



INSTITUTO
BUTANTAN

Síntese de criaturas simbólicas: um experimento em vida artificial

João Queiroz^{1,2}

Angelo Loula¹

Introdução

É enorme o número de trabalhos recentemente publicados sobre emergência de *semiose*, em sistemas biológicos e computacionais (Vogt 2006, 2003; Roy 2005a,b; Wang & Minett 2005; Freeman 2004; Bickhard 2004; Nöth 2004; Christiansen & Kirby 2003; Cangelosi & Turner 2002; MacLennan 2001, 2002; Ziemke & Sharkey 2001; Jung and Zelinsky 2000; Batali 1998; Cariani 1998; Hoffmeyer 1996; Emmeche & Hoffmeyer 1991; Hutchins & Hazlehurst 1995). Jablonka (2002: 603; também Jablonka & Lamb 2005, Szathmáry & Maynard Smith, 1995; Maynard Smith & Szathmáry, 1999) resume assim a importância do tema: ‘eu compartilho com Maynard Smith e Szathmary a convicção de que a evolução de modos de estocagem e transmissão de informação são um tema maior na evolução da vida. Como vejo, um dos mais importantes aspectos da evolução tem sido a seleção de sistemas que podem interpretar tipos adicionais de informação, e a conseqüente emergência de novos sistemas de herança’. Temos, em diversos trabalhos, enfatizado a importância de imprimir um significado pre-

¹ Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências (UFBA)

² Área de Informática do Departamento de Ciências Exatas da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)

ciso a duas importantes noções: emergência e sistemas semióticos (Queiroz & Merrell, prelo; Loula, Gudwin & Queiroz 2004; El-Hani, Queiroz & Emmeche 2006; Queiroz & El-Hani 2006a,b). Não vamos nos deter aqui neste problema.

Vamos apresentar um modelo computacional concebido para simular a emergência de ‘comunicação baseada em símbolos’ em um ambiente virtual de predação. Chamamos o experimento de *The Symbolic Creatures Simulation*. É bem conhecido que Vida Artificial (Langton 1995), Robótica Evolutiva (Nolfi & Floreano 2002), Animats (Dean 1998) e Etologia Sintética (MacLennan 2002) são as principais áreas envolvidas na modelagem e simulação de sistemas e criaturas capazes de produzir alguma forma de atividade ou comportamento semiótico. Estas áreas divergem em suas pretensões, e estão baseadas em diferentes ferramentas computacionais, mas são fortemente influenciadas por metaprincípios (*formal-theoretical constraints*) e por motivações biológicas (*empirical constraints*), no projeto dos ambientes e definição morfológica de sensores, atuadores, arquitetura e processos cognitivos dos sistemas e criaturas concebidos. Isto significa, na prática, que estes dois conjuntos de restrições e motivações informam ao cientista: o que se pretende simular? o que precisa ser considerado? como saber (critérios de avaliação) se o resultado é uma boa simulação?

Para definir os metaprincípios e as motivações biológicas, apresentaremos brevemente algumas noções fundamentais da semiótica de C.S.Peirce e a redescritção de um conhecido caso de comunicação animal. Este caso funciona como o *corpus* de motivações biológicas (*empirical constraints*) para o design das criaturas e do ecossistema digitais. As questões que mais nos interessam aqui são: como competências semióticas de ‘alto nível’ (e.g. simbólicas) emergem de competências de ‘baixo nível’ (e.g. indexicais) em processos de cooperação inter-agentes? Se há uma transição de uma fase pré-simbólica (e.g. indexical) para uma fase simbólica, quais os mecanismos envolvidos nessa transição? Estas questões dependem, obviamente, da definição de símbolo. Baseamos nossos argumentos em uma tradição derivada

das investigações de Peirce, e encontrada em filósofos e cientistas interessados em fenômenos de significado, linguagem e comunicação, em diversas áreas – e.g. Vogt (2006, 2002); Pietarinen (2005); Deacon (1997); Habermas (1995); Emmeche (1991); Fisch (1986).

1. *Semiose e símbolos*

Qual ‘a natureza essencial e variedade fundamental de todas as possíveis semioses?’ (CP 5.488) Para responder essa pergunta, Peirce construiu uma teoria lógica-fenomenológica de categorias. Trata-se de um sistema exaustivo de relações, hierarquicamente organizado em classes de relações (3-ádicas, 2-ádicas e 1-ádicas) (CP 5.488; Burch, 1991; Brunning, 1997). Esse sistema é a fundação formal de seu modelo de semiose e de suas classificações sîgnicas.

Para Peirce, a semiose consiste em uma relação entre três termos irreduzivelmente conectados (Signo-Objeto-Interpretante), que são seus elementos constitutivos (EP 2:171). Trata-se de um processo auto-corretivo cuja dinâmica exhibe uma irreduzível relação (3-ádica) entre Signo, Objeto, e Interpretante, que é o efeito em um Intérprete. Peirce (ver De Tienne 2003) também define um Signo como um meio para a comunicação de uma forma, ou para transferência de um hábito incorporado no Objeto para um intérprete, de tal modo a restringir seu comportamento:

[...] um Signo pode ser definido como um Meio para a comunicação de uma Forma. Como um meio, o Signo está essencialmente em uma relação triádica, para o seu Objeto que o determina, e para o seu Interpretante que ele determina. [...] Aquilo que é comunicado do Objeto através do Signo para o Interpretante é uma Forma; o que significa dizer, não é nada como um existente, mas é um poder, é o fato de que alguma coisa aconteceria sob certas condições (EP 2.544, n.22).

Há três possíveis modalidades de semiose: icônicas, indexicais e simbólicas. Elas correspondem, aproximadamente, a relações de *similaridade*, de *contigüidade física*, e de *lei* entre um signo (S) e seu

objeto (O). As propriedades associadas a essas modalidades são, respectivamente: (i) relação S-O dependente das propriedades de S, (ii) S-O em reação espaço-temporal (contigüidade física S-O), (iii) S-O dependente da mediação de I.

Ícones são signos que estão para seus objetos através de similaridade ou semelhança (CP 2.276), sem consideração por qualquer conexão espaço-temporal que possam ter com qualquer O existentes (CP 2.299). Se uma relação signo-objeto (S-O) é uma relação de analogia, isto é, se S é um signo de O em virtude de uma certa qualidade que S e O compartilham, então S é ícone de O. Se S é um ícone de O, comunica, para I, uma qualidade de O. Em outras palavras, um signo icônico comunica um hábito incorporado no objeto para o interpretante, de tal modo a restringir o comportamento do intérprete, como o resultado de uma certa qualidade que o signo e o objeto compartilham. O que é comunicado do objeto para o intérprete, através do signo, é uma ‘similaridade geral’. Entre os casos mais mencionados de ícones, encontram-se exemplos de ‘imagens’, ‘diagramas’, ‘metáforas’ (CP 2.278), ‘mapas’ e ‘hieróglifos’.

Em contraste, se S é um signo de O em razão de uma relação diádica com O, então ele é índice de O. Nesse caso, S e O estão relacionados através de uma ‘conexão física direta’ (CP 1.372). S é realmente determinado por O de tal modo que ambos devem co-existir como eventos: ‘um índice é um signo que se refere ao objeto que denota em virtude de ser realmente afetado pelo objeto’ (CP 2.248). A noção de co-variação espaço-temporal é uma propriedade característica dos processos indexicais. Os exemplos incluem de um ‘pronome demonstrativo ou relativo’, que ‘força a atenção para um objeto particular, sem descrevê-lo’ (CP 1.369), a sintomas físicos de doenças, fotografias e termômetros (CP 2.265).

Finalmente, em um símbolo, a relação entre S e O é logicamente dependente do terceiro termo da relação, do interpretante: ‘o símbolo está conectado com o objeto em virtude da idéia de uma mente que usa o símbolo, sem a qual tal conexão não existiria’ (CP 2.299). Em um símbolo, as relações determinativas entre S e O são *legais*: ‘um símbolo é uma lei, ou regularidade do futuro indefinido’ (CP 2.293).

Temos sugerido (Ribeiro et al. prelo, Queiroz 2003, Queiroz & Ribeiro 2002;) que resultados descritos pelos etólogos Cheney e Seyfarth (Cheney & Seyfarth 1990), em seus experimentos de campo com macacos-vervets (*Chlorocebus aethiops*), satisfazem, consistentemente, os critérios Peirceanos de semiose simbólica.

2. Comunicação simbólica em primatas não-humanos

Os macacos-vervets possuem um sofisticado e bem documentado repertório de vocalizações usado em interações sociais intra-específicas (confrontação e formação de alianças de diversos tipos), bem como para indicar a presença de predação iminente (Seyfarth, Cheney & Marler 1980; Seyfarth & Cheney 1992). Estudos de campo revelam três tipos de alarmes usados para indicar a presença de (1) predadores mamíferos terrestres, (2) aves de rapina, e (3) cobras. O comportamento do grupo, subseqüentemente à produção do alarme, é um indicador de interpretação discriminada do alarme. Quando alarmes de leopardo são produzidos, vervets fogem para o topo das árvores mais próximas; alarmes de águia produzem fuga para debaixo de arbustos; para alarmes de cobra, a reação é um escrutínio atento da relva. Os adultos produzem as vocalizações em referência à presença de predadores específicos, gerando reações específicas em todo o grupo.

Usamos as respostas comportamentais como indicadores da formação de símbolos, uma estratégia corrente em etologia. Sugerimos que a passagem de um comportamento que produz ‘rastreamento sensorio’, em seqüência a audição de um alarme, para um comportamento que produz fuga imediata, em seqüência a audição do mesmo alarme, equivale à passagem de uma semiose indexical, reativa espaço-temporalmente, para uma semiose simbólica. O objeto do signo, neste segundo caso, é um *tipo* de objeto, e não precisa existir como um evento. Em outras palavras, a transição índice => símbolo deve estar na passagem do objeto (do signo), que é um evento, e co-incide espaço-temporalmente com a vocalização (signo), para um objeto que é uma classe de eventos, e não precisa estar presente como uma ocorrência. O ‘efeito colateral’ é uma criatura

que não *rastreia* o ambiente para fugir. A maturação ontogenética tardia deste processo sugere que ele depende de uma fase indexical de aprendizagem. Simulamos os mecanismos envolvidos nesta passagem. O simulador permite investigar alguns *pré-requisitos* que devem ser satisfeitos para emergência de semiose simbólica.

3. *The Symbolic Creatures Simulation: experimento em Etologia Sintética*

Simulamos um ecossistema que permite interação entre criaturas, incluindo comunicação intra-específica para a presença de predadores, uma atividade que provê vantagem seletiva aos seus usuários. O ambiente (Figura 1) funciona como um laboratório para simular a emergência de comunicação. Para construí-lo, e inferir as condições mínimas para o design das criaturas, examinamos o caso de comunicação animal descrito e propomos: (i) síntese de criaturas para investigar: (ii) aprendizagem de modalidades sígnicas em eventos de comunicação, (iii) relação entre as modalidades (índices - símbolos).

As criaturas são agentes autônomos, habitando um ambiente virtual 2D, e estão equipadas com sensores e habilidades motoras, permitindo interações com o mundo virtual, através de parâmetros

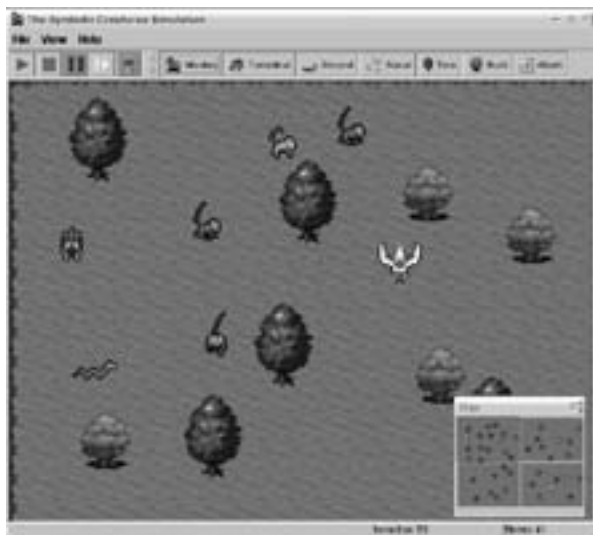


Figura 1: The Symbolic Creatures Simulation, usado para simular interação entre criaturas (para mais detalhes, ver Loula et al 2004, e www.dca.fee.unicamp.br/projects/artcog/symbcreatures).

de ação fixos e competências modificáveis. As criaturas (presas e predadores) são controladas por uma arquitetura baseada em *comportamentos* (Brooks 1991), onde diversos módulos paralelos podem ser ativados. Estes módulos descrevem comportamentos associados a *drives* e indicam suas motivações para ativação conforme o estado interno da criatura e o estado do ambiente.

Há três tipos de predadores: terrestres, rastejantes, aéreos. Eles produzem reações específicas de fuga entre as presas. Elas se dividem em instrutores, que vocalizam alarmes para os predadores, e aprendizes, que procuram estabelecer conexões entre alarmes e eventos co-ocorrentes, por meio de mecanismos de aprendizagem associativa.

A aprendizagem associativa permite estabelecer relações signo-predação, com resposta (motora) de fuga. Aprendidas satisfatoriamente, essas relações formam *regras de ação*. A aprendizagem generaliza relações espaço-temporais, entre eventos percebidos, a partir de co-ocorrências particulares entre alarmes e predadores, transformando índices em símbolos. A presa possui estruturas de memória para armazenamento e manipulação desses eventos: memórias de trabalho e memória associativa. Nas memórias de trabalho, auditiva e visual, estímulos sensoriais (icônicos) são armazenados temporariamente e disponibilizados para a memória associativa. (Figura 2) Quando duas informações (visual e auditiva) estão simultaneamente presentes nas memórias de trabalho, é



Figura 2: Aprendizado associativo, dos sensores para a memória associativa. Sensores recebem os estímulos sensoriais que são mantidos na memória de trabalho, e são usados pela memória associativa para criar diferentes relações entre os estímulos.

criada, ou reforçada, uma ligação entre elas na memória associativa (com valor limitado entre 0 e 1), seguindo o princípio Hebbiano de aprendizagem. Quando um item é retirado da memória de trabalho, as associações relacionadas que não foram reforçadas, são enfraquecidas. (Figura 3) Estes ciclos de ajuste positivo (reforço), e negativo (enfraquecimento), permitem que a criatura aprenda as associações corretas (signo-predador).

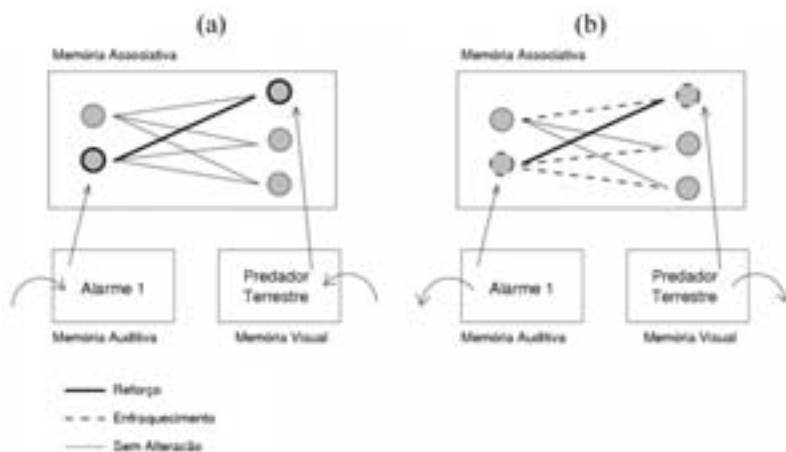
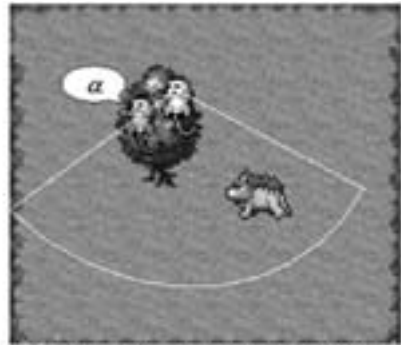
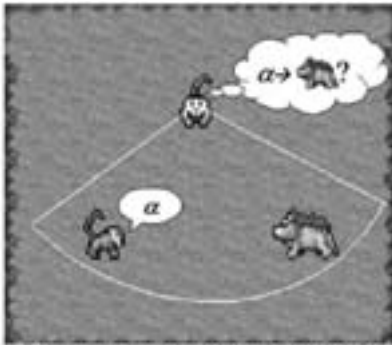


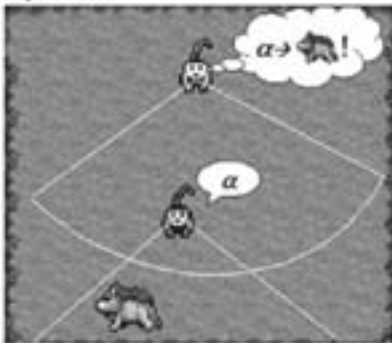
Figura 3: Reforço e Enfraquecimento. (a) A co-ocorrência de estímulos visual e auditivo nas memórias de trabalho, reforça a associação entre eles na memória associativa. (b) Ao saírem da memória de trabalho, todas as associações das quais estes estímulos fazem parte na memória associativa, e que não foram reforçadas, são enfraquecidas.

À audição de um alarme, a presa exibe inicialmente um comportamento de varredura sensorial por um emissor e eventos co-ocorrentes, que é uma resposta tipicamente indexical (Figura 4). Mas a ‘força’ de associação signo-predador aumenta a ponto de estabelecer um certo limiar (próximo do valor máximo)¹ e criar uma nova *regra de ação* -- ‘fuga sem varredura’. Nesta situação dizemos que a presa fez uso de uma associação pré-estabelecida para interpretar um alarme, sem disparar uma resposta de varredura mas

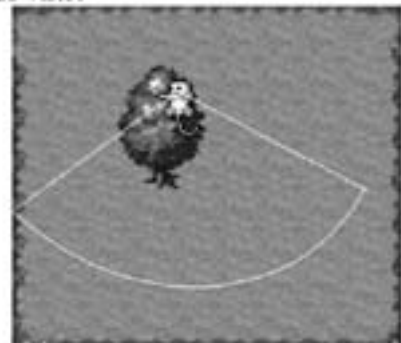
¹ Veja Loula *et al* (2004) para ver resultados numéricos do aprendizado e convergência para associações alarme-predador.



Durante a fase indexical, o aprendiz tem sua atenção dirigida para o predador ao ouvir uma vocalização. A percepção de co-ocorrência destes eventos reforça a associação entre alarme e predador. A visualização do predador, faz as presas fugirem de maneira específica.



Quando o aprendiz ouve uma vocalização mas não vê o predador, ele pode relacionar o alarme com o predador se a associação já tiver atingido valores altos. Isto também causa uma fuga específica, sem que o predador tenha sido visto.



Simulando um experimento de *playback*, um alarme pode ser reproduzido para o aprendiz que possuindo uma associação com o predador com valor alto, irá fugir especificamente, mesma na ausência do predador.

Figura 4: Efeitos dos alarmes em diferentes momentos nos aprendizes.

fugindo segundo o tipo de predador associado. Nesta situação podemos dizer que a relação entre alarme (S) e predador (O) é dependente do intérprete e não de uma conexão física, espaço-temporal. O alarme é um símbolo.

4. Vantagem Adaptativa

O mecanismo de aprendizagem das presas é capaz de estabelecer associações entre os alarmes e predadores, convergindo para próximo do valor máximo, ao final. Mas este é somente um aspecto da aprendizagem associativa, onde os sensores visuais e auditivos influenciam a dinâmica da memória associativa. Mas existe também uma realimentação desta memória, na qual o comportamento da presa é influenciado pelas associações estabelecidas. Esta realimentação define a utilização funcional das associações que são aprendidas. Esta característica (funcionalidade) é marcante em comunicação animal, uma vez que a evolução privilegia novas habilidades que aumentam chances de sobrevivência, ou ‘vantagens seletivas’ (ver Hauser 1997, Seyfarth & Cheney 2003)

Para analisar a vantagem seletiva no sistema de comunicação, façamos uma rápida comparação entre o uso indexical e o uso simbólico dos alarmes. Se a comunicação é indexical, a audição de um alarme dirige a atenção da presa para o emissor, e seus arredores, e significa que a presa não é capaz de estabelecer relações de associação entre alarmes e itens do ambiente, ou, se é capaz de as aprender, que estas associações não afetam o seu comportamento. Quando alarmes são interpretados como símbolos, a presa pode reconhecer uma associação de um alarme ouvido com um predador específico, e utilizá-lo para fuga imediata, sem visualizar o predador. Para ser ‘responsivo’ a índices, é suficiente um comportamento de varredura visual, dirigida ao emissor do alarme e arredores. Para manipular símbolos, a criatura deve estabelecer relações entre estímulos e utilizá-las de modo que esta realimentação possa afetar seu comportamento.

Se, respondendo indexicalmente ao alarme, a presa sempre tiver sua atenção dirigida para um predador, ela sempre poderá fugir

na presença de alarmes, de forma correta, especificamente para cada predador. Nesta situação, o uso de símbolos se tornaria desnecessário, uma vez que um comportamento mais básico parece suficiente. Mas este não é o caso, muitas vezes, já que predadores não são facilmente avistados: a águia ataca mergulhando repentinamente, o leopardo se aproxima furtivamente, escondendo-se atrás de arbustos, a cobra ataca sorratamente através da grama alta (Seyfarth & Cheney 1990). Para simular estas propriedades, impusemos uma restrição à visualização de predadores: sempre que um predador estiver dentro da área sensorial de visão do aprendiz, a presa poderá vê-lo efetivamente, ou não, de acordo com uma probabilidade dada.

Na simulação deste experimento, foram colocados no ambiente 6 predadores (2 de cada tipo) e 5 instrutores para emitir alarmes para estes predadores. Para avaliar a vantagem adaptativa do comportamento simbólico em relação ao comportamento indexical, 2 aprendizes foram também colocados no ambiente. Um aprendiz é capaz de aprender associações e ter seu comportamento afetado por estas associações. O outro não é capaz de estabelecer associações e responde aos alarmes sempre com uma varredura do ambiente em busca de eventos co-ocorrentes. A probabilidade de visualizar o predador foi ajustada para ambos em 25%. Os resultados apresentados no gráfico da Figura 5 indicam o número de ataques sofridos por cada aprendiz ao longo das iterações. O aprendiz capaz de responder simbolicamente aos alarmes possui, durante toda a simulação, um número menor de ataques e a diferença entre o número de ataques de cada um é crescente: na iteração 2000 é de 3 ataques, na iteração 8000 é de 7, e na iteração 16000, de 11. Isto parece evidenciar que uma habilidade para manipulação de símbolos provê *vantagem seletiva* para seus usuários.

5. Discussão

O experimento apresentado tem clara conexão com outros experimentos desenvolvidos em Vida Artificial interessados na aquisição de vocabulário referencial em agentes artificiais (para uma revisão, Wagner et al. 2003). Nosso experimento, no entan-

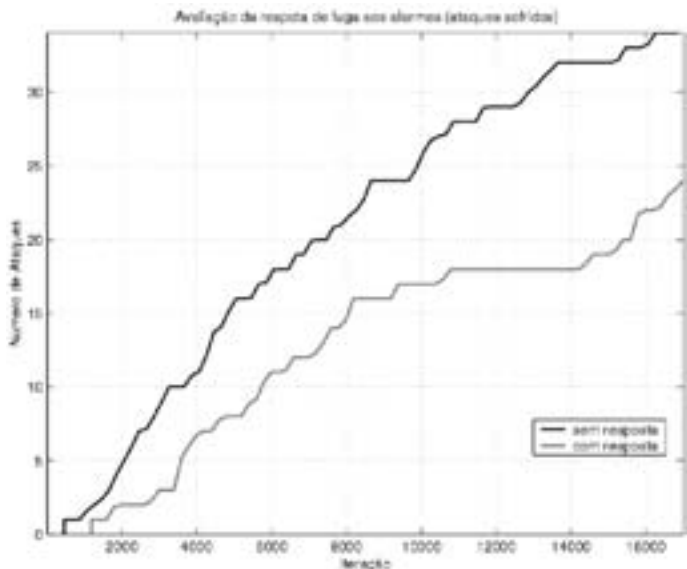


Figura 5: Ataques sofridos pelas presas-aprendizes com e sem resposta simbólica aos alarmes, considerando uma simulação com 2 aprendizes, 5 instrutores e 6 predadores.

to, apresenta diferenças importantes que devem ser destacadas. Primeiro, elaboramos este experimento fundamentando-o em requisitos empíricos – o caso etológico do macacos-vervets – e requisitos teóricos-formais – teoria do signo de Peirce. Concebemos agentes que estão situados em um ambiente, realizam interações comunicativas autônomas, com múltiplos falantes e intérpretes, e aprendem sem realimentação explícita do falante e, portanto, precisam explorar as relações estatísticas entre informações auditivas e visuais. Estas características distinguem este experimento e permitem que interessantes relações possam ser estabelecidas entre a simulação e o caso biológico.

Nas simulações, observamos a transição de uma fase indexical, na qual a resposta às vocalizações obedece a uma busca por elementos em contigüidade espaço-temporal, para uma fase simbólica durante a qual a resposta de fuga pode prescindir de qualquer constatação sobre a presença de predadores. Esta transição correspon-

de ao momento no qual as associações alcançam valores próximo do máximo e começam a afetar diretamente o comportamento das presas. Além disso, verificamos que a habilidade básica de aprendizagem associativa é suficiente para a aquisição e interpretação simbólica de signos, através da gênese de relações habituais entre os elementos envolvidos por parte do intérprete.

A competência para relacionar estímulos condicionados com estímulos não-condicionados, definida pela aprendizagem associativa, é amplamente encontrada em animais não-humanos. Isto permite afirmar que a competência para manipular símbolos pode ser encontrada em um espectro amplo de seres vivos (Ribeiro et al. prelo).

Quanto à vantagem adaptativa da manipulação de símbolos em relação a índices, as simulações mostram que existe, principalmente quando considerados impedimentos à visão de predadores, como ocorre em ambientes naturais. Este resultado corrobora a tese de que ‘o domínio auditivo provê uma vantagem seletiva em relação a comunicação através de canais visualmente obstruídos’ (Hauser 1997: 341).

6. Conclusão

As abordagens sintéticas são férteis ambientes interdisciplinares para avaliação e teste de hipóteses sobre pré-requisitos para emergência de diversos fenômenos cognitivos. Coerções teóricas, combinadas a análises de fenômenos empíricos, têm fornecido subsídios e uma bateria de ‘objetos para simular’ (*formal-theoretical / empirical constraints*). Apresentamos as principais idéias usadas para simulação de comunicação simbólica entre criaturas virtuais. Para construir um cenário digital, e inferir as condições necessárias e suficientes para projetar as criaturas, redescrevemos um caso de comunicação animal, baseados na teoria do signo de Peirce. Sua aplicação é, com poucas exceções, uma ‘novidade teórica’, em termos de abordagens sintéticas (e.g. Cangelosi 2001; Vogt 2003, 2006), já que a maioria dos trabalhos se divide entre abordagens *naive* e de extração lingüística. Diferentemente, as descrições de Peirce ba-

seiam-se em uma teoria lógica-fenomenológica de categorias, com as vantagens de generalidade decorrentes de um modelo que não está primariamente interessado em fenômenos lingüísticos.

Em nossa proposta, e em contraste com o *mainstream*, símbolos resultam de mecanismos simples de aprendizagem associativa. A análise dos processos observados entre macacos-vervet sugere que a aquisição de símbolos começa com o aprendizado de relações indexicais, que reproduzem regularidades espaço temporais externas, detectadas durante a aprendizagem. As simulações indicam que a atuação ótima do aprendizado irá eventualmente resultar em relações de lei, que podem ser generalizadas em outros contextos, em particular no caso onde um signo denota uma classe de objetos, satisfazendo as condições estabelecidas para descrição de semiose simbólica.

Resumo: Baseados na semiótica de C.S.Peirce e inspirados em requisitos etológicos, apresentamos uma metodologia sintética para simular a emergência de comunicação simbólica entre criaturas artificiais em um mundo virtual de eventos de predação.

PALAVRAS-CHAVE: símbolo; comunicação; etologia sintética; C.S.Peirce.

Abstract: *Based on Peircean semiotics and inspired by ethological constraints, we are going to present a synthetic methodology to simulate the emergence of symbolic communication among artificial creatures in a virtual world of predatory events.*

KEYWORDS: *symbol, communication, synthetic ethology, C.S.Peirce*

Referências bibliográficas

- BATALI, J. Computational simulations of the emergence of grammar. In Hurford, J. R., Studdert-Kennedy, M., & Knight, C.(Eds.), *Approaches to the Evolution of Language - Social and Cognitive Bases* Cambridge: Cambridge University Press, pp. 405-426, 1998.
- BICKHARD, M. H. The dynamic emergence of representation. In Clapin, H., Staines, P., Slezak, P. (eds.) *Representation in Mind: New Approaches to Mental Representation*. Elsevier, pp. 71-90, 2004.

- BROOKS, R. A. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-2, 14-23, 1986.
- BROOKS, R.A. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence* 47 (1-3), 139-159, 1991.
- BRUNNING, J. 1997. Genuine triads and teridentity. In: Houser, N.; Roberts, D.; Evra, J. (eds.) *Studies in the Logic of Charles Sanders Peirce*. Indiana: Indiana University Press, 1991. p. 252-270.
- BURCH, R. *A Peircean Reduction Thesis*. Texas Tech University Press.
- CANGELOSI, A & Turner, H. L'emergere del linguaggio. In Borghi, A. M., & Iachini, T. *Scienze della Mente* Bologna: Il Mulino, pp.227-244, 2002.
- CANGELOSI, A. Evolution of communication and language using signals, symbols, and words. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 5 (2) 93-101, 2001.
- CARIANI, P. Towards an evolutionary semiotics: The emergence of new sign-functions in organisms and devices. In Van de Vijver/Salthe/Delpo, *Evolutionary Systems*, 359-376, 1998.
- CHENEY, D.L.; Seyfarth, R. *How Monkeys See the World*. Chicago: University of Chicago Press, 1990.
- CHRISTIANSEN, M. H.; Kirby, S. Language Evolution: Consensus and Controversies. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(7): 300-307, 2003.
- CLARK, A. *Being There. Putting Brain, Body, and World Together Again*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1997.
- DE TIENNE, A. Learning *qua* semiosis. *S.E.E.D. Journal -- Semiotics, Evolution, Energy, and Development* (3): 37-53, 2003.
- DEACON, T. *Symbolic Species: The Co-evolution of Language and the Brain*. New York: Norton, 1997.
- DEAN, J. Animats and what they can tell us. *Trends in Cognitive Science*. 2(2): 60-67, 1998.
- EL-HANI, C. N.; Qqueiroz, J. & Emmeche, C. A semiotic analysis of the genetic information system. *Semiotica* 160(1/4): 1-68, 2006.
- EMMECHE, C. & Hoffmeyer, J. From language to nature - the semiotic metaphor in biology, *Semiotica* 84 (1/2): 1-42, 1991.

- EMMECHE, C. A semiotical reflection on biology, living signs and artificial life, *Biology & Philosophy* 6 (3): 325-340, 1991.
- FISCH, M. (1986). *Peirce, semeiotic, and pragmatism*. Indiana: Indiana University Press.
- FREEMAN, W. J. Neurobiological Foundation for the Meaning of Information. In: Proceedings of the 11th International Conference on Neural Information Processing, ICONIP 2004, Calcutta, India. Lecture Notes in Computer Science 3316, 2004, pp. 1-9.
- HABERMAS, J. Peirce and communication. In KETNER, K. *Peirce And Contemporary Thought: Philosophical Inquiries*. Fordham University Press. pp. 243-266, 1995.
- HAUSER, M. *The Evolution of Communication*, Cambridge, Mass.: MIT Press. 1997
- HAUSER, M.; Chomsky, N.; Fitch, W.T. The faculty of language: what is it, who has it, and how did it evolve? *Science* 298 (22): 1568-1579, 2002.
- HOFFMEYER, J. *Signs of Meaning in the Universe*. Bloomington, IN: Indiana University Press, 1996.
- HOUSER, N. Introduction: Peirce as a logician. In Houser, N., Roberts, D., & Evra, J. (Eds.) *Studies in the logic of Charles Sanders Peirce* Indiana: Indiana University Press, pp. 1-22, 1997.
- HUTCHINS, E.; Hazlehurst, B. How to invent a lexicon: the development of shared symbols in interaction. In Gilbert, G. N.; Conte, R. (eds.) *Artificial Societies: The computer simulation of social life*. Londres: UCL Press, 1995.
- JABLONKA E. Information: its interpretation, its inheritance and its sharing. *Philosophy of Science*, 69: 578-605, 2002.
- JABLONKA E.; Lamb, M.J. *Evolution in Four Dimensions: Genetic, Epigenetic, Behavioral, and Symbolic Variation in the History of Life*. Cambridge, Mass: Bradford Books, The MIT Press, 2005.
- KIRBY, S. Language evolution: consensus and controversies. *Trends in Cognitive Science* 7 (7): 300-307, 2003.
- LANGTON, C. G. (ed.) *Artificial Life - An Overview*. Cambridge, Mass.: The MIT Press, 1995.

- LOULA, A.; Gudwin, R.; Queiroz, J. Symbolic Communication in Artificial Creatures: an experiment in Artificial Life. *Lecture Notes in Computer Science* 3171 (17th Brazilian Symposium on Artificial Intelligence - SBIA), 336-345, 2004.
- MACLENNAN, B. Synthetic ethology: a new tool for investigating animal cognition. In: Bekoff, M.; Allen, C.; Burghardt, G. M. (eds.). *The Cognitive Animal: Empirical and Theoretical Perspectives on Animal Cognition*. Cambridge, Mass.: MIT Press, pp.151-156, 2002.
- _____. The emergence of communication through synthetic evolution. In Patel, M., Honavar, V. & Balakrishnan, K. (eds.), *Advances in the Evolutionary Synthesis of Intelligent Agents* Cambridge, Mass.: MIT Press, pp. 65-90, 2001.
- MAYNARD SMITH, J.; Szathmary, E. *The Origins of Life: From the Birth of Life to the Origin of Language*. Oxford: Oxford University Press, 1999.
- NOLFI, S.; Floreano, D. Synthesis of autonomous robots through evolution. *Trends in Cognitive Science* 6 (1): 31-37, 2002.
- NÖTH, W. Semiogenesis in the evolution from nature to culture. In: *In the Beginning: Origins of Semiosis*, M. Alac & P. Violi (eds.), 69-82. Turnhout: Brepols, 2004.
- PEIRCE, C.S. *The Collected Papers of Charles Sanders Peirce*. Vols. I-VI. In: Hartshorne, C.; Weiss, P. (eds.). Cambridge, Mass.: Harvard University Press. 1931-1935.
- PIETARINEN, A. *Signs of Logic : Peircean Themes on the Philosophy of Language, Games, and Communication* (Synthese Library, Vol. 329). Netherlands: Springer, 2005.
- QUEIROZ, J. & El-Hani, C. N. Semiosis as an emergent process. *Transactions of the Charles Sanders Peirce Society* 42 (1): 78-116, 2006A.
- QUEIROZ, J. & El-Hani, C. N. Towards a multi-level approach to the emergence of meaning processes in living systems. *Acta Biotheoretica* 54 (3): 174-206, 2006B.
- QUEIROZ, J. & Merrell, F. Semiosis and pragmatism: toward a dynamic concept of meaning. *Sign Systems Studies*, prelo.
- QUEIROZ, J. Comunicação simbólica em primatas não-humanos: uma análise baseada na semiótica de C.S.Peirce. *Rev Bras Psiquiatr* 25 (Supl II): 2-5, 2003.

- _____. *Semiose segundo C.S.Peirce*, 2004.
- QUEIROZ, J.; Ribeiro, S. The biological substrate of icons, indexes and symbols in animal communication: a neurosemiotic analysis of Vervet monkey alarm-calls. In: shapiro, M. (ed.) *The Peirce Seminar Papers* 5. Berghahn Books, 2002. p.69-78.
- RIBEIRO, S.; Loula, A. ; Araujo, I.; Gudwin, R. ; Queiroz, J. . Symbols are not uniquely human. *Biosystems*, prelo.
- ROY, D. Grounding words in perception and action: insights from computational models. *Trends in Cognitive Science*, 9 (8): 389-96, 2005a.
- _____. Semiotic schemas: a framework for grounding language in the action and perception. *Artificial Intelligence*, 167 (1-2): 170-205, 2005b.
- SEYFARTH, R. M. & D. L. Cheney . Signalers and receivers in animal communication. *Annual Review of Psychology* 54:145–173, 2003.
- SEYFARTH, R.; Cheney, D.L. Meaning and mind in monkeys. *Scientific American* (December), 1992.
- SEYFARTH, R.; Cheney, D.L.; Marler, P. Monkey responses to three different alarm calls: evidence of predator classification and semantic communication. *Science* (210): 801-803, 1980.
- SZATHMARY, E.; Maynard Smith, J. The major evolutionary transitions. *Nature* 374: 227-232, 1995.
- VOGT, P. Anchoring of semiotic symbols. *Robotics and Autonomous Systems* 43 (2), 109-120, 2003.
- _____. Language evolution and robotics: issues on symbol grounding and language acquisition. In: loula, A., gudwin, R. & queiroz, J. (eds.) *Artificial Cognition Systems*. Hershey: Idea Group, 2006, pp. 176-209.
- WAGNER, K.; Reggia, J. A.; Uriagereka, J.; Wilkinson, G. S. Progress in the simulation of emergent communication and language. *Adaptive Behavior* 11 (1): 37-69, 2003.
- WANG, W. S-Y.; Minett, J. W. Vertical and horizontal transmission in language evolution. *Transactions of the Philological Society*, 103(2):121-146, 2005
- ZIEMKE, T.; Sharkey, N.E. A stroll through the worlds of robots and animals: applying Jakob von Uexküll’s theory of meaning to adaptive robots and artificial life. *Semiotica* 134 (1-4): 701-746, 2001.