

EMERGÊNCIA ENQUANTO HEURÍSTICA PARA CRIATIVIDADE EM AGENTES DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADOS À COMPOSIÇÃO ALGORÍTMICA

Francisco de Paula Barreto

Laboratório de Pesquisa em Arte Computacional - Midialab
Instituto de Artes - IdA
Universidade de Brasília
kikobarreto@gmail.com

Resumo: Este artigo descreve uma pesquisa teórico-prática que aborda, de forma transdisciplinar, as aplicações de técnicas de Inteligência Artificial na composição algorítmica considerando a obtenção de resultados emergentes como uma possível heurística para criatividade. O comportamento emergente pode ser definido, segundo Peter Cariani (2009) como o surgimento de novas entidades que, em um sentido ou em outro, não poderiam ter sido previstas com base naquilo que as precedeu. Essa característica emergente do sistema pode ser vista como uma heurística para a obtenção da criatividade. Buscamos aqui, portanto, ilustrar a aplicação deste conceito utilizando algoritmos genéticos para a geração de acordes.

Palavras-chave: Emergência, Algoritmos Genéticos, Criatividade, Inteligência Artificial, Composição Algorítmica.

Emergency as heuristics to Creativity in Artificial Intelligence agents applied to Algorithmic Composition.

Abstract: This paper describes a theoretical-practical research that approaches, in a transdisciplinary way, the application of Artificial Intelligence techniques in Algorithmic Composition considering the achievement of emergent results as a possible heuristic for computer creativity. The emergent behavior can be defined, according to Peter Cariani (2009), as the emergence of new entities that in one sense or another could not have been predicted based on what preceded them. This emergent feature of a system can be seen as a heuristic to achieve the creativity. We aim, therefore, to illustrate the application of this concepts using genetic algorithms for chord generation.

Keywords: Emergence; Genetic Algorithm; Creativity; Artificial Intelligence; Algorithmic Composition.

INTRODUÇÃO

Os pesquisadores do campo da Inteligência Artificial (IA) buscam, através da melhoria de modelos e técnicas, alcançar as melhores soluções para problemas específicos como aprendizagem de máquina, visão computacional e criatividade computacional. A discussão que buscamos trazer neste artigo diz respeito às possíveis aplicações de IA que tangenciem os conceitos de emergência e autopoiesis. O primeiro conceito é definido segundo Peter Cariani (2009) como o surgimento de novas entidades que, em um sentido ou em outro, não poderiam ter sido previstas com base naquilo que as precedeu. Para Maturana e Varela (1997), o conceito de autopoiesis, ou autopoiese, (do grego *auto* "próprio" e *poiesis* "criação") descreve os sistemas autônomos, capazes de autoproduzir e autorregular, mantendo interações com o

meio. Por sua vez, o meio pode desencadear, apenas de forma indireta, mudanças nos processos ou estrutura internas do sistema autopoietico que podem levar à uma transição determinista-emergente (MATURANA e VARELA, 1997).

Para Stephen Wilson, em seu livro *Information Arts* (2002), o desenvolvimento de algoritmos e heurísticas capazes de permitir que os computadores realizem análises sofisticadas ou demonstrem um comportamento complexo, como produzir arte, constam entre os grandes desafios da pesquisa científica contemporânea. Este desafio deriva não apenas do desenvolvimento de novas tecnologias capazes de suportar a demanda computacional de tais algoritmos, mas também, da necessidade de se entender o fenômeno da inteligência através de novas perspectivas e abordagens capazes de levantar novos questionamentos filosóficos acerca do assunto. Silvia Laurentiz aponta que um destes questionamentos levantados pelo estudo dos sistemas e agentes inteligentes no computador é exatamente sobre os próprios termos utilizados na área, como a palavra inteligência, por exemplo (LAURENTIZ, 2007).

Não é surpresa que os artistas passassem, portanto, a explorar o vasto campo da IA como forma de produzir trabalhos interativos mais sofisticados que vão além das simples janelas e menus que tanto caracterizam a multimídia. Alguns artistas acreditam que os campos da vida artificial e da inteligência artificial oferecem várias abordagens para o desenvolvimento destes trabalhos: sistemas especialistas (ES), processamento de linguagem natural, algoritmos genéticos (AG), redes neurais artificiais (RNA), entre outras (WILSON, 2002).

EMERGÊNCIA

De uma forma geral, emergência designa o comportamento que não foi explicitamente programado em um sistema ou agente. Segundo Pfeifer e Bongard (2007), pode-se distinguir entre três tipos de emergência: (i) fenômeno global surgindo de um comportamento coletivo, (ii) comportamento individual como resultado de uma interação do agente com o ambiente e (iii) emergência comportamental de uma escala de tempo para outra. A formação de uma trilha de formigas é um exemplo do primeiro tipo. As formigas, por si sós, não tem consciência sobre o fato de que estão formando uma trilha que irá determinar o menor caminho até a fonte de alimento (PFEIFER e BONGARD, 2007). Para Laurentiz (2007), ao se trabalhar com uma população de indivíduos, não podemos focar apenas em um dos indivíduos, mas devemos nos interessar também nas propriedades emergentes dos processos dinâmicos destas populações.

Guilherme Kujawski (2009) cita um formigueiro como representação de uma sociedade centralizada sobre a égide da rainha, detentora do poder absoluto, capaz de guiar operárias e soldados através de estímulos químicos. Para ele, este mito é desfeito sob a luz da ciência que determina que o todo não é simplesmente a soma das partes constituintes e sim algo mais complexo. Kujawski questiona como seria possível uma inteligência centralizada, neste caso, determinar que o cemitério ficasse o mais longe possível da colônia mas não tão longe quanto o depósito de lixo. Este comportamento se torna possível por meio de uma inteligência distribuída, ou o que ele se refere como sinédoque biológica. Neste caso, a simples interação das partes individuais faz emergir o todo complexo do sistema.

Um bom exemplo do segundo tipo de emergência é a instalação *La Funambule Virtuelle*, de Marie-Hélène Tramus e Michel Bret (2000-2007) onde uma equilibrista virtual evolui para manter-se sobre uma corda bamba, reagindo aos movimentos do interagente. A personagem tenta reproduzir a postura do participante ao passo que tenta manter-se sobre a corda. Nesta instalação, através de uma rede neural artificial (RNA), a equilibrista é capaz de aprender a manter-se sobre a corda durante a interação. A partir deste gestual aprendido, um novo comportamento emerge através de movimentos que não foram ensinados, dotando a personagem do que a artista chama de capacidade de improvisação (TRAMUS e CHEN, 2005).

O terceiro tipo de emergência diz respeito às escalas de tempo que devem ser incorporadas sob três perspectivas: (i) estado orientado, o “aqui e agora” que diz respeito ao estado atual do mecanismo, (ii) aprendizado e desenvolvimento, sob o ponto de vista ontogenético e (iii) evolutivo, perspectiva filogenética. Portanto, as três escalas de tempo – “aqui e agora”, ontogenética e filogenética – devem ser consideradas a fim de determinar se o sistema como um todo é capaz de gerar resultado ou comportamento emergentes em qualquer uma destas escalas. Se pode-se demonstrar que um mecanismo pode ser observado em uma escala de tempo torna-se mais fácil a compreensão do mecanismo observado. Compreende-se por mecanismo qualquer função ou parte do sistema que participe ativamente da evolução do agente ou tenha papel relevante na construção emergente do mesmo.

Inteligência Artificial, Autopoiesis e Emergência

Há algum esforço dentro do campo da IA, mais especificamente na área da IA cognitiva, para tornar os princípios de design de agentes mais explícitos. A discussão sobre estes princípios inicialmente propostos por Rolf Pfeifer na década de 1990 tem sido trabalhadas por diversos outros autores (eg. PFEIFER, 1996; PFEIFER, IIDA e BONGARD, 2005; PFEIFER e GOMEZ, 2005; PFEIFER e BONGARD, 2007), culminando em uma aprofundada análise em Froese e Ziemke (2009). Apresentaremos rapidamente, alguns destes princípios, tabela 1, que servirão não apenas como motivação e embasamento mas também como fundamentos norteadores na tentativa de delinear as intersecções entre os conceitos apresentados nesta pesquisa.

| # | Name | Description |
|-----|-------------------------------------|---|
| P-1 | Synthetic methodology | Understanding by building |
| P-2 | Emergence | Systems designed for emergence are more adaptive |
| P-3 | Diversity-compliance | Trade-off between exploiting the givens and generating diversity solved in interesting ways |
| P-4 | Time perspectives | Three perspectives required: ‘here and now’, ontogenetic, phylogenetic |
| P-5 | Frame of reference | Three aspects must be distinguished: perspective, behavior vs. mechanisms, complexity |
| A-1 | Three constituents | Ecological niche (environment), tasks, and agent must always be taken into account |
| A-2 | Complete agent | Embodied, autonomous, self-sufficient, situated agents are of interest |
| A-3 | Parallel, loosely coupled processes | Parallel, asynchronous, partly autonomous processes; largely coupled through interaction with the environment |
| A-4 | Sensorimotor coordination | Behavior sensory-motor coordinated with respect to target; self-generated sensory stimulation |
| A-5 | Cheap design | Exploitation of niche and interaction; parsimony |
| A-6 | Redundancy | Partial overlap of functionality based on different physical processes |
| A-7 | Ecological balance | Balance in complexity of sensory, motor, and neural systems: task distribution between morphology, materials, and control |

Tabela 1: Sumário dos princípios de design da IA corporificada (Pfeifer, Iida & Bongard, 2005).

O princípio da emergência (P-2) é fundamental nesta pesquisa pois demonstra a convergência das teorias abordadas no sentido da utilização da emergência como uma forma de heurística para o desenvolvimento de sistemas inteligentes que demonstrem um comportamento “natural”. Este princípio é compartilhado por muitas abordagens computacionais da IA no sentido mínimo de que o comportamento sempre deve emergir das interações de um agente e seu ambiente.

Este princípio deixa claro que se desejamos desenvolver sistemas adaptativos, devemos buscar a emergência. O termo emergência, por si só é um pouco controverso mas, aqui,

utilizamos no sentido mais pragmático: no sentido de não ter sido programado ou previsto. Ao desenvolver objetivando a emergência, a estrutura final do agente será o resultado do histórico das suas interações com o ambiente.

Para Pfeifer e Gomez (2005), a relação entre comportamento e emergência vai além das interações entre agente e ambiente. Assim, de uma forma estrita, o comportamento é sempre emergente posto que ele não pode ser reduzido à apenas um mecanismo interno: ele é sempre o resultado da interação sistema-ambiente. Neste sentido, Pfeifer, Iida e Bongard (2005) apontam que a emergência cessa de ser um fenômeno com características discretas (ou é emergente ou não é) e passa a ser tratado como uma questão de “nível de emergência”: quanto menos influência as escolhas do designer tiverem sobre o comportamento atual do agente, maior será o nível de emergência do mesmo.

Os sistemas desenvolvidos para demonstrar um comportamento emergente normalmente são mais robustos e adaptativos. Por exemplo, um sistema que especifique condições iniciais e mecanismos de desenvolvimento irão automaticamente explorar o ambiente para modelar a estrutura final do agente, como nos algoritmos genéticos (PFEIFER, IIDA e BONGARD, 2005).

Um outro princípio do design de agentes, “*three constituents*” destaca a importância de que qualquer sistema autônomo nunca deve ser pensado de forma isolada (PFEIFER, IIDA e BONGARD, 2005). Froese e Ziemke (2009) apontam que devemos considerar três componentes do sistema que estão correlacionados: (i) o campo de atuação ou ambiente, (ii) o objetivo e comportamento desejado e (iii) o agente propriamente dito.

Como um complemento para (A-1), o princípio (A-2) (*complete agent*) também se faz importante nesta pesquisa pois denota uma clara intersecção com o conceito de autopoiese. A noção de autopoiese, enquanto organização do vivo, originou-se nos trabalhos dos biólogos chilenos Humberto Maturana e Francisco Varela na década de 1970 (MATURANA e VARELA, 1997).

Hoje em dia o conceito de autopoiese continua tendo um impacto significativo no campo da vida artificial computacional. Pier Luisi (2003) apresenta uma boa revisão do conceito. Além disso, houve também um esforço para integrar a noção de autopoiese ao campo das ciências cognitivas.

Para ser mais preciso, um sistema autopoético, definido enquanto unidade, é organizado como uma rede de processos de produção (síntese e destruição) de componentes de tal forma que estes componentes: (i) continuamente regeneram-se formando uma rede que os produz e (ii) constituem o sistema como uma unidade distingível no domínio no qual ele existe. Além dos dois critérios explícitos para a autopoiese, podemos acrescentar um outro ponto importante, a saber, que a auto-constituição de uma identidade implica a constituição de um domínio relacional entre o sistema e o seu ambiente (FROESE e ZIEMKE, 2009).

Emergência Combinatória e Emergência Criativa

Através da identificação das primitivas que compõem um sistema podemos criar um novo sistema complexo ou modificar um pré-existente através da recombinação destas. A recombinação ou alteração das partes ou das relações entre elas é capaz, por si só, de constituir novos sistemas com potencial para gerar resultados emergentes. Estas primitivas dependem do sistemas, podendo ser “átomos” materiais ou estruturais, símbolos, estados, funcionalidades, operações, hipóteses de uma teoria, sensações ou ideias. Para que uma entidade seja considerada como uma primitiva ela não deve poder ser construída a partir das combinações dos outros, ou seja, suas propriedades não podem ser logicamente deduzidas das propriedades das outras entidades. Neste sentido, as combinações de objetos de um

nível inferior não geram, necessariamente, primitivas de um nível superior posto que estes sistemas de nível mais abstrato podem ser decompostos em átomos de um nível ainda mais baixo.

Assim, torna-se possível prever os processos criativos que simplesmente recombinam as primitivas fixas existentes versus aquelas que, de alguma forma, geram novas primitivas. Para Cariani (2009), a geração de novidade emergente pode ocorrer de dois modos: (i) emergência combinatória e (ii) emergência criativa.

Os algoritmos genéticos são claros exemplos de novidade combinatória (i). Nesta abordagem uma codificação específica em linguagem genética as primitivas de um sistema que deverão ser combinadas para formar produções complexas enquanto um processo seletivo heurístico orienta a geração destas novas combinações de primitivas (CARIANI, 2009). Os algoritmos genéticos são uma técnica de Inteligência Artificial que utiliza a metáfora baseada na teoria da evolução natural proposta por John Holland (1975). Com os algoritmos genéticos e a vida artificial as soluções para o problema são evoluídas através de múltiplas gerações, melhorando as soluções anteriores a cada nova interação. Tal qual na evolução natural, os operadores genéticos como a recombinação e a mutação permitem que a cada nova geração de indivíduos sejam geradas soluções potenciais cada vez melhores para o problema. Esta evolução no sentido da busca pela “melhor” solução se dá através de uma função de avaliação (*fitness*) que calcula o grau de adaptação do indivíduo e seus vizinhos, inferindo quais os mais aptos à reprodução e, por conseguinte, quais variações estão mais aptas à extinção.

Por exemplo, em uma possível abordagem para formação de acordes, devemos considerar que há inúmeros padrões e regras que definem diversas categorias de acordes como os maiores, menores, diminutos ou aumentados e que estes padrões são normalmente representados através de intervalos entre as notas, expressos em semitons, podendo-se, a partir de uma nota, construir vários diferentes acordes utilizando outras notas em intervalos específicos. A formação de um acorde tétrade perfeito maior, considerado como objetivo neste estudo, por exemplo, se dá através da tétrade: Tônica + 3^a Maior + 5^a Maior + 8^a Justa. Dada esta estruturação do problema, podemos pensar na modelagem de um cromossomo contendo 4 alelos, conforme tabela 2, onde cada um deles representa uma das quatro notas.

| Posição | 0 | 1 | 2 | 3 |
|----------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Conteúdo | Tônica (0-12) | 3 ^a Maior (0-12) | 5 ^a Maior (0-12) | 8 ^a Justa (0-12) |

Tabela 2: Codificação da informação necessária para a formação de acordes em 4 alelos.

A função de *fitness*, neste caso, avalia os cromossomos considerando distância entre as notas contidas nos alelos em relação às notas necessárias para formação de um acorde maior, classificando os indivíduos com valores interpolados entre 0 e 100 (*fitness* máximo). Para o cálculo do *fitness*, foi acrescido um peso à cada nota que compõe a tétrade, conforme a tabela 3, que denota a importância da formação das notas na formação do acorde a partir da uma tônica.

| Distância | 3 ^a Maior | 5 ^a Maior | 8 ^a Justa |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Peso | 4 | 3 | 2 |

Tabela 3: Peso das distâncias para cada nota.

Uma vez gerada randomicamente uma população inicial contendo 10 indivíduos foram executadas 100 rodadas utilizando dois operadores genéticos com taxas de probabilidade diferentes sobre esta população: *crossover* de um ponto e mutação, conforme resumo

apresentado na figura 3. Para o operador de crossover foi aplicada uma taxa percentual 80% enquanto ao operador de mutação foi utilizada uma taxa de 2%. Esta taxa simboliza o percentual de indivíduos afetados pelos operadores a cada rodada.

- Módulo de avaliação

Função de *Fitness*: Diferença entre intervalo existente e intervalo ideal;

- Módulo de população

Técnica de representação: Representação com 4 inteiros;

Técnica de iniciação: Randômica;

Técnica de eliminação: Menor *fitness*;

Técnica de reprodução: Substituição de geração com elitismo;

Técnica de seleção de pais: Sorteio;

Técnica de *fitness*: Normalização linear:

interpola *fitness* de 100 a 1, de 1 em 1;

Parâmetros

População: 10 indivíduos;

Gerações: 100;

Módulo de reprodução

Técnica de seleção do operador: Sorteio;

Operadores: crossover de um ponto, mutação;

Taxa (probabilidade) do operador:

mutação: 0,008 a 0,2;

crossover: 0,60 a 0,80;

Figura 1: Resumo dos parâmetros utilizados na implementação do Gerador de Acordes.

Neste contexto, foram realizados vários testes e ficou claro que o uso de operador de crossover não representa necessariamente uma evolução posto que as notas que formam um acorde maior para determinada tônica, não formam acordes maiores para nenhuma outra nota. O que significa dizer que ao se aplicar o crossover sobre dois indivíduos com tónicas diferentes, cujas notas já encontram-se harmônicas, podemos gerar dois indivíduos completamente mal adaptados de acordo com a função de *fitness*.

O operador de mutação quando aplicado a taxas mais altas provocou indivíduos com *fitness* máximo em menos rodadas, ou seja, gerou acordes maiores com um número menor de interações. Isto se explica pois se uma nota não compõe um acorde considerando a tônica e as demais, ou seja, se apenas uma das notas está fora do intervalo, é muito mais provável que ela possa ser evoluída individualmente através de uma mutação do que em conjunto com a nota subsequente (ou anterior) através de recombinação.

A cada rodada executada o indivíduo com maior *fitness* tinha o conteúdo do seu cromossomo enviado para síntese sonora. Esta evolução mapeada dos cromossomos permitiu perceber que, enquanto não se atingia um acorde maior, vários outros tipos de acorde emergiram do sistema. No entanto, a aplicação do operador de recombinação e mutação

permitiu o surgimento de acordes não previstos como os menores, diminutos e aumentados, por exemplo, sugerem um comportamento emergente do sistema. Os dados oriundos deste sistema ainda serão estudados para identificar que tipos de acordes emergem além de definir com que frequência isto acontece e o que favorece tal comportamento.

Neste exemplo a emergência combinatória foi capaz de gerar acordes que não haviam sido previstos como os dissonantes, por exemplo, porém o conjunto de possibilidades possíveis dentro deste domínio é finito. Essa estratégia para a geração de novas variedades a partir de combinações de conjuntos de primitivas relativamente pequenos é poderosa, formando a base da sistemática da linguagem humana e computacional.

Já no que diz respeito à emergência criativa, Cariani (2009) define basicamente dois modos de alcançá-la: o primeiro modo de emergência criativa diz respeito à possibilidade da obra provocar novas ideias, significados e perspectivas em seu público. Já o segundo modo, mais interessante para esta pesquisa, diz respeito à arte que cria objetos autônomos e que por si sós, independentemente, desenvolvem novas primitivas. Para Cariani (2009), essa emergência criativa pode ou não estar explicitamente tensionada ou declarada pelo artista.

A instalação *Bacterial Orchestra* (2006), de Martin Lübke e Olle Cornéer é um bom exemplo desta emergência criativa não declarada pelos artistas, expressa através de objetos/artefatos autônomos. Esta consiste em uma orquestra formada por várias células capazes de ouvir e reproduzir os sons do ambiente. O material sonoro é oriundo do som ambiente onde as células estão inseridas, como pessoas conversando, som dos passos ou os sons que outras células reproduzem (CORNÉER e LÜCKE, 2006). Assim, em conjunto, comportam-se como um organismo mais complexo trabalhando sobre um domínio mal definido e, portanto, aberto.

CONCLUSÃO

Devemos ver a emergência como algo mais amplo do que o simples surgimento de novas estruturas e novos padrões. Inclui também a formação fundamentalmente nova de organizações de matéria, processos informativos e o aparecimento de um novo aspecto de mundo (CARIANI, 2009). Um nível mais profundo de emergência denominado emergência epistêmica envolve, naturalmente, o surgimento de novas visões de mundo e novas perspectivas intrinsecamente ligadas às alterações sensoriais. O aprimoramento ou desenvolvimento de novos órgãos sensoriais permite que um organismo evolua para uma outra linhagem, surgindo concomitantemente uma nova visão de mundo. Este desenvolvimento também ocorre na evolução tecnológica na medida em que construímos artefatos como termômetros, relógios, e telescópios que ampliam os nossos sentidos ou proveem um aumento das funções biológicas.

De acordo com o que se permite à um sistema escolher os seus próprios sensores, este tem um poder decisório de como será o seu olhar para o mundo, atingindo um grau limitado de autonomia epistêmica, liberando-se das limitações impostas pelos sensores com os quais contava inicialmente. Um outro fechamento organizacional é atingido quando um organismo se torna capaz de construir seus próprios sensores. Enquanto o fechamento organizacional da autopoiese permitiu aos organismos que controlassem suas estruturas internas, esse outro fechamento organizacional permite que os organismos controlem seu curso epistêmico (CARIANI, 2009).

As concepções de emergência oferecem, portanto, para o campo da música e da tecnologia, de uma forma geral, uma heurística para a criatividade. Se a emergência pode ser definida como novidade pura, então compreender os processos que levam a acontecimentos, estruturas, funções e perspectivas emergentes pode ser pertinente para a construção de artefatos que percebam ou utilizem estes processos para criar novidades puras. Neste sentido

torna-se possível o desenvolvimento e aplicação de algoritmos baseados em processos emergentes naturais para expandir a criatividade humana ou construção de sistemas artificiais autônomos ou semiautônomos capazes de ser criativos por si sós.

REFERÊNCIAS

- CARIANI, P. Emergência e Criatividade. In: ITAULAB **Emoção Art.ficial 4.0**. São Paulo: Itaú Cultural, 2009. p. 21-41.
- CORNÉER, O.; LÜCKE, M. Bacterial Orchestra. **Cornéer & Lubcke Website**, 2006. Disponível em: <<http://www.corneerlubcke.com/works/bacterial-orchestra/>>. Acesso em: 12 Novembro 2011.
- FROESE, T.; ZIEMKE, T. Enactive artificial intelligence: Investigating the systemic organization of life and mind. **Artificial Intelligence**, v. 173, n. 3-4, p. 466-500, March 2009.
- FROESE, T.; VIRGO, N.; IZQUIERDO, E. **Autonomy**: a review and a reappraisal. Advances in Artificial Life: Proc. of the 9th Euro. Conf. on Artificial Life. Berlin: Springer-Verlag, 2007. p. 455-464.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation In Natural and Artificial Systems**. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975.
- KUJAWSKI, G. Emergência - a expressão do inesperado. In: ITAULAB **Emoção Art.ficial 4.0**. São Paulo: Itaú Cultural, 2009. p. 15-19.
- LUISI, P. L. Autopoiesis: a review and a reappraisal. **Naturwissenschaften**, v. 90, n. 2, p. 49-59, 10 January 2003.
- LAURENTIZ, S. **A Poética dos Recursos Computacionais que Simulam a Vida**. Anais do 6º Encontro Internacional de Arte e Tecnologia. Brasília: UnB, 2007.
- MATURANA, H.; VARELA, F. **De Máquinas e Seres Vivos**: a organização do vivo. 3rd Edition. ed. Porto Alegre: Artes Médicas, 1997.
- PFEIFER, R. **Building ‘Fungus Eaters’**: Design Principles of Autonomous Agents. 4: Proc. of the 4th Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior. Cambridge: The MIT Press, 1996. p. 3-12.
- PFEIFER, R.; BONGARD, J. **How the Body Shapes the Way We Think**: A New View of Intelligence. Cambridge: The MIT Press, 2007.
- PFEIFER, R.; GOMEZ, G. Interacting with the real world – design principles for intelligent systems. **Artificial Life and Robotics**, v. 9, n. 1, p. 1-6, 2005.
- PFEIFER, R.; IIDA, F.; BONGARD, J. New Robotics: Design Principles for Intelligent Systems. **Artificial Life**, v. 11, n. 1-2, p. 99-120, January 2005.
- TRAMUS, M.-H.; CHEN, C.-Y. **La funambule virtuelle et Quorum Sensing, deux installations interactives s'inspirant du connexionnisme et de l'évolutionnisme**. La création artistique face aux nouvelles technologies. Paris: [s.n.], 2005.
- WILSON, S. **Information Arts**. Cambridge: The MIT Press, 2002.