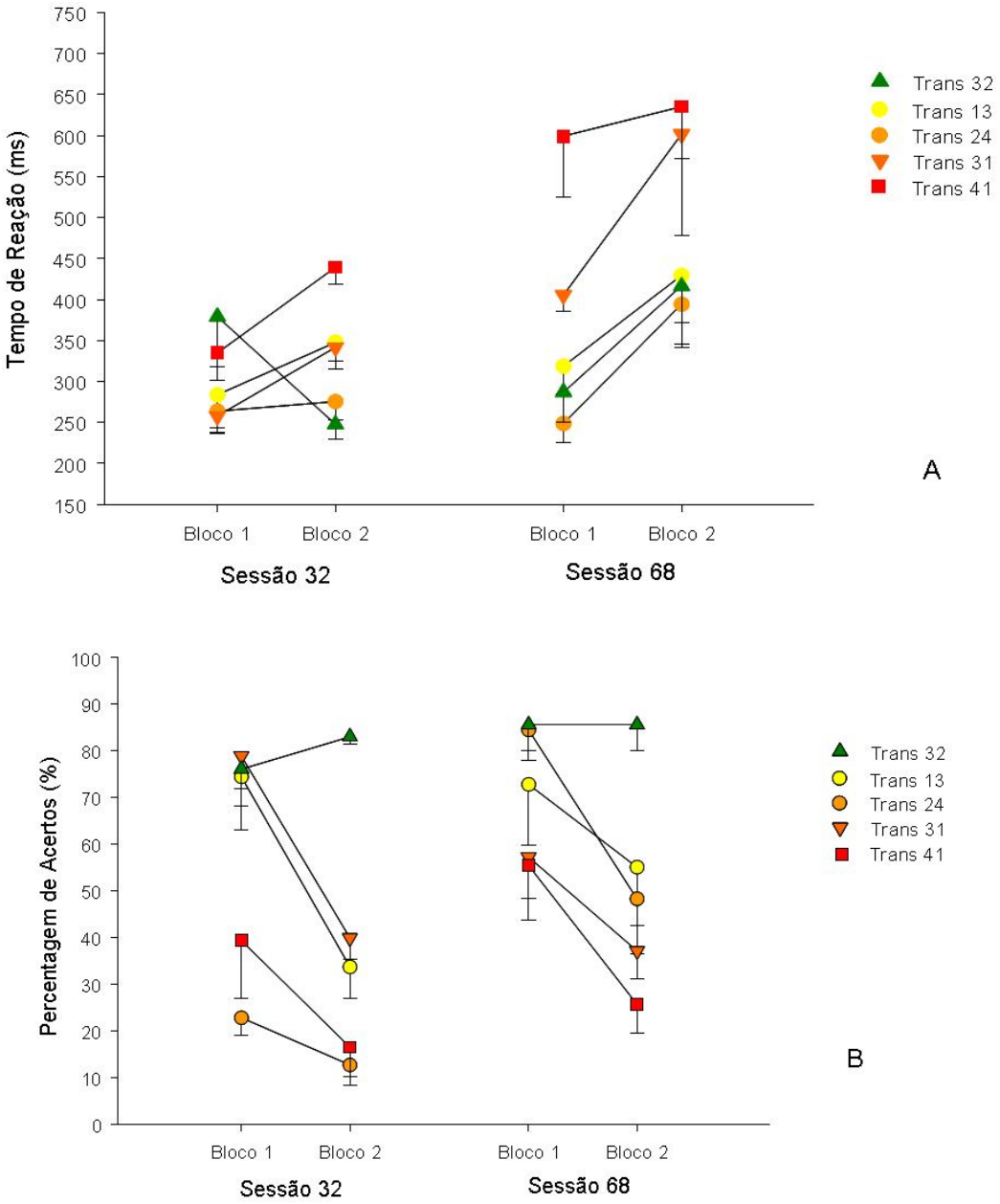


Figura 20. Média **(A)** das medianas dos tempos de reação para cada uma das transições comuns a ambas as sequências incluindo o Bloco 1 das sessões 32 e 68 (sequências fixas das respectivas sessões) e o Bloco 2 das sessões 32 e 68 (sequências variáveis das respectivas sessões) e **(B)** das taxas de acertos para cada uma das transições comuns a ambos os tipos de sequências incluindo o Bloco 1 das sessões 32 e 68 (sequências fixas das respectivas sessões) e o Bloco 2 das sessões 32 e 68 (sequências variáveis das respectivas sessões).

Tempos de reação e percentagem de acertos nas passagens da sequência fixa para a variável, para cada uma das transições comum a ambos os tipos de sequências

Os tempos de reação e as percentagens de acerto incluindo para cada uma das transições comuns a ambos os tipos de sequências das 4 sessões finais de sequências fixas, tanto da Etapa 1 quanto da Etapa 2 (sessões de 28 a 31 e sessões de 64 a 67), foram comparados com os parâmetros correspondentes das 4 sessões de sequências variáveis, tanto da Etapa 1 quanto da Etapa 2 (sessões de 33 a 36 e sessões de 69 a 72) (Figuras 19A e 19B).

Os resultados da análise para cada uma das transições podem ser observados integralmente na Tabela 16, abaixo.

Tabela 16. Resultados da análise dos parâmetros tempos de reação (TR) e taxa de acertos (ACC) para cada uma das transições comum a ambos os tipos de sequências, incluindo os fatores Entropia, Sequência, Sessão e a interação entre os fatores Entropia e Sequência e interação entre os fatores Entropia e Sessão.

	Transição	Entropia	Sequência	Sessão	Entropia X Sequência	Entropia X Sessão
TR	13	F(1,6) = 0,07; P = 0,7962	F(1,6) = 6,49; P = 0,0436	F(3,18) = 2,36; P = 0,1058	F(1,6) = 2,00; P = 0,2067	F(3,18) = 0,33; P = 0,8057
ACC	13	F(1,6) = 5,73; P = 0,0538	F(1,6) = 25,98; P = 0,0022	F(3,18) = 2,40; P = 0,1018	F(1,6) = 5,50; P = 0,0574	F(3,18) = 1,98; P = 0,1525
TR	24	F(1,6) = 1,46; P = 0,2728	F(1,6) = 8,22; P = 0,0285	F(3,18) = 0,52; P = 0,6737	F(1,6) = 4,98; P = 0,0670	F(3,18) = 0,36; P = 0,7836
ACC	24	F(1,6) = 40,55; P = 0,0007	F(1,6) = 41,77; P = 0,0007	F(3,18) = 1,39; P = 0,2776	F(1,6) = 64,88; P = 0,0002	F(3,18) = 0,10; P = 0,6579
TR	31	F(1,6) = 9,92; P = 0,0198	F(1,6) = 9,50; P = 0,0216	F(3,18) = 1,31; P = 0,3023	F(1,6) = 4,86; P = 0,0698	F(3,18) = 2,52; P = 0,0903
ACC	31	F(1,6) = 0,02; P = 0,8837	F(1,6) = 30,82; P = 0,0014	F(3,18) = 2,73; P = 0,0744	F(1,6) = 1,79; P = 0,2296	F(3,18) = 0,32; P = 0,8096
TR	32	F(1,6) = 0,12; P = 0,7428	F(1,6) = 9,27; P = 0,0226	F(3,18) = 1,20; P = 0,3398	F(1,6) = 0,62; P = 0,4608	F(3,18) = 1,10; P = 0,3742
ACC	32	F(1,6) = 0,94; P = 0,3692	F(1,6) = 0,19; P = 0,6817	F(3,18) = 0,50; P = 0,6881	F(1,6) = 0,05; P = 0,8293	F(3,18) = 1,69; P = 0,2049
TR	41	F(1,6) = 12,33; P = 0,0126	F(1,6) = 1,57; P = 0,2567	F(3,18) = 4,30; P = 0,0187	F(1,6) = 3,70; P = 0,1028	F(3,18) = 1,03; P = 0,4010
ACC	41	F(1,6) = 5,30; P = 0,0610	F(1,6) = 9,57; P = 0,0213	F(3,18) = 3,22; P = 0,0475	F(1,6) = 1,05; P = 0,3458	F(3,18) = 0,83; P = 0,4958

DISCUSSÃO

Os animais beneficiaram-se do padrão serial, confirmando resultados de estudos prévios envolvendo aprendizagem serial em ratos (Bailey e Mair, 2006; 2007; Domenger e Schwarting, 2005; 2006; 2007). Além disso, as entropias de cada sequência refletem, com razoável precisão, o desempenho dos animais. Isto é, quando expostos a sequências de estímulos com diferentes quantidades de entropia em ordem 1, H_1=2,75 e H_1=3,00, os animais exibiram tempos de reação menores na primeira, em relação à última (Figura 16A). Essa diferença parece estar relacionada com o fato da sequência H_1=3,00 conter maior número de transições distintas em relação à sequência H_1=2,75 (ver adiante).

Estudos envolvendo aprendizagem serial empregam, usualmente, análises relacionadas a cada item da sequência de eventos (e.g., Figura 5). Nesses casos, o efeito de aprendizagem serial é caracterizado pela redução do tempo de reação ao longo da sequência de eventos, particularmente dos itens situados no fim da sequência e mais próximos ao reforço que levam a menores tempos de reação do que os itens iniciais da série de eventos (Bailey e Mair, 2006; 2007; Domenger e Schwarting, 2005; 2006; 2007).

No presente trabalho, distintamente, a análise enfocou a transição entre um estímulo e outro na sequência, a exemplo de análises empregadas em trabalhos envolvendo humanos (e.g., Nissen e Bullemer, 1987; Cohen, Ivry e Keele, 1990; Reed e Johnson, 1994; Cleeremans e Jimenez,1998; Remillard e Clark, 2001; Pavão e colaboradores, em preparação).

Quando a análise do desempenho dos animais na primeira e segunda etapas incluiu apenas transições comuns a ambos os tipos de sequências, eliminando assim eventos presentes em uma sequência e na outra não, os tempos de reação nas sessões de sequência fixa com entropia em ordem 1 H_1=2,75 não diferiam dos tempos de reação para as sessões de sequência fixa com entropia em ordem 1 H_1=3,00 (ver Figura 17A).

Considerando que tanto as sequências fixas da etapa 1 quanto as sequências fixas da etapa 2 possuem a mesma quantidade de entropia em ordem 2 H_2=2,81 (sessões de 1 a 31 e sessões de 37 a 67), não surpreende que os animais apresentem, de maneira geral, o mesmo desempenho em ambas as etapas e que os tempos de reação nas sessões iniciais envolvendo sequências fixas sejam superiores aos tempos de reação nas sessões finais envolvendo sequências fixas.

Essa diminuição dos tempos de reação nas etapas 1 e 2, está associada ao aumento nas taxas de acerto obtidas pelos animais ao longo dessas sessões. Tal desempenho ficou evidente nas comparações feitas entre as sequências fixas inicias e sequências fixas finas de ambas as etapas. Conforme pode ser observado na Figura 17B, as taxas de acertos nas sessões finais de sequências fixas (sessões de 28 a 31 e sessões 64 a 67, das etapas 1 e 2 respectivamente) são superiores as taxas de acerto das sessões iniciais de sequências fixas (sessões de 1 a 4 e sessões de 37 a 40). Desta forma, o aumento nas taxas de acerto ao longo das sessões de sequências fixas, em ambas as etapas, reflete também uma curva de aprendizagem, isto é, a

variação das percentagens de acerto também revela a capacidade dos animais aprenderem sobre as regularidades presentes nas respectivas sequências.

Em diversos estudos envolvendo tarefas de tempo de reação serial, tanto em humanos quanto em ratos, a alteração de um padrão fixo de sequência de estímulos para um padrão aleatório determina um prejuízo no desempenho da tarefa (Nissen e Bullemer, 1987; Domenger e Schwarting 2005, 2006 e 2007). Da mesma forma, é notório no presente experimento o aumento nos tempos de reação quando as sequências fixas com entropia em ordem 2 H_2=2,81, foram substituídas por sequências variáveis com entropia em ordem 2 H_2=3,33 e H_2=3,62, na primeira e na segunda etapas, respectivamente. A estratégia de substituir sequências fixas por sequências variáveis leva a mudanças significativas na estrutura das sequências. Com isso têm-se perdas significativas de informação sobre suas estruturas (Cohen, Ivry e Keele, 1990).

Interessantemente as sequências utilizadas em ambas as etapas do presente experimento, foram manipuladas de tal forma que, tanto as sequências fixas quanto as sequências variáveis possuem as mesmas regras, ou seja, as relações de probabilidade entre um estímulo e outro são sempre mesmas, inclusive a frequência de cada evento não varia. O que de fato varia é a maneira como os eventos estão encadeados nas sequências de estímulos. Desta forma, um encadeamento fixo que origina um padrão repetitivo de estímulos gera também certa previsibilidade, da qual os animais são capazes de se beneficiarem. Por outro lado, embora as regras e contingências de probabilidades sejam as mesmas que as do padrão fixo, um padrão variável de

eventos confere a sequência de estímulos certa imprevisibilidade. Na passagem de um padrão para outro, pode-se dizer que não houve uma perda de informação exatamente, mas sim uma perda de previsibilidade.

Na Figura 18A nota-se claramente que no momento exato em que o padrão fixo repetitivo é substituído pelo padrão variável, os animais apresentam um prejuízo imediato na tarefa, i.e., há um aumento nos tempos de reação dos animais tanto na Etapa 1 quanto na Etapa 2. Além do aumento nos tempos de reação, o prejuízo exibido pelos animais estende-se às percentagens de acerto. De maneira análoga aos tempos de reação, quando o padrão fixo é substituído pelo padrão variável os animais exibem uma queda nas percentagens de acerto (ver Figura 18B).

Mais do que o próprio prejuízo, nota-se que na sessão mista da Etapa 2 (sessão 68) o aumento dos tempos de reação é maior do que na sessão mista da Etapa 1 (sessão 32), ou seja, o prejuízo apresentado pelos animais na sessão 68 foi maior do que o prejuízo na sessão 32. Do ponto de vista da entropia informacional as sequências fixas repetitivas (Bloco 1 das sessões 32 e 68) possuem uma quantidade de entropia em ordem 2 H_2=2,81. Quando o padrão fixo repetitivo foi substituído pelo padrão variável, houve um aumento na quantidade de entropia das sequências, de maneira que as sequências do Bloco 2 da Etapa 1 passaram a ter uma quantidade de entropia em ordem 2 H_2=3,33 e as sequências do Bloco 2 da Etapa 2 passaram a ter uma quantidade de entropia em ordem 2 H_2=3,62. Quando ocorre a substituição de um padrão de sequência por outro o aumento da entropia das sequências na Etapa 2 é maior do que o aumento da entropia das sequências na Etapa 1.

Como pode ser observado, tal fato refletiu diretamente no comportamento dos animais na tarefa: quando o aumento na quantidade de entropia das sequências é mais elevado, os animais apresentam um maior prejuízo.

Assim, parece haver uma relação direta dos tempos de reação com o padrão e a entropia das sequências, i.e., com a medida formal de complexidade de cada sequência, que por sua vez é determinada pela maneira como cada uma delas está organizada, pelo número de itens que as compõem, e pelo próprio arranjo de probabilidade entre esses itens. Em uma sequência cujos padrões formais de organização determinam que alguns eventos tenham maior probabilidade de ocorrência em detrimento de outros, tem-se um padrão global de complexidade menor do que uma sequência cujo padrão formal de organização determina eventos menor probabilidade de ocorrência. A comparação feita acima pode ser exemplificada pela comparação das sequências utilizadas nas duas etapas do presente experimento. As sequências fixas da primeira e segunda etapa, ambas com quantidade de entropia em ordem 2 H_2=2,81 tem um padrão formal (ver Figuras 14 e 15 e Tabelas 7 e 10) que determina menor complexidade quando comparadas com as sequências variáveis de entropia em ordem 2 H_2=3,33 e H_2=3,62, da primeira e segunda etapa respectivamente (ver Figuras 14 e 15, Tabelas 8 e 11).

Não por acaso sequências menos complexas, com eventos mais prováveis, são também mais previsíveis, pois como possuem menos eventos ocorrendo mais vezes, estão sujeitas a um menor número de combinações possíveis de informações temporais e espaciais. Sabe-se que a previsibilidade,

gerada pelo armazenamento e combinação de informações temporais e espaciais, é a base de um comportamento antecipatório (Brunia, 1999). Desta forma, uma sequência com menor quantidade de entropia favorece a previsão e antecipação de eventos nela contida.

Tendo em vista a quantidade de entropia de uma sequência e a previsibilidade que dela decorre, não surpreende o fato de que para as sequências fixas finais (sessões de 28 a 31 da Etapa 1 e sessões de 64 a 67 da Etapa 2), com entropia em ordem 2 H_2=2,81, os tempos de reação sejam inferiores quando comparados com os tempos de reação para as sequências variáveis de entropia em ordem 2 H_2=3,33 e H_2=3,62 (sessões de 33 a 36 da Etapa 1 e sessões de 69 a 72 da Etapa 2, respectivamente) (Figura 17A). Em outras palavras isso quer dizer que os animais são potencialmente mais eficientes na antecipação de eventos serialmente apresentados em sequências menos complexas.

Igualmente aos tempos de reação, conforme mostra a Figura 17B, os animais também apresentam alterações significantes nas taxas de acerto quando o padrão fixo das sequências é alterado para o padrão variável, sendo que o número de acertos diminui quando o padrão das sequências é variável. Ou seja, o prejuízo se reflete também nas taxas de acertos. Tal resultado confirma que os animais estavam de fato se valendo do padrão de organização serial das sequências fixas, tornando a curva de aprendizagem das sequências fixas, nas respectivas etapas, ainda mais substancial (ver Figuras 17A e 17B).

Conforme discutido anteriormente, as análises dos dados levando em consideração principalmente os valores de entropia em ordem 2 permitem

claramente explicar a relação existente entre os tempos de reação e os respectivos valores de entropia. Em conjunto, os dados obtidos nas análises do tempo de reação levando em consideração os valores de entropia nas duas ordens, levam a crer que os animais são capazes de se beneficiar de eventos agrupados três a três, ou seja, em ordem 2. Tal fato possivelmente seja reflexo de uma capacidade dos animais em processar e integrar pelo menos essa quantidade de unidades de informações de maneira a gerar uma resposta.

Segundo Miller (1956), a organização ou agrupamento de informações provenientes do meio externo em unidades ou "pedaços de informação" (do inglês *chunks of information)*, corresponderia a maneira mais eficiente de adquirí-las e organizá-las. Tal processo ocorre na medida em que eventos ambientais providos de pouca informação e de complexidade relativamente baixa são rearranjados e agrupados resultando em uma representação única com mais informação e complexidade agregadas.

Desta forma, é possível supor que regras associadas a informações espaciais e temporais fragmentadas podem originar uma unidade de informação um tanto mais complexa através de um processo de aprendizagem que agrupa e associa essas informações. Nesse sentido, Cleeremans e McClelland (1991) discutem um mecanismo muito semelhante através do qual sujeitos experimentais diferenciam eventos previsíveis dos eventos imprevisíveis numa sequência de estímulos. Na tentativa de tornar suas respostas mais eficientes, os sujeitos aumentam progressivamente o nível de preparação para os eventos da série baseando suas respostas em um conjunto de informações temporais da sequência cada vez mais amplo. Segundo esses

autores, a incerteza associada ao próximo elemento da sequência seria reduzida a medida que os sujeitos codificassem os elementos da série, agrupando-os e tornando o conjunto de informações relevantes da série cada vez mais vasto.

Graybiel (1998) também faz uso do conceito de "*chunks of information"* para explicar a capacidade de formar unidades de ações motoras compostas por múltiplas ações que estão ordenadas segundo uma ordem temporal particular. Diversos autores já descreveram sobre o papel essencial que os gânglios da base teriam nesse mecanismo (para revisão ver Graybiel, 1998; Packard e Knowlton, 2002).

A elaboração dessas unidades ocorre dentro de circuitos neurais que ligam estruturas corticais aos gânglios da base. Nesse processo, ao longo do treino repetitivo, um conjunto de ações motoras quando acopladas e integradas formam uma única unidade de ação motora. Assim, representações neurais de ações motoras sequenciais são recodificadas, e passam a integrar uma única representação. Por sua vez, o resultado dessa recodificação atinge novamente estruturas corticais através de vias eferentes que partem dos gânglios da base. A essa associação de múltiplas ações ou até mesmo de informações de maneira a se formar uma unidade é atribuído o termo (em inglês) *chunking* (Graybiel, 1998).

Tendo em vista os conceitos apresentados acima, pode-se especular que com base na regularidade de eventos apresentados serialmente, os animais seriam capazes de associar elementos da sequência pelo menos três a três, de maneira a produzir uma resposta para as transições entre os

elementos. Neste caso todas as ações motoras envolvidas na resposta emitida para uma transição entre um estímulo e outro quando integradas, podem ser consideradas uma unidade de ação motora.

Essa capacidade não se explica somente a diferença de desempenho relativo à ordem em que os eventos se encontram agrupados. Tal fenômeno se aplica inclusive às diferenças de respostas que se têm para eventos que se encontram na mesma ordem, mas que no entanto, possuem valores de entropia diferentes. Esse é justamente o caso das sequências fixas e variáveis utilizadas no presente experimento, i.e., as sequências fixas com entropia em ordem 2 H_2=2,81 e as variáveis com entropia em ordem 2 H_2=3,33 e H_2=3,62. Uma vez que o desempenho dos animais na tarefa parece estar fortemente correlacionado ao padrão de complexidade das sequências, parece plausível afirmar que o processamento das informações relativas às sequências com entropia em ordem 2 H_2=2,81 parecem ser mais eficientes do que o processamento relativo às sequências com entropia em ordem 2 H_2=3,33 e H_2=3,62.

As variações dos tempos de reação e das taxas de acerto obtido pelos animais ao longo de cada uma das sessões podem estar relacionadas às variações dos tempos de reação e das taxas de acerto de algumas transições específicas. Tendo em vista as transições analisadas, i.e., transições comuns a ambos os tipos de sequências (13, 24, 31, 32, 41), é interessante notar que tanto nas sequências fixas com entropia em ordem 2 H_2=2,81, das duas etapas, quanto nas sequências variáveis com entropia em ordem 2 H_2=3,33 e H_2=3,62 as transições com maior distância entre um estímulo e outro

(transições 13, 24, 31, e 41) são as transições para as quais o animais apresentam as maiores variações no desempenho (ver Figuras 19A e 19B). De maneira geral, ao longo das sessões envolvendo as sequências fixas os animais diminuíram os tempos de reação e aumentaram as taxas de acerto para essas transições. Tal aumento foi evidenciado pelas diferenças estatísticas envolvendo as sessões inicias e sessões finais de sequências fixas de ambas as etapas. Os resultados também mostram claramente, nas duas etapas experimentais, um aumento nos tempos de reação e uma redução nas percentagens de acerto para as referidas transições quando o padrão fixo é substituído pelo variável (ver Figuras 19A e 19B).

As análises das sessões mistas (32 e 68) evidenciaram as variações de desempenho exibidas pelos animais referentes a cada uma das transições comuns a ambas as etapas. Tanto na sessão mista da Etapa 1 quanto na sessão da Etapa 2, no momento exato em que o padrão fixo repetitivo de estímulos mudou para o padrão variável, os animais apresentaram um aumento nos tempos de reação e queda nas taxas de acertos para todas as transições, exceto para a transição 32 (ver Figuras 20A e 20B). Tal fato sugere fortemente que os animais são capazes de se beneficiarem de eventos particulares na série, i.e., são capazes de aprender sobre regularidades de diferentes eventos presentes nas sequências. Sobretudo, as análises mostram que o desempenho dos animais relativo a cada transição está fortemente correlacionado ao padrão das sequências de estímulos no qual essas transições estão inseridas. Quando os padrões desses eventos mudaram subitamente de fixo repetitivo para um padrão variável, os animais imediatamente exibiram um prejuízo na tarefa.

As transições 13, 24, 31, e 41 são particularmente interessantes e informativas, pois na apresentação do segundo estímulo da transição os animais têm a possibilidade de focinhar um buraco errado que se encontra necessariamente entre um estímulo e outro. A transição 13, que está presente tanto na primeira quanto na segunda etapa, pode ser citada como exemplo. Nessa transição, após o animal ter respondido corretamente para o estímulo 1 da transição, o estímulo 3 será apresentado a ele, no entanto há um buraco interposto entre o buraco 1 e 3, o buraco 2 (ver figura 6B), para o qual o rato pode responder (erroneamente) sem receber qualquer tipo de punição.

Os resultados obtidos através da análise isolada de cada transição das sessões iniciais e finais de sequências fixas de ambas as etapas sugerem que os animais não estavam, nas sessões iniciais, respondendo para as sequências de estímulos, mas emitindo respostas “tentativas”. No entanto, o aumento da percentagem de acerto expresso nas sessões finais de sequências fixas, mostra que os animais passaram a responder para as sequências de estímulos.

Com base nisso é possível afirmar que do ponto de vista comportamental, i.e., do que os animais estão fazendo de fato na tarefa, a variações no desempenho para essas transições ao longo de todo o experimento, confere a elas um caráter informativo.

Neste contexto, diversas tarefas envolvendo aprendizagem serial em ratos tomam como base a acurácia para avaliar o desempenho atencional dos animais. Por exemplo, a tarefa de escolha denominada *5-choice serial reaction time task* é amplamente utilizada com esse propósito (para revisão ver

Robbins, 2002). Essa tarefa possui uma dinâmica de apresentação do estímulo e emissão de resposta muito semelhante às tarefas de tempo de reação serial. Essencialmente, ela avalia a habilidade do rato em sustentar a atenção espacial que está dividida em um certo número de locais, neste caso 5. Essa capacidade é medida através das taxas de respostas corretas. De acordo com Robbins (2002), é notório o comportamento de ratos proficientes na tarefa: eles parecem adotar uma estratégia de monitorar os 5 possíveis locais de apresentação do estímulo, alocando a atenção nesses locais afim de detectar e localizar o estímulo.

Nesse sentido, Domenger e Schwarting (2007) também correlacionam as taxas de acerto com um provável direcionamento atencional para o estímulo visual em tarefas de tempo de reação serial. Mais do que estar direcionada para o estímulo, a atenção muito provavelmente está direcionada para o local onde o estímulo é apresentado (Hoffmann e Koch, 1997). Em conjunto essas idéias podem ser aplicadas na interpretação dos dados obtidos acerca das taxas de acerto. Com base nelas, pode-se dizer que o aumento nas percentagens de acertos de algumas transições específicas no presente experimento (Figuras 19 e 20) parece estar relacionado com o direcionamento atencional para os locais onde os estímulos estão sendo apresentados. Isso leva a crer que informações relativas a localização espacial dos estímulos apresentados são preferencialmente processadas.

Nos estágios iniciais da tarefa de tempo de reação serial, em que há o processamento preferencial de informações espaciais acerca do estímulo, é plausível se pensar no envolvimento da alça vísuo-espacial, que dá suporte ao

Sistema Atencional Superior (SAS), no arquivamento temporário e manipulação de informações visuo-espaciais sobre os estímulos apresentados sequencialmente. Isso parece estar em acordo com a discussão proposta por Howard e col. (2004) no sentido de que algumas informações poderiam ser adquiridas por meio da comparação da representação ativa de sucessivos acontecimentos coincidentes, na memória operacional.

Outros argumentos que embasam essa idéia são provenientes de um experimento envolvendo uma variante da tarefa de tempo de reação serial e imageamento por ressonância magnética funcional, em humanos. De acordo com van der Graaf e col. (2006), a ativação de regiões específicas do córtex frontal reflete um estágio da aprendizagem serial implícita que seria mediado pela memória operacional e facilitado pela associação de informações vísuo-espaciais durante a preparação de múltiplos movimentos gerados em função da antecipação dos estímulos apresentados na tarefa.

Supondo que processos atencionais desempenhem um papel fundamental na aquisição dessas informações, sobretudo no desenvolvimento de estratégias comportamentais antecipatórias, é possível afirmar que tarefas de tempo de reação depende da memória operacional que seria necessária no armazenamento e combinação de regras sobre o padrão serial dos estímulos nos estágios inicias da tarefa, em que o controle comportamental e a aquisição de informações espaciais e temporais dependem do direcionamento da atenção.

É recorrente na literatura a noção de que o SAS teria capacidade limitada (e.g., Baddeley, 2002; Posner, 1980; Helene e Xavier, 2003). Essa

limitação poderia influenciar diretamente a habilidade dos animais em processar e integrar informações, i.e., na habilidade dos animais associarem e recombinarem diferentes informações contidas em uma sequência de estímulo. Isso se expressaria no desempenho dos animais expostos a sequências mais complexas (de maior entropia informacional), com eventos menos prováveis, menos previsíveis e com um número maior de possíveis combinações de informações temporais e espaciais. Por outro lado, sequências de menor complexidade (de menor entropia informacional), favoreceriam o armazenamento e processamento de informações nelas contidas de maneira a tornar mais eficiente o processamento preferencial por meio da atenção e o desenvolvimento de estratégias comportamentais antecipatórias.

Discussão Geral

Os resultados do presente estudo revelam vantagens na aplicação do conceito de entropia informacional em estudos sobre aprendizagem serial em ratos, na medida em que a quantidade de entropia de uma sequência se reflete diretamente no desempenho dos animais, tanto em termos do tempo de reação como, inversamente, na percentagem de acertos.

Diferentemente das análises recorrentes na literatura sobre aprendizagem serial em roedores, o procedimento adotado neste trabalho, análogo ao empregado em estudos envolvendo humanos, baseia-se nas transições entre os estímulos. Assim, a elaboração de um protocolo experimental com maior controle sobre a estrutura das sequências possibilitou investigar de uma maneira diferente o modo como ratos organizam sequencialmente o comportamento baseando-se em informações espaciais e temporais.

A consistência dos resultados obtidos em dois experimentos distintos permite afirmar que a análise conjunta dos tempos de reação e percentagens de acerto, relativamente à entropia informacional das sequências utilizadas, refletem o desempenho dos animais na tarefa. As percentagens de acerto particularmente em sequências com menor entropia, por exemplo, indicam que os animais se valeram do padrão serial, i.e., estavam de fato respondendo para a sequência estímulos. Já o tempo de reação, que avalia a aprendizagem e antecipação por meio da variação da velocidade de resposta em função dos

estímulos apresentados, mostrou-se fortemente correlacionado ao padrão de complexidade de cada sequência. Isso quer dizer que, nos dois experimentos realizados, a variação da complexidade da sequência refletiu diretamente no desempenho dos animais.

No que se refere às taxas de acerto, tal como Domenger e Schwarting (2007) fizeram, é possível correlacionar a variação das taxas de acerto obtidas no presente trabalho com um provável direcionamento atencional para o estímulo visual e/ou para o local onde esse estímulo é apresentado. A variação do padrão espacial de apresentação do estímulo gera uma grande compatibilidade entre o estímulo e a resposta, i.e., as respostas emitidas passam a depender principalmente do padrão espacial de apresentação do estímulo (Hoffmann e Koch, 1997). Desta forma, na presente tarefa de tempo de reação serial, os ratos parecem experienciar a sequência de eventos como um padrão repetitivo de distribuição espacial do estímulo. Neste caso, a organização sequencial do comportamento parece ser guiada por um agente externo, i.e., está sujeita a sequência de estímulos propriamente dita. Com base na aprendizagem dessas regularidades desses estímulos, os animais parecem obter benefícios do padrão repetitivo de estímulos o que leva a antecipação das respostas.

Em estágios mais avançados da tarefa, após sucessivas exposições às sequências fixas de estímulo, as respostas emitidas geram um padrão regular de movimentos que supostamente pouco dependem do direcionamento atencional. Parece razoável afirmar que em decorrência de um padrão de movimentos executados repetidas vezes, há a formação de um plano motor de

alta ordem que assume o controle de respostas repetidas, tornando-as cada vez mais automatizadas e independentes dos estímulos apresentados. Com base nisso, pode-se dizer que o controle comportamental passa a depender de um fator interno, ou seja, a organização sequencial do comportamento está ligada aos planos motores estabelecidos. Deste modo, a aprendizagem serial mostra-se intensamente relacionada ao padrão de respostas geradas (Hoffmann e Koch, 1997).

Em certo sentido, nas tarefas de tempo de reação serial a aquisição e armazenamento de informações acerca do padrão serial de estímulos, regras e relações de probabilidades entre estímulos que compõem uma sequência, parecem ocorrer de maneiras distintas dependendo do estágio em que se encontra na tarefa.

Nos estágios iniciais em que os ratos têm pouco conhecimento sobre as sequências, o fato de que as respostas emitidas por eles estarem relacionadas ao padrão espacial de apresentação dos estímulos e do direcionamento da atenção para esse padrão espacial, sugere fortemente que sistemas de memória operacional estão envolvidos no arquivamento temporário e manipulação de informações dos estímulos sequencialmente apresentados. Assim, a aprendizagem sobre as regularidades dos estímulos, bem como a organização sequencial do comportamento e estratégias antecipatórias que dela decorrem, estariam sujeitas ao funcionamento do Sistema Atencional Superior.

Já em estágios mais avançados, quando os animais atingem desempenho assintótico na tarefa, as repostas emitidas por eles parecem estar

mais automatizadas. Segundo Helene e Xavier (2003), tal automatização aliviaria a carga atencional. Isso sugere que com o treino repetitivo a aquisição e armazenamento de regras e informações sobre os padrões das sequências dependem em grande parte de sucessivas repetições de eventos e respostas emitidas que, por conseguinte levam a formação de planos motores. Desta forma, esses planos motores assumiriam o controle das respostas, influenciando inclusive na organização sequencial do comportamento e no desenvolvimento de estratégias antecipatórias.

Independente da etapa do processo de aprendizagem serial, tanto a formação de planos motores de alta ordem, quanto o direcionamento atencional para o local onde o estímulo será apresentado podem levar a uma redução do tempo de reação ao longo das sessões. Do ponto de vista neurofisiológico, elevados níveis de processamento, caracterizados pela pré-ativação de algumas áreas motoras e sensoriais e inibição de outras, ocorrem no sentido de facilitar o processamento sensório-motor de um evento esperado antes mesmo de sua ocorrência. Isso quer dizer que a antecipação revela-se no domínio perceptual do comportamento, atuando no direcionamento atencional e, no domínio motor do comportamento, caracterizado por respostas baseadas num plano motor (Brunia, 1999).

Dado esse caráter antecipatório gerado pelo direcionamento atencional e pelos planos motores estabelecidos, pode-se concebê-los como modelos antecipatórios, pois cumprem a função de um mecanismo gerador de expectativas, i.e, neles residem informações espaciais e temporais provenientes de um padrão regular de movimentos relativos a um padrão

repetitivo de estímulos esperado (Brunia, 1999; Bubic, von Cramon, Schubotz, 2010). Portanto, a redução do tempo de reação ao longo das sessões envolvendo sequências fixas, que permitem a elaboração de previsões, remete ao fato de que alguma maneira os animais desenvolvem uma estratégia comportamental antecipatória baseada na “expectativa” acerca do padrão serial repetitivo de estímulos. Por sua vez, as expectativas associam-se a organização e processamento de informações durante a elaboração de respostas antes mesmo de sua execução (Schwarting, 2008).

Tendo em vista a alta correlação existente entre o desempenho dos animais nas tarefas com os diferentes padrões de complexidade das sequências de estímulos apresentadas tanto no Experimento 1 quanto no Experimento 2, é possível conceber que os animais desenvolvem diferentes estratégias comportamentais antecipatórias, que variam de acordo com o próprio padrão serial de eventos; em outras palavras pode-se dizer que animais adotam diferentes estratégias em função de diferentes demandas apresentadas a eles.

Por exemplo, no Experimento 1 cujas sequências de estímulos apresentadas eram aleatórias, os animais baseiam suas respostas na associação estímulo-resposta. Essas condições impossibilitam os animais de gerar previsões acerca do padrão serial de estímulos. Entretanto, dado a disposição espacial onde estímulos são apresentados (ver Figura 6B), os animais foram capazes de criar uma estratégia antecipatória que de certa forma reduz a “incerteza” em uma condição imprevisível. Conforme apresentado e discutido anteriormente no Experimento 1, os animais exibem

respostas mais rápidas e precisas para o local onde o estímulo tem uma maior probabilidade de ser apresentado, ou seja, os animais parecem direcionar o movimento para os onde o estímulo tem maior chance de ocorrer. Há que se ressaltar que fazendo uso dessa estratégia os animais não raro emitem respostas incorretas, porém, não aleatórias.

Já em condições em que existe uma regularidade nas sequências de estímulos e a despeito da complexidade dessas sequências, há também associação do tipo estimulo-resposta. No entanto, o próprio padrão formal que determina a regularidade dos eventos possibilita que se crie uma expectativa acerca dos estímulos. Seja através do direcionamento atencional nos estágios iniciais (organização sequencial do comportamento guiado por um agente externo), seja pela automatização das respostas em estágios mais avançados (controle comportamental sujeito a um controle interno), os ratos mostraram-se capazes de aprender sobre informações temporais e espaciais que determinam padrões seriais.

Do controle externo e interno do comportamento intrinsecamente envolvidos nos processos de aprendizagem serial, decorrem a elaboração de estratégias comportamentais que permitem a antecipação de eventos, claramente observada ao longo das sessões em que um padrão fixo repetitivo de estímulos era apresentado aos animais.

Conclusão

Através da aplicação do conceito de entropia informacional pode-se formalmente obter uma medida quantitativa que representa a complexidade de uma sequência de eventos, que permite, em certa medida, prever o desempenho dos animais na tarefa de tempo de reação serial. Essa possibilidade de prever o comportamento dos animais, nas condições experimentais adotadas no presente estudo, parece estar relacionada à quantidade de entropia informacional em ordem 2: quanto maior a entropia informacional, pior o desempenho dos animais tanto em termos do tempo de reação como em termos da percentagem de respostas corretas.

Essa relação entre entropia informacional das sequências e o desempenho de ratos na tarefa de tempo de reação serial, ampliou a maneira de se analisar o comportamento de ratos nessa tarefa e gerou discussões mais informativas e amplas acerca da estrutura e complexidade de sequências de eventos utilizadas em estudos de aprendizagem serial. Interessantemente, o uso do conceito de entropia informacional proporcionou um controle muito abrangente da estrutura das sequências que, foram manipuladas de maneira a se gerar, empregando as mesmas regras e relações de probabilidade, situações que favorecem a previsibilidade e situações em que há perda de previsibilidade; justamente por essa razão o presente trabalho amplia as discussões envolvendo tarefas de tempo de reação serial em ratos.

Em outras palavras, a implementação desse instrumento de quantificação da complexidade de sequências de estímulos permitiu controlar com maior precisão o desafio imposto ao animais e relacionar esse desafio com seu desempenho.

Tendo em vista a quantidade de entropia de uma sequência e a previsibilidade que dela decorre, uma sequência com menor quantidade de entropia favorece a previsão e antecipação de eventos nela contida, pois como se sabe, ela esta sujeita a um menor número de combinações possíveis de informações temporais e espaciais. Considerando a quantidade de entropia informacional nas ordens 1 e 2 e os desempenhos observados (principalmente no Experimento 2), é possível afirmar que os animais são capazes de se beneficiar da complexidade das sequências relacionando três a três elementos nelas contidas. Provavelmente, valendo-se dos elementos das sequências agrupados em ordem 2, os animais seriam capazes tanto de processar e integrar informações quanto de gerar respostas antecipatórias para esses eventos.

Não é possível afirmar qual seria o limite da capacidade dos animais em processar e integrar informações, ou seja, até que nível de complexidade os animais seriam capazes de se beneficiarem através da aquisição e armazenamento de informações acerca do padrão serial de estímulos. No entanto, partindo do pressuposto que o desempenho dos animais esteve fortemente correlacionado ao padrão de complexidade das sequências, i.e., a quantidade de entropia das sequências, admitir a existência de um limite de complexidade da qual os animais seriam capazes de se beneficiarem parece

uma hipótese plausível. Certamente essa e outras questões podem ser respondidas através de um desenho experimental que avalie o desempenho de ratos submetidos a uma tarefa de tempo de reação serial envolvendo um número maior de sequências de estímulos com diferentes quantidades de entropia informacional.

Supondo ainda que seja estabelecido um limite de complexidade da qual os animais seriam capazes de se beneficiar, o esclarecimento dos fatores neurofisiológicos que levariam a imposição desses limites seguramente aumentaria a compreensão dos mecanismos envolvidos tanto nos estágios iniciais quanto nos estágios mais avançados do processo de aprendizagem serial.

Referências Bibliográficas

ANDERSON, J.R. Skill acquisition: Compilation of weak-method solutions. **Psychological Review**. v. 94. p. 192-211, 1987.

BADDELEY, A. Working memory. **Science** v. 255, p. 556 – 559, 1992.

BRUNIA, C.H.M. Neural aspects of anticipatory behavior. **Acta Psychologica** v.101 p. 213 - 242, 1999.

BUBIC A.; von CRAMON D.Y.; SCHUBOTZ R.I. Prediction, cognition and the brain. **Frontiers in Human Neuroscience**. v. 4 p.1– 15, 2010.

CAPALDI E.J;, MILLER D.J. Serial learning in rats: a test of three hypotheses. **Learn Motiv**. v. 35 p.71-81, 2004.

CLEEREMANS, A.; MCCLELLAND, J.L. Learning the structure of event sequences. **Journal of Experimental Psychology: General**. v.120, p.235–253, 1991.

COHEN, A.; IVRY, R.I.; KEELE, S.W. Attention and structure in sequence learning. **J Exp Psychol Learn Mem Cogn**. v. 16, p.17-30, 1990.

CRAPSE, T.B.; SOMMER, M.A. Corollary discharge across the animal kingdom. **Nature Reviews Neuroscience**. v. 9, p. 587-600, 2008.

DOMENGER, D; SCHWARTING, R.K.W. Sequential behavior in the rat: role of skill and attention. **Experimental Brain Research**. v. 182, p. 223-231, 2007.

FOUNTAIN, S. B. Pattern structure and rule induction in sequential learning. **Comparative Cognition e Behavior Reviews**. v. 3, 66-85, 2008.

GRAYBIEL, A.M. The basal ganglia and chunking of action repertoires. **Neurobiology of Learning and Memory**, v. 70 p.119–136, 1998.

HADDAD Jr, H. **O efeito modulatório de ações motoras em latências perceptivas visuais**, 2008 Tese (Doutorado em Ciências – Fisiologia Humana). Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo.

HELENE A.F.; XAVIER G.F. Building attention from memory. **Revista Brasileira de Psiquiatria** v. 25 p. 12-20, 2003.

HOFFMANN, J.; KOCH, I. Stimulus-response compatibility and sequential learning in the serial reaction time task. **Psychological Research**, v. 60, p. 87-97, 1997.

HOWARD, D.V.; HOWARD, J.H.; Jr., JAPIKSE, K.C.; DIYANI, C.; THOMPSON, A.; SOMBERG, R. Implicit sequence learning: Effects of level of structure, adult age, and extended practice. **Psychology and Aging**. v. 19, n.1, p.79–92, 2004.

HULSE, S. H.; DORSKY, N. P. Structural complexity as a determinant of serial pattern learning. **Learning and Motivation**, v.8, p.488–506, 1977.

HULSE, S. H.; DORSKY, N. P. Serial pattern learning by rats: Transfer of a formally defined stimulus relationship and the significance of nonreinforcement. **Animal Learning and Behavior**, v. 7, p.211–220, 1979.

MILLER, G. A. The magic number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. **Psychological Reviews**, v.63, p.81–97, 1956.

NISSEN, M. J.; BULLEMER, P. Attentional requirements of learning: evidence from performance measures. **Cognitive Psychology**, v.19, p.1-32, 1987.

PACKARD, M.G.; KNOWLTON, B.J. Learning and memory functions of the basal ganglia. **Annu. Rev. Neurosci**. v. 25, p. 563 – 593, 2002.

PAVÃO, R. **Entropia informacional e aprendizagem de sequências**, 2011 Tese (Doutorado em Ciências – Fisiologia Geral). Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo.

PAVÃO, R.; SAVIETTO, J.; SATO, J; XAVIER, G.F.; HELENE, A.F. Description of sequence learning by information entropy (artigo em preparação), 2011.

POSNER, M.I. Orienting of attention. **Quaterly Journal of Experimental Psychology**, v. 32, p. 3-25, 1980.

REED J.; JOHNSON P. Assessing implicit learning with indirect tests: determining what is learned about sequence structure. **J Exp Psychol Learn Mem Cogn**, v.20 p.585 – 594, 1994.

REMILLARD, G.; CLARK, J.M. Implicit learning of first-, second-, and third-order transition probabilities. Journal of Experimental Psychology: **J Exp Psychol Learn Mem Cogn**, v. 27, n.2, p.483-98, 2001.

ROBBINS, T.W. The 5-choice serial reaction time task: behavioural pharmacology and functional neurochemistry. **Psychopharmacology**, v.163, p.362 – 380, 2002.

SARTER, M; GIVENS, B.; BRUNO, J.P. The cognitive neuroscience of sustained attention: where top-down meets bottom-up. **Brain Research Reviews**, v. 35, p.146–160, 2001.

SCHWARTING, R.K.W. Rodent models of serial reaction time tasks and their implementation in neurobiological research. **Behavioural Brain Research**, v.199, p 76-88, 2008.

SHACTER, D.L. Implicit memory: history and current status. **J Exp Psychol Learn Mem Cogn**, v.13, p.501-508, 1987.

SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **Bell System Technical Journal**, v. 27, p. 379-423 ; 623-656, 1948.

SEGER, C. A. Implicit learning. **Psychological Bulletin**, v.115, p.163–196, 1994a.

SEGER, C.A. Two forms of sequential implicit learning. **Consciousness and Cognition**, v.6, p.108–131, 1997.

van der GRAAF, F.H.C.E., MAGUIRE, R.P., LEENDERS, K.L., de JONG, B.M. Cerebral activation related to implicit sequence learning in a double serial reaction time task. **Brain Res**. v. 1081, p.179–190, 2006.

WALLACE, D.G.; FOUNTAIN, S. B. What is learned in sequential learning? An associative model of reward magnitude serial-pattern learning. **Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes**, v.28, p.43–63, 2001.

WILLINGHAM, D.B. A neuropsychological theory of motor skill learning. **Psychological Review**. v.105 n.3, p.558–584, 1998.