

Ontologias para a Modelagem Multiagente de Sistemas Complexos em Ciências Cognitivas

Ontologies for Multiagent Modeling of Complex Systems in Cognitive Sciences

Leonardo Lana de Carvalho ^a, Franck Varenne ^b, Elayne de Moura Braga ^c

^a Faculdade Interdisciplinar em Humanidades, UFVJM, Diamantina, MG, Brasil; ^b Université de Rouen e GEMASS (UMR 8598 / CNRS / Paris Sorbonne), França; ^c Faculdade Interdisciplinar em Humanidades, UFVJM, Diamantina, MG, Brasil.

Resumo

As ciências cognitivas, como domínio interdisciplinar envolvendo disciplinas científicas (como a ciência da computação, a linguística, a psicologia, as neurociências, a economia, etc.), filosóficas (filosofia da linguagem, filosofia da mente, filosofia analítica, etc.) e engenharias (notadamente a engenharia do conhecimento), possuem um vasto corpo teórico e prático, alguns mesmo conflitantes. Neste contexto interdisciplinar e voltado para a modelagem computacional, as ontologias cumprem um papel essencial na comunicação entre disciplinas e também no processo de inovação de teorias, modelos e experimentos em ciências cognitivas. Este processo é enfatizado aqui. Um engajamento ontológico é defendido como marco de um realismo científico, o que leva a modelagem computacional à busca de modelos mais realistas, mais próximos de uma perspectiva sistemas complexos da natureza e da cognição. Neste sentido a modelagem multiagente de sistemas complexos vem cumprindo um papel de destaque.

Abstract

Cognitive sciences as an interdisciplinary field, involving scientific disciplines (such as computer science, linguistics, psychology, neuroscience, economics, etc.), philosophical disciplines (philosophy of language, philosophy of mind, analytic philosophy, etc.) and engineering (notably knowledge engineering), have a vast theoretical and practical content, some even conflicting. In this interdisciplinary context and on computational modeling, ontologies play a crucial role in communication between disciplines and also in a process of innovation of theories, models and experiments in cognitive sciences. We propose a model for this process here. An ontological commitment is advocated as the framework of a scientific realism, which leads computational modeling to search for more realistic models, for a complex systems perspective of nature and cognition. In that way multiagent modeling of complex systems has been fulfilling an important role.

Palavras-chave: ontologia; modelagem; sistemas complexos; sistemas multiagentes; cognição

Keyword: ontology; modeling; complex systems; multiagent systems; cognition

L. L. Carvalho - UFVJM, Rodovia MGT 367- Km 583, 5000, Campus JK - Prédio da FIH, Alto da Jacuba, 39100-000 - Diamantina, MG - Brasil. E-mail para correspondência: leonardolana.carvalho@ufvjm.edu.br ; **F. Varenne** - Université de Rouen - UFR LSH - Département de Philosophie - Rue Lavoisier - 76821 Mont-Saint-Aignan - França. e-mail para correspondência: franck.varenne@univ-rouen.fr ; **E. M. Braga** - UFVJM, Rodovia MGT 367- Km 583, 5000, Campus JK - Prédio da FIH, Alto da Jacuba, 39100-000 - Diamantina, MG - Brasil. E-mail para correspondência: elayne.braga@ufvjm.edu.br.

1. Introdução

Por que um ensaio sobre ontologias e modelagem computacional em ciências cognitivas? A modelagem computacional pode ser vista como uma aplicação da matemática na investigação da mente que ocorre com o advento das máquinas de cálculo da primeira metade do século XX (Abdi & Valentin, 2006). A relação entre mente, matemática e natureza é antiga. Os filósofos gregos antigos estabeleciam uma relação íntima entre a compreensão do mundo externo e interno, estando conteúdos de áreas exatas, humanas e biológicas profundamente confidentes. Tales de Mileto (624 a 548 a.C.), bastante conhecido por causa de seu teorema e considerado como o fundador da geometria dedutiva, além de ter deduzido a esfericidade da terra, também foi um dos primeiros a considerar que a compreensão do comportamento humano passava por algo como a mente e não por forças sobrenaturais. Desde a antiguidade, desde as origens da matemática, podemos retrair sua aplicação como base para a elaboração de modelos para a compreensão de uma realidade.

Em um realismo científico, a elaboração de ontologias está atrelada à modelagem, à descrição de entidades que hipoteticamente existem na natureza e de suas possíveis relações, processos e propriedades. Em ciências cognitivas, a elaboração de ontologias se mostra ainda mais interessante dada a necessidade de se estabelecer uma comunicação clara o bastante entre corpos teóricos e domínios de estudos de diversas disciplinas. Que seja em computação, em anatomia, fisiologia, psicologia, educação, sociologia, antropologia, filosofia e tantas outras disciplinas que vêm se “cognitivando”, é necessário se fazer uma revisão dos termos, dos conceitos e dos modelos de compreensão de seus assuntos específicos para que se forme um corpo interdisciplinar coeso o bastante para ser reconhecido como o das ciências cognitivas.

Na filosofia metafísica a ontologia é o estudo do ser enquanto tal, o estudo das propriedades gerais do que existe. O sentido de ontologia usado neste ensaio é o mesmo do usado em ciência da computação. Uma ontologia se refere a um conjunto estruturado de termos que organizam um campo de informação, o que ocorre usando

elementos de um domínio de conhecimento. A ontologia é em si um modelo de dados que representa um conjunto de conceitos dentro de um domínio e as relações entre estes conceitos (Gruber, 1993; Smith, 2003; Müller, Phan e Varenne, 2009). Um exemplo de formalismo voltado para a elaboração de ontologias é o *Unified Modeling Language* (UML), dentre tantos outros. Ontologias geralmente descrevem: Indivíduos (os objetos básicos); Classes (conjuntos, coleções ou tipos de objetos); Atributos (propriedades, características ou parâmetros que os objetos podem ter e compartilhar); Relações (as ligações que os objetos podem ter) e; Eventos (mudanças sofridas por atributos ou relações) (Booch, Jacobson e Rumbaugh, 1998).

Na literatura científica, no que tange particularmente ao uso de ontologias computacionais para a modelagem de sistemas naturais, as ontologias têm um papel, por menor que seja, de hipótese ontológica do trabalho, sendo foco de atenção pelo menos temporariamente no modelo experimental, no modelo conceitual e no modelo computacional. Assim, a maioria dos trabalhos sobre fenômenos emergentes a partir da interação de elementos, formando sistemas complexos, possui uma interpretação realista, com forte engajamento ontológico sobre seus elementos, suas interações, sobre sua auto-organização e propriedades descritas. As ontologias são elaboradas com o objetivo primeiro não de predizer ou intervir, mas de batizar teorias realistas sobre fenômenos reais. Uma vez concebidas, elas servem ao rebuscamento teórico, à elaboração de protocolos experimentais, à concepção de modelos computacionais, máquinas inteligentes, à simulação de interações de entidades reais, dos mecanismos naturais, hipoteticamente presentes no corpo, no cérebro ou na sociedade (Demeulenaere, 2011). As ontologias possuem papel fundamental no diálogo entre as teorias sobre a cognição com os experimentos realizados na área e também com a modelagem computacional como terceira vertente de investigação da cognição. Os postulados sobre as ontologias permitem tratar da “mesma coisa” mesmo estudando fenômenos cognitivos sobre diferentes modos: o conceitual,

o experimental e o computacional. Com efeito, entendemos que algo similar ocorre no cérebro ao que ocorre em uma rede de neurônios artifi-

ciais quando esta reconhece, realmente, um padrão, um rosto humano, por exemplo, em uma máquina fotográfica.

2. Ciências Cognitivas: um domínio interdisciplinar

As ciências cognitivas têm sua origem em uma série de descobertas acerca do tipo de máquina que são os organismos vivos tal como o ser humano. Assim existe uma sucessão de modelos de máquinas que marcam as origens das ciências cognitivas assim como suas atuais abordagens. Descartes (1596-1650) teve um papel muito importante no início das ciências cognitivas por descrever os animais como autômatos. Os animais seriam sistemas funcionando de modo similar aos relógios da época. Segundo o filósofo e médico La Metrie (1709-1751) em sua obra *L'Homme Machine*, os seres humanos também seriam em sua integralidade autômatos, não sendo necessário coisa alguma extra espacial para explicar todo o processo pelo qual ocorre o comportamento humano. O comportamentalismo também foi importante para o surgimento das ciências cognitivas. Segundo Pavlov:

“O homem é um sistema, uma máquina, e ele está submetido, como qualquer outro sistema na natureza, às mesmas leis naturais, irrefutáveis e comuns. Mas é um sistema incomparável pela sua faculdade de autorregulação, o que podemos afirmar segundo o nível atual da ciência. Nós conhecemos grande número de máquinas de autorregulação complexa entre as criações do homem. A partir deste ponto de vista, o estudo do homem-sistema é exatamente o mesmo de qualquer outro sistema: decomposição em partes constituintes, estudo da importância de cada uma destas partes, estudo das correlações com a natureza-ambiente, e em seguida, baseada em tudo isso, a explicação do seu funcionamento e regulamento, na medida das possibilidades humanas.”(Pavlov, 1932/1984, p. 124)

Como relata Pavlov, o ser humano é uma máquina complexa, o que para ele significa ser uma máquina de autorregulação complexa, como

tantos aparatos mecânicos já criados pelos seres humanos. Em seu aspecto diferencial, em outro trecho ele esclarece melhor a natureza desta que é a máquina humana:

“O nosso sistema, autorregulador no máximo grau, é capaz de manter-se sozinho, restabelecer-se, consertar-se e, até mesmo, de aperfeiçoar-se. A principal impressão, a mais forte e a mais constante, que se tem ao estudar a atividade nervosa superior pelo nosso método é a extrema plasticidade desta atividade, as suas imensas possibilidades: nela, nada permanece na imobilidade, nada é inflexível, tudo pode ser conseguido e aperfeiçoado, posto que sejam satisfeitas certas condições necessárias.”(Pavlov, 1932/1984, p. 124)

Segundo Pickenhain (1999) são notáveis as características da teoria dos sistemas na explicação dada por Pavlov sobre o modo de funcionamento do cérebro e sobre a relação do organismo com o ambiente, em especial a noção de auto-organização como central para a definição de um organismo complexo. Em Skinner uma influência da teoria dos sistemas também está presente: “Organismos complexos, como o homem, frequentemente parecem comportar-se caprichosamente.” (Skinner, 1969/1984, p. 341).

Todavia, a estrutura e os processos fundamentais que tornam possíveis os comportamentos externamente observáveis e internamente existentes são descritos por Skinner como sendo domínio da fisiologia. Sem um interesse maior pelo assunto, o behaviorismo se vê criticado por um movimento nascente que não se conforma com uma “caixa preta” inviolável, sobretudo quando os primeiros computadores estão sendo concebidos. Segundo Turing (1950) a mente/cérebro pode ser descrita como uma máquina de computação. As máquinas de Turing se tornavam assim o modelo matemático materializado de

toda inteligência e a base para o que foi chamado de “revolução cognitiva”. Desde então o estudo da mente não mais tratava de constatar fatos psíquicos empíricos, mas de identificar os processos cognitivos e de simulá-los através de programas computacionais a fim de confrontá-los com dados empíricos (Newell & Simon, 1976).

No campo metodológico uma verdadeira revolução se produziu e continua a ocorrer com novas técnicas nascidas na matemática, na computação e na eletrônica, propiciando avanços em outros domínios das ciências cognitivas, como nas neurociências (Nicoletis, 2011) e nas ciências humanas e sociais (Kennedy, Eberhart e Shi, 2001; Phan & Amblard, 2007).

A perspectiva cognitiva cativou diversos segmentos disciplinares como a biologia (Maturana & Varela, 1973/1980), a educação, a linguística, as neurociências, a filosofia, a psicologia, a antro-

pologia e a inteligência artificial (Pylyshyn, 1984), mas também a engenharia de conhecimento, a ergonomia (Aussenac-Gilles, Laublet e Reynaud, 1996; Pomian, Pradère e Gaillard, 1997), as ciências humanas (Lemaire, 1999), a sociologia e a economia (Matlin, 2001).

Entre os teóricos que buscam definir uma ciência cognitiva como uma disciplina ao mesmo nível das citadas anteriormente, nenhum consenso foi encontrado segundo Luger (1994) e Lemaire (1999). Entendemos que o que caracteriza as ciências cognitivas é um aspecto metodológico que se dissemina de modo bastante útil em todas as disciplinas que integram seu corpo interdisciplinar. Este aspecto metodológico envolve o contraponto tradicional da teoria com a experimentação, mas também o contraponto da teoria com a modelagem computacional e da experimentação com a modelagem computacional.

3. Teoria, Experimento e Modelagem Computacional

O processo de inovação teórica e prática nas ciências cognitivas parece seguir uma comunicação não linear entre avanços conceituais e pressupostos teóricos de base, mas também avanços das práticas experimentais e avanços dos sistemas de computação.

Em cada uma das disciplinas cognitivas um vasto corpo de conhecimento conceitual é qualitativamente rico e serve como inspiração para a concepção de novos sistemas computacionais que simulam propriedades cognitivas complexas de organismos naturais, de redes sociais, etc. Por outro lado, os modelos computacionais permitem às disciplinas cognitivas um modo de validação de seus modelos teóricos através da “experimentação *in silico*”. Deste modo existe uma confrontação entre o modelo computacional, o modelo teórico e o protocolo experimental, cada qual concebido com suas próprias ontologias de base, por exemplo, um neurônio artificial não é um neurônio natural, cada qual possui seus próprios componentes materiais bastante distintos, mas são relacionados dada uma série de similaridades teóricas e experimentais (ex: reconhecimento de imagens, resolução de problemas, etc.).

Esta relação entre experimentação, teoria e programação foi defendida por Newell & Simon

(1976), Fodor (1983), Van Gelder & Port (1995), dentre tantos outros.

“The empirical character of computer science is nowhere more evident than in this alliance with psychology. Not only are psychological experiments required to test the veridicality of the simulation models as explanations of the human behavior, but out of the experiments come new ideas for the design and construction of physical symbol systems.” (Newell & Simon, 1976, p. 119-120)

Não valendo somente para a relação entre a psicologia e a computação, mas para toda disciplina cognitiva e a modelagem computacional, é na interação entre o modo conceitual, as práticas experimentais e a modelagem computacional que se concentra o domínio das ontologias. Na contraposição das ontologias envolvidas no modelo teórico, no modelo subsidiando as práticas experimentais e no modelo computacional (envolvendo uma linguagem de programação, variáveis, parametrização, equações, algoritmos, etc.) ocorre a convergência de ontologias: momento em que o modelo computacional passa a representar bem

ou simular uma determinada realidade natural, à luz de uma teoria. Dizemos que o modelo está mais bem calibrado quanto melhor é sua capacidade de predição.

De acordo com o quadro epistemológico “semântico” de Suppes (1989), uma teoria está relacionada com dados empíricos que especificam modelos através das variáveis envolvidas em uma teoria, aplicando-os a um domínio particular, o que forma a tríade: teoria, modelo, dados empíricos. Esta tríade é adotada e ilustrada por Müller, Phan e Varenne (2009) e Livet et al. (2010). Segundo Livet et al. (2010), a construção de modelos está profundamente relacionada às ontologias, seja no sentido filosófico ou no sentido computacional do termo.

Abaixo apresentamos uma interpretação

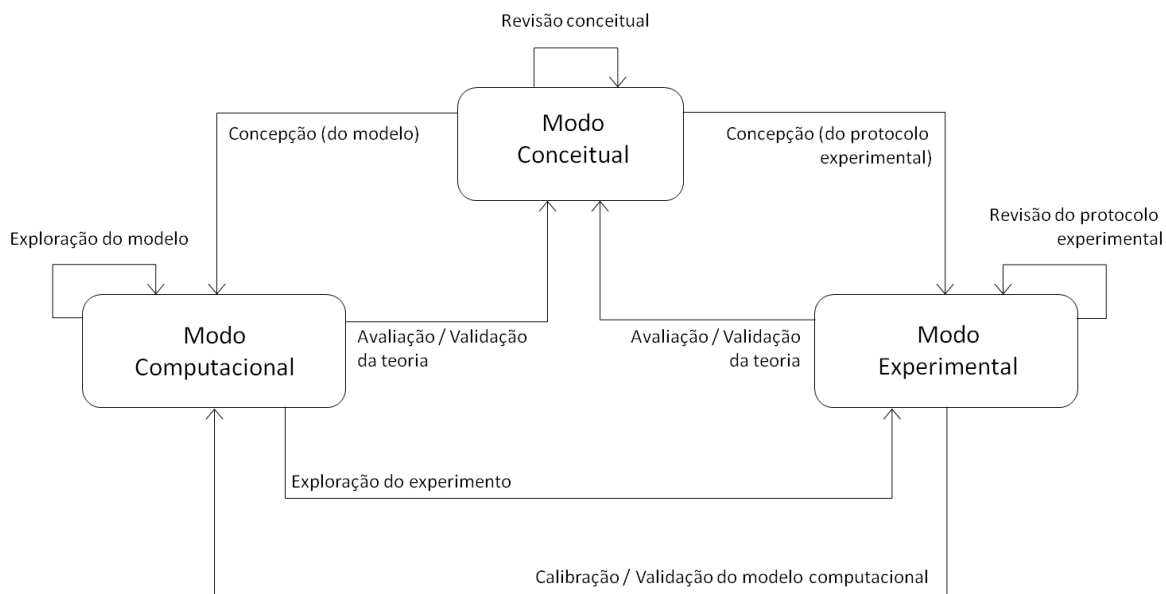


Figura 1: Elementos e relações envolvidos no processo de inovação de teorias, modelos computacionais e experimentos em ciências cognitivas.

Os modos de investigação da cognição, que seja o conceitual (propondo avanços teóricos), o computacional (propondo diferentes modelos de computação) ou o modo experimental (trazendo explicações com maior rigor e confiabilidade sobre as relações de causalidade), não atuam de modo independente nas ciências cognitivas. Os modos de investigação da cognição interagem de modo não linear e de modo retroativo levando a avanços sucessivos. Deste modo, a proposta deste modelo é vista como uma ontologia útil para a compreensão do processo de inovação de teorias, experimentos e modelos computacionais no campo interdisciplinar das ciências cognitivas.

das relações entre o modo conceitual, o modo computacional e o modo experimental a fim de identificar um processo que defendemos estar em curso atuando na inovação de teorias, modelos computacionais e experimentos em ciências cognitivas. Entendemos que inovações no meio teórico e experimental, como por exemplo os desenhos de Ramón y Cajal, acabam provocando inovações nos modelos computacionais, como de fato ocorreu com a proposta dos neurônios formais por McCulloch & Pitts (1943). Por outro lado, o conexionismo foi e continua sendo um quadro teórico que fornece modelos computacionais de grande relevância para as neurociências, como por exemplo, para a compreensão da afasia (Pulvermüller, 2002).

A fim de fornecer um quadro conveniente, sistemático e coerente para o processo de inovação em ciências cognitivas apresentaremos a seguir o que entendemos ser o modelo metodológico central das ciências cognitivas. Ele é composto por três modos relacionados (ver figura 1): (1) o modo experimental, (2) o modo computacional e (3) o modo conceitual.

O modo experimental de investigação da cognição faz parte do domínio empírico, onde prosperam as observações, medidas e especialmente o experimento. O experimento é um procedimento altamente controlado que requer um protocolo experimental, uma sequência de ações

que devem ser executadas para a produção de um resultado específico. O modo de investigação computacional da cognição faz parte do domínio da modelagem que inclui representações formalizadas (equações diferenciais, afirmações lógicas, programas de computador, etc.). O modo de investigação conceitual da cognição faz parte do domínio teórico, o qual fornece explícita ou implicitamente uma visão de mundo, é essencialmente a base teórica subjacente ao processo de modelagem e de elaboração do protocolo experimental.

Uma série de práticas metodológicas em ciências cognitivas é organizada em torno destes três modos de investigação. Por exemplo, os dados experimentais podem ser elaborados a partir de dados primários, o modo conceitual pode ser sujeito a generalização ou refinamentos, muitas vezes com grande participação da filosofia da mente e o modo computacional fornece modelos que podem ser explorados analiticamente ou por simulação.

O modo conceitual de investigação da cognição envolve uma intensa atividade de elaboração conceitual, de reflexão, análise e criatividade na busca de novos conceitos. Esta é a atividade primária da filosofia da mente e do desenvolvimento teórico em ciências cognitivas. A teoria fornece uma base para a interpretação tanto de experimentos *in vivo* quanto de experimentos *in silico*, ao mesmo tempo em que fornece os *insights* para a elaboração de novos modelos computacionais e também de protocolos experimentais. Com efeito, entendemos que foi através de um destes *insights* que McCulloch & Pitts (1943) propuseram a ideia de um cálculo lógico imanente da atividade do sistema nervoso ou ainda que Pavlov (1909/1970) tenha proposto o estudo de condicionamentos reflexos como a base do estudo do cérebro através de um novo protocolo experimental ao se deparar com a eliciação da salivção em cachorros pela exposição ao som do sininho localizado na porta do laboratório.

O modo computacional de investigação da cognição implica na exploração do modelo. Por exemplo, a rede de neurônios artificiais proposta por McCulloch & Pitts (1943) não consegue resolver certos tipos de problemas. O exemplo clássi-

co é o operador booleano disjunção (XOR) para o qual o modelo de McCulloch & Pitts não é eficaz. Foi necessário um grande esforço de exploração do modelo conexionista para que alterações fossem realizadas e inovações surgissem. De fato, este problema e muitos outros como o XOR não podem ser resolvidos por redes sem unidades intermediárias que criem representações internas estáveis e não reativas frente a novas entradas (Rumelhart, 1998). O modo computacional e o modo experimental interagem. Através dos dados provenientes de experimentos é possível calibrar modelos computacionais elaborados para simular uma realidade qualquer, que seja o funcionamento de redes neurais naturais ou a dinâmica social de uma população de formigas (Theraulaz, Gautrais, Camazine e Deneubourg, 2003; Kennedy et al., 2001).

Subjacente a cada um dos modos de estudo da cognição, há razão para supor que existam ontologias. Por trás de protocolos experimentais existe a descrição dos objetos básicos a serem manipulados, as classes ou tipos aos quais estes objetos pertencem, suas propriedades e naturalmente os efeitos que um objeto pode causar sobre outros. Sob o plano conceitual, ontologias mais gerais se apresentam para dar uma visão de mundo ampla. Os modelos computacionais também possuem suas próprias entidades visto que são sistemas de manipulação de símbolos. Seguindo o raciocínio de Livet et al. (2010), podemos dizer que não há razão para supor que as ontologias subjacentes ao modo experimental, ao modo conceitual e ao modo computacional coincidam ou que sequer sejam coerentes umas com as outras. Deste modo, o autor propõe que seja necessário transformar em uma forma explícita as ontologias em cada modo. Finalmente, estes modos podem ser mais ou menos evocados ou formalizados, dependendo da disciplina científica.

Pavlov (1932/1984) já descrevia os organismos vivos como máquinas de auto-organização complexa. Todavia, o que são sistemas complexos? Teríamos sistemas de computação de mesma natureza a fim de usar como possíveis modelos de compreensão de um sistema complexo natural?

4. Uma Perspectiva Sistemas Complexos da Cognição

Segundo a teoria da enação, a cognição está em ação no mundo, se realiza no mundo, pois se trata de um sistema incorporado, em auto-organização, sob deriva natural e seleção natural. Os elementos que compõem um sistema cognitivo são naturais e seguem as leis naturais que se encontram na física e na química. A cognição se origina do mundo material e consiste em um sistema material por toda sua existência. A aparição da cognição incorporada se confunde mesmo com a aparição do ser vivo sobre a terra. Um organismo vivo, por mais simples que seja, é um sistema cognitivo visto que é capaz de se adaptar através da auto-organização. O sistema cognitivo é baseado em uma estrutura material modificável pelo processo que engendra. Este mecanismo de acoplamento estrutural permite assim ao sistema incorporado (que segue as leis naturais) a auto-organização (Maturana & Varela, 1973/1980; Varela, Thompson e Rosch, 1993). Segundo Maturana & Mpodozis (1992/1999) para que o sistema esteja submetido à seleção natural antes ele deve simplesmente existir. Um sistema cognitivo está em deriva natural antes de estar submetido à seleção natural, pois ele deve se auto-organizar em um meio, superando dificuldades diversas impostas pelo ambiente.

Interações complexas existem no acoplamento estrutural, dinâmica que ocorre entre a estrutura e o processo do sistema cognitivo e também entre o organismo e o meio externo. O sistema cognitivo atua e modifica o ambiente, dando forma ao ambiente, do mesmo modo que ele é determinado por este ambiente. Neste sentido, os defensores da teoria da enação, como Brooks (1991), pensam que o organismo se encontra adaptado, uma vez que está incorporado.

Um sistema é um conjunto organizado de elementos. Na Teoria Geral dos Sistemas (Bertalanffy, 1968), conjuntos de elementos em interação podem ser sistemas fechados ou abertos, ter um número finito ou modificável de elementos. Neste sentido, as fronteiras ou limites próprios de um sistema podem ser difíceis de delimitar, o que torna também difícil o discernimento entre um indivíduo e um coletivo, entre o interno e o externo. A perspectiva do observador é muito importante

neste discernimento.

Sob influência do conceito de acoplamento estrutural (Maturana & Varela, 1973/1980), os sistemas complexos são caracterizados como sistemas auto-organizados. Le Moigne (1977) corrobora a diferença entre sistemas complicados e sistemas complexos:

“Ele concluiu [L. Gérardin em 1975] uma distinção muito operacional entre os sistemas complicados (processadores numerosos conectados unicamente por relações arbóreas) e os sistemas complexos (processadores que, sem ser necessariamente numerosos, estão conectados também por relações retroativas...” (Le Moigne, 1977, p. 119, tradução nossa)

Na verdade, o termo usado por Le Moigne não é “retroativas”, mas “retro colocadas”, em francês o termo exato utilizado foi “*rétrorémettantes*”, isto é, os sistemas complexos são sistemas cujas relações entre os elementos colocam de volta as mesmas relações. Os sistemas complexos possuem uma estrutura que dá suporte a processos que modificam a própria estrutura, mantendo com isso certa relação aberta e estável com o ambiente. Todavia, nos parece que é possível pensar em sistemas complicados que não estão necessariamente organizados de modo arbóreo. Prigogine (1997) pensa que a complexidade seja compatível com a ideia de determinismo e que interações postas em prática através de regras simples podem conduzir a sistemas complexos, que poderiam também ser chamados de sistemas caóticos. Outros como Colander (2000) pensam que existe uma dicotomia entre caos e sistemas complexos. Para ele, o estudo da complexidade reside em formas emergentes, regularidades que se apresentam sem serem previstas ou descritas por regras simples em interação. A aparição destas regularidades é explicada pelo autor como efeito da auto-organização do sistema, o que organiza e forma o sistema, retirando os elementos do caos.

Os sistemas complexos podem apresentar comportamentos adaptativos face ao ambiente. Neste sentido, em uma abordagem sistemas com-

plexos da cognição, a cognição é definida como um sistema complexo adaptativo. Sobre este prisma teórico, para se considerar uma cognição artificial como um modelo computacional que possua as características fundamentais de um sistema cognitivo tal como descreve a teoria, é necessário se considerar um sistema essencialmente capaz de auto-organização, em acoplamento estrutural, em deriva natural e submetido à seleção natural.

O diálogo entre cognição e computação ocorre desde antes dos fundamentos das ciências cognitivas, em particular na tradição cognitivista ou simbólica em inteligência artificial. Os computadores digitais surgem da expectativa de Turing formalizar o modo como seres humanos manipulam símbolos em operações lógico-matemáticas. Mais tarde Newell & Simon (1976), juntos com tantos outros, entenderam que os sistemas de manipulação material de símbolos, o computador, eram um modo de investigar a inteligência em geral. Outra tradição para entender a cognição artificial vem da teoria conexionista, inaugurando o método bio-inspirado. Depois de McCulloch & Pitts (1943) se entendeu que os programas computacionais devem buscar mimetizar de algum modo as características ontologicamente relevantes ou aspectos essenciais para que se possa implementar um sistema computacional cognitivo.

O modelo computacional simbólico ou cognitivista em inteligência artificial nasce da interação entre o modo conceitual de investigação da cognição, atividade esta marcada pela busca da compreensão de como nós seres humanos realizamos operações lógico-matemáticas, com o domínio da modelagem que levou não somente à formalização do modo de resolução de problemas, mas também à concepção de uma mecânica capaz de servir como base para efetiva construção de uma máquina de cálculo (o computador). Por sua vez, o conexionismo nasce de teorias sobre a estrutura e o funcionamento do cérebro assim como de dados empíricos e experimentais sobre o sistema nervoso. Todo esse conhecimento vindo dos modos conceitual e experimental de investigação sobre a cognição impactou sobre os modelos computacionais levando à elaboração de um modelo computacional baseado em redes de neurônios artificiais. Ora, neste momento, com a teoria da enação e teorias dinâmicas sobre a cog-

nição, novos impactos ocorrem sobre a teoria da computação, visando um sistema complexo de computação, que por sua vez estaria assim bem mais próximo da natureza complexa dos sistemas cognitivos naturais.

“Although the various dynamical approaches described by van Gelder and Port do not yet yield a concise single formulation, the general idea is that cognition should be characterized as a continual coupling among brain, body, and environment that unfolds in real time, as opposed to the discrete time steps of digital computation.”
(Mitchell, 1998, p. 711, grifo da autora)

A frase de Mitchell no final da década de 90 marca um momento no qual se iniciava a busca através de sistemas de manipulação de símbolos em conceber sistemas complexos artificiais a fim de aproximar melhor computação e cognição, dada as novas exigências teóricas. Estas novas teorias impulsionam a revisão do conceito de mecanismo. Os autômatos foram durante longo tempo vistos pelo prisma do relógio. Nos anos 30 as máquinas de Turing apresentam um novo paradigma para o mecanicismo. Atualmente as teorias da enação, dos sistemas dinâmicos e complexos imprimem a necessidade de novas revisões do mecanicismo.

“Over time, what counted as a mechanism in science was gradually broadened, and in the 1930s, computation, in the form of Turing Machines, came to be thought of as a new type of mechanism, one that was capable of processing symbols. Further evolution of the notion of “mechanism” and “mechanistic explanation” can be expected (and has already occurred, e.g., in the understanding of the metabolism and self-reproduction of biological cells). The kind of explanation – in terms of function and adaptation – that I claimed above to be necessary requires uncovering mechanism that explain how function arises and changes in complex systems like the brain and how information is processed. This is something that an extended computation theory – one that is relevant

to complex systems – can offer.” (Mitchell, 1998, p. 713)

Segundo Mitchell (1998) não somente uma simulação de sistemas complexos através dos atuais computadores é almejada por uma perspectiva sistemas complexos da cognição. No domínio da teoria da computação, a concepção de uma máquina complexa é o objetivo a ser atingido. Uma máquina complexa seria muito mais próxima dos seres vivos, o que vai de encontro com a visão da vida artificial. Neste sentido Marr (1982) havia proposto um tipo de mecanismo dinâmico estruturando a funcionalidade observada nos sistemas vivos. Segundo Clark (1997), as ciências cognitivas precisam de teorias e modelos computacionais descrevendo os acoplamentos complexos entre cérebro, corpo e ambiente. Para ele, a abordagem cognitivista contribui com mecanismos de processamento de símbolos materiais para a concepção de estruturas e mecanismos complexos capazes de exibir comportamentos funcionais e adaptativos.

No encontro da teoria da complexidade com a teoria da computação nasce uma nova perspectiva para modelos computacionais com um primeiro objetivo bastante claro.

5. Modelagem Multiagente de Sistemas Complexos

Diferentes modelos computacionais se candidatarão para engendrar sistemas complexos artificiais: Automatos Celulares, Algoritmos Genéticos, Rede Baysiana, Sistemas Multiagentes, etc. Nesta seção pretende-se apresentar os sistemas multiagentes e defender a modelagem multiagente como uma forma de modelagem de sistemas complexos naturais através de sistemas complexos multiagentes, o que diminui as práticas de reducionismos injustificados que ocorrem durante a modelagem matemática e computacional nas diversas disciplinas científicas. Com efeito, os sistemas cognitivos, tal como aparecem nas diversas disciplinas cognitivas, apresentam grande complexidade, o que exige uma metodologia de modelagem robusta, o que faz da modelagem multiagente um suporte de implementação da cognição e de simulação de sistemas cognitivos bastante adaptado.

Os agentes em sistemas multiagentes são

“The goal of complex systems research is to explain, across disciplines, how complex and adaptive behavior can arise from systems composed of large numbers of relatively simple components with no central control and with complicated but limited interactions.” (Mitchell, 1998, p. 714)

O objetivo central da abordagem sistemas complexos da cognição é implementar, através de unidades de processamento simbólico servindo como componentes, um grande número destes componentes que sejam relativamente simples mas que interajam de modo descentralizado. Isto é importante pois comportamentos adaptativos emergem destes sistemas cujas relações dos componentes são capazes de auto-organizar o sistema.

Atualmente uma série de contribuições se enquadra nesta corrente sistemas complexos da cognição (ver Steels, 1998, 2000, 2003; Ramos, 2002; Theraulaz et al., 2003; Rocha & Hordijk, 2005; Holland, 2006; Arnellos, Vosinakis, Spyrou e Darzentas, 2006; Miller & Page, 2007; Ellis & Larsen-Freeman, 2010; Hooker, 2011).

unidades de processamento de símbolos tal como os neurônios artificiais, todavia, são unidades situadas sendo capazes de deslocamento em um espaço. Neste sentido, a modelagem multiagente cativou a comunidade de ciências humanas e sociais (Gilbert & Doran, 1994; Epstein & Axtell, 1996; Kennedy et al., 2001; Wooldridge, 2002; Phan & Amblard, 2007). Assim, um agente pode representar uma pessoa, uma organização, uma cidade, etc. e através da interação destes agentes pode lançar um sistema complexo compatível com o sistema complexo natural estudado. Além do mais, agentes não representam somente seres humanos, mas também elementos físicos, químicos e biológicos (Ferber, 1995).

Na comunidade de simulação baseada em agentes, uma definição de modelagem bastante usada é a de Minsky (1965): “Para um observador B, um objeto A* é um modelo de um objeto A, na medida em que B pode usar A* para responder

questões que interessam a ele sobre A". Nesse sentido, repetindo o raciocínio de Livet et al. (2010), um pesquisador B tem um domínio empírico de interesse A sobre o qual informações de cunho experimental possuem grande valor. Para responder a perguntas, a modelagem inclui um processo de abstração do domínio empírico A estabelecendo o que na realidade corresponde ao modelo A* (estabelecendo uma relação entre as ontologias do modelo e da natureza então). O modelo construído artificialmente A*, possui em sua estrutura entidades abstratas e em seus processos relações suficientemente boas para tornar o modelo A* passível de responder perguntas sobre A. Defendemos que a modelagem multiagente possui uma estrutura e processos complexos o que torna seus fundamentos ontológicos mais próximos da natureza ontológica complexa da natureza.

Um sistema multiagente tem como elementos os agentes, onde a organização do sistema depende das interações entre os agentes. Propriedades emergentes ocorrem em sistemas multiagentes pois o comportamento individual dos agentes sobre objetos e outros agentes pode levar a formas globais, a diferentes organizações que são mantidas pela ação do coletivo de agentes. Um sistema multiagente é um sistema capaz de auto-organização. A estrutura do sistema é formada pelos agentes e é modificada pelo processo do sistema, isto é, pela atividade coletiva dos agentes sobre objetos no ambiente e sobre outros agentes. O acoplamento estrutural em sistemas multiagentes é possível pois "... os agentes compondo uma população se comportam em função de um meio que é circularmente modificado por suas ações." (Lenay, 1994, p. 9, tradução nossa).

"Multi-agents systems (MAS) open a whole set of concepts and techniques allowing heterogeneous software (or hardware) entities, called "agents" to cooperate according to complex modes of interaction." (Ferber, 2007, p. 7)

A fim de explorar melhor as ontologias que subexistem aos sistemas complexos multiagentes optamos por apresentar o modelo AGRE (*Agent, Group, Role, Environment*) proposto por Parunak & Odell (2002) e revisto por Ferber, Michel e Baez

(2005) e Ferber (2007).

No modelo Agente, Grupo, Papel e Ambiente os agentes são representados em suas funções ou papéis que assumem em um grupo e também por sua localização em uma área ou espaço. Em certo sentido, o ambiente pode ser entendido como qualquer canal pelo qual os agentes interagem. Faz sentido então falar de ambiente como o canal de transmissão de mensagens "agente agente" e também o canal pelo qual um grupo envia tarefas efetuadas a outro grupo. Todavia, no modelo AGRE uma exigência suplementar é feita a fim de "espacializar" a noção de ambiente: o agente se encontra situado "fisicamente" em um espaço. Esta regra traz ao agente uma característica ontológica inviolável de qualquer elemento natural que o agente venha a representar em um trabalho de modelagem e simulação multiagente de sistemas complexos naturais.

Os princípios de AGRE são quatro, apresentados a partir de Ferber et al. (2005). Ao leitor é sugerida a leitura do artigo "AGRE: Integrating Environments with Organizations", de Ferber et al. (2005, p. 52), cuja figura 2 destaca a visualização dos princípios a seguir.

Princípio 1: Os agentes são unidades em um mundo multiagente onde manifestam sua existência através de dois "modos":

- a. O mundo organizacional é um tipo de modo. O espaço em uma organização é materializado pela existência de grupos, i. e., uma posição em uma organização significa um pertencimento a um grupo. Nos grupos os agentes possuem papéis.
- b. O mundo "físico" é um tipo de modo no qual os espaços são áreas onde os agentes agem através de um "corpo" situado nessa área.

Princípio 2: Um agente pode possuir vários modos de diferentes tipos. Limites sobre o número de modos que um agente possui dependem do mundo no qual foi registrado.

Princípio 3: Um agente é situado simultaneamente em uma área e em uma organização. Os papéis e os corpos são modos de existência de um agente em espaços de interação.

- a. Um agente pode ter vários papéis em um grupo e pode pertencer a mais de um grupo.
- b. Um agente pode ter em uma área apenas uma posição, i. e., um corpo por área. Assim, se o modelo possui N áreas, o agente deve ter N corpos.

Os autores notam:

- e: $m.op(a1, \dots, an)$: a ação de um agente com modo m executando o operador op cujos argumentos são $a1, \dots, an$ em um espaço e .
- modo (x, m, s) [papel (x, p, g)]: o agente x tem um modo m no espaço s [tem um papel p no grupo g].
- tipo (m, M) [tipo (p, P)]: o modo m é de tipo M [o papel p é do tipo P]
- $op(o(a1, \dots, an), M)$: o operador $o(a1, \dots, an)$ é definido no modo [papel] no tipo M .

6. Ontologias e realismo científico

Após esta apresentação do papel que as ontologias computacionais podem exercer em modelagem multiagente em ciências cognitivas, podemos agora nos questionar especificamente sobre o realismo destas ontologias. Como observado anteriormente, segundo Livet et al. (2010) existe uma relação entre o significado metafísico do termo “ontologia” e o significado computacional. Esta correlação é indiscutível. Todavia, não existe uma relação de identidade completa pois fica pendente uma questão recorrente na teoria do conhecimento e filosofia da ciência: a questão do realismo científico.

“O realismo científico é a tese de que uma investigação científica validada produz tipos de julgamentos ou representações que são autênticos conhecimentos, ou pelo menos próximos de alguns fenômenos, sendo esses fenômenos subexistindo como realidade independente 1) da teoria científica em si, 2) da observação ou ainda 3) dos procedimentos para a construção de representações desses fenômenos ou de procedimentos de prova de julgamentos relativos a esses fenômenos.” (Varenne, 2012, p. 13, tradução livre)

Princípio 4: Um modo é a via de ação de um agente sobre um espaço de interação. Um agente pode agir em um espaço de interação somente se existe um modo que o possibilita fazê-lo.

Os autores notam:

- e: $m.o(a1, \dots, an) \Rightarrow \exists x: modo(x, m, s) \wedge tipo(m, M) \wedge op(o(a1, \dots, an), M)$

- a. Um agente se comunica (envia uma mensagem) com outro agente apenas se eles atuarem pelo menos um papel em pelo menos um grupo.

Os autores notam:

- e: $p1.envia(p2, msg) \Rightarrow \exists x, y: papel(x, p1, g) \wedge papel(y, p2, g)$

Por exemplo, uma teoria científica é chamada de “realista” se as entidades teóricas ou as relações teóricas que supõe possuem correspondentes na realidade que existe independentemente da teoria em si, e que estão em uma relação de semelhança, segundo o que diz a teoria. Além do problema considerável do que significa “corresponder”, é possível pelo menos precisar que a teoria realista exige um comprometimento do teórico com a existência das coisas às quais se refere em sua teoria. Assumir o realismo significa afirmar que as entidades teóricas não são ficções, mas que exprimem uma realidade. Filósofos usam a noção de engajamento ontológico (*ontological commitment*) para descrever a tese realista subjacente a certas teorias científicas.

Como apresentado no início (Introdução), Gruber (1993), Smith (2003) e Müller et al. (2009) indicam que uma ontologia em sentido computacional é comumente definida como um sistema de termos duplos (simbologia sobre simbologia para padronização da linguagem de descrição) usado para descrever um domínio de conhecimento ou informação. Com esta definição fica claro que questionar o realismo de ontologias computacionais é questionar o realismo das classes. Esta problemática reativa outra formulação clássica

da filosofia: o problema do realismo da espécie. O termo “espécie” é aqui na acepção da espécie biológica, na acepção da classificação biológica das espécies ou teoria da evolução das espécies. Por exemplo, Quine (1969) recusa ser realista das espécies naturais, porque a base lógica do conceito associado de classe parece frágil. Segundo ele, o conceito de classe de indivíduos (forma sob a qual nos deparamos com o que chamamos de “espécies” da natureza) está mal concebido e não impõe, portanto, nenhum engajamento ontológico claro para com a existência de classes em si no mundo natural. Segundo ele o realismo da espécie deve ser banido.

Do nosso ponto de vista, a questão do realismo das espécies e portanto das ontologias computacionais pode se beneficiar da disputa medieval sobre o realismo dos universais. Na verdade, em sua acepção atual, uma ontologia computacional é antes de tudo um sistema de termos. A disputa medieval se concerne também ao realismo de alguns termos ditos “universais”. Estes podem ser termos de nomes comuns, como “cavalo” por exemplo. Para os realistas medievais, a essência do “cavalo”, o universal cavalo existe em si independentemente de cavalos específicos. A palavra cavalo, nesse sentido, é o nome dessa essência. Libera (1996) mostra que é possível em linhas gerais resumir os debates sobre a existência real dos universais em três posições distintas: o realismo, o conceitualismo e o nominalismo. Os realistas medievais (neste momento um realismo platônico) argumentam que as essências, do que é comum entre várias coisas que se parecem, existem independentemente dessas coisas em um mundo à parte: o lugar das ideias. Os conceitualistas (em geral os aristotélicos) acreditam que os universais não existem independentemente dos indivíduos, mas que eles subexistem em uma forma cada vez mais particular e atualizada apenas por meio dos indivíduos que são chamados por estes termos, bem como na nossa capacidade intelectual, por conseguinte, existem também como conceitos em nossa alma. Os nominalistas acreditam que os termos universais não existem de modo algum fora da linguagem e que as palavras ou nomes comuns são apenas instrumentos de linguagem convenientes para se referir sucintamente a coleções de indivíduos. Formas contemporâneas

de nominalismo se apoiam bem em uma filosofia pragmatista: a verdade de uma representação é medida pelo o que permite fazer e transformar o mundo. Scheffler (1963) analisou diferentes formas de ficcionismo na teoria do conhecimento e ele mostrou sua frequente associação com o instrumentalismo (tese afirmando que representações científicas são apenas instrumentos convenientes de intervenção no mundo).

No trabalho contemporâneo envolvendo a modelagem usando ontologias computacionais há um debate muito próximo, embora muitas vezes implícito. Para um grupo de modeladores, as ontologias têm um papel meramente nominalista, ficcionista e instrumentalista. Vendo somente por este prisma, as ontologias são também bastante úteis, sobretudo em um contexto altamente interdisciplinar. Elas são principalmente um objetivo de pesquisa-ação que, de acordo com a caracterização geral de Minsky, anteriormente citado, impõe a forma instrumental do modelo e, portanto, também a funcionalidade da ontologia na qual se baseia o modelo. Este fato impõe ao modelador, nem que seja de modo fraco, um engajamento ontológico, um compromisso de entidades designadas pela sua ontologia com a realidade. A ontologia é útil, neste contexto, para disciplinas que não utilizam os mesmos conceitos de comunicação e que possuem diversas e às vezes conflitantes teorias. O objetivo final é a obtenção rápida de resultados concretos: recomendações de ação e intervenção.

No entanto, um segundo grupo de modeladores e usuários de ontologias computacionais adotam o realismo das ontologias e pesquisam como elaborar representações e sistemas computacionais efetivamente conforme à realidade, levando em consideração a complexidade que esta implica na teoria dos sistemas:

“No entanto é necessário estabelecer a distinção entre um sistema de conceitos que é uma ideologia no sentido próprio do termo, um sistema de termos que é uma terminologia e um sistema de categorias de entidades que é uma ontologia no sentido próprio do termo. A ontologia como representação de conhecimento deve ser uma representação direta da realidade. Evidentemente, ela

é elaborada através de conceitos e termos, mas uma ontologia não é nem a especificação desses conceitos e nem a disposição destes termos, é uma revisão estruturada dos tipos de entidades encontradas na realidade. Quanto às ciências cognitivas ou à linguística, elas são apenas uma outra fonte potencial de conhecimento, mas a ontologia é distinta. A ontologia é, portanto, não na caracterização de uma ideologia, nem na especificação de um vocabulário, as coisas são conceitos independentes que temos e as palavras usadas para falar sobre. Ela está interessada em entidades através das categorias nas quais recaem, propriedades que elas têm e relações nas quais elas entram. A finalidade de uma ontologia é caracterizar as entidades que ela reconhece a um maior ou menor nível de generalidade. Isso equivale a encontrar os elementos que permitem analisar alguns fatos do mundo, por exemplo o fato de que uma determinada célula está em uma placa de Petri em uma manipulação.” (Grenon, 2007, p. 102, tradução livre).

Na literatura científica, no que tange particularmente ao uso de ontologias computacionais para a modelagem de sistemas complexos, as ontologias têm um papel, por menor que seja, de hipótese ontológica do trabalho, sendo foco de atenção pelo menos temporariamente no modelo experimental, no modelo conceitual e no modelo computacional. Assim, a maioria dos trabalhos sobre fenômenos emergentes a partir da interação de elementos, formando sistemas complexos, possui uma interpretação realista, com forte engajamento ontológico sobre seus elementos, suas interações, sobre sua auto-organização e propriedades emergentes. As ontologias são elaboradas com o objetivo primeiro não de prever ou intervir, mas de batizar teorias realistas sobre fenômenos reais. Uma vez concebidas, elas servem ao rebuscamento teórico, à elaboração de protocolos experimentais, à concepção de máquinas inteligentes, à simulação de interações entre mecanismos realistas hipoteticamente presentes no corpo, no cérebro ou na sociedade (Demeulenaere, 2011).

Deve-se notar que antes de se caracterizar

pelo uso de ontologias computacionais, a abordagem computacional é caracterizada pela tendência geral para a desagregação e desconstrução dos formalismos matemáticos uniformes e simplistas do início do século XX. Sem saber se o mundo é ele mesmo discreto ou contínuo (se o cérebro funciona como um computador digital manipulando 0 e 1), a modelagem computacional procede pela matemática discreta, atomizando e discretizando pois assim é possível obter maior precisão.

Esta desagregação das representações formais ocorreu na física, química, etc. e também nas ciências humanas por razões técnicas que não estão relacionadas principalmente com a matemática discreta mas pela busca de modelos fortemente engajados ontologicamente com a necessidade de representar simultaneamente dados heterogêneos ou com a necessidade de abordagem multi-escala (representando a hierarquia complexa da natureza): isso é modelagem centrada no indivíduo em Ecologia (Grimm, 1999) e modelagem multiagente em Ciências Humanas e Sociais (Phan & Amblard, 2007). Esta mutação, portanto, teve uma origem principalmente metodológica. Hoje, esta tendência para produzir simulações cada vez mais detalhadas e de baixo para cima (*bottom-up*), encontra muitas vezes a questão do realismo científico, inclusive entre os próprios cientistas: uma modelagem e simulação de um sistema complexo natural estão sujeitas a uma interpretação fraca (instrumentalista), mista (conceitualista) ou forte (realista) de acordo com a força do compromisso ontológico que o modelador manifesta (Varenne, 2010). Para o modelador, portanto, muitas vezes o tipo formal do modelo não dá a ele por si só, o tipo de compromisso ontológico que acompanha o modelo. Como indica Phan & Varenne (2010), estes modelos de simulações complexas podem ser interpretados tanto como simples cálculos dos modelos computacionais quanto como a replicação simplificada do sistema de interação, de auto-organização, de causalidade descendente e ascendente, tal como realmente existe no fenômeno que nos interessa (ecossistema, sociedade, corpo, mente ou cérebro...).

Esta tendência em modelar com mais e mais detalhes pretende representar antes de tudo as interações entre elementos e efeitos emergentes

associados. Ao mesmo tempo, ela impõe um enriquecimento e um aumento constante do volume de ontologias associadas. Esta tendência também levou a sofisticar a formulação da questão do realismo científico: um grande número de posições epistemológicas intermediárias e distintas podem hoje existir em torno do grau de realismo de um modelo a base de agentes em um sistema multinível complexo. Todavia, existem limites e modelar é simplificar. Um modelador poderá por exemplo se dizer ontologicamente engajado em favor de certos elementos, organização ou propriedades de um submodelo, de um modelo global

multinível, mas não para outros que por razão de comodidade ou de simplificação do cálculo não foram inseridas.

A noção de ontologia será ainda mais útil para forçar os modeladores a se comunicarem e serem explícitos sobre seus compromissos ontológicos diferenciados. Ela também deve ser usada para esclarecer o que o modelador entende pela validação do seu modelo. A validação depende na verdade de um engajamento ontológico, de uma convergência de ontologias entre o modelo computacional, o modelo conceitual e o modelo experimental.

7. Considerações finais

Do ponto de vista do realismo científico, existe uma distinção entre a ciência de base e a engenharia. Neste último segmento, Bishop (2006) escreve que *“from the perspective of practical applications of pattern recognition, however, biological realism would impose entirely unnecessary constraints.”* (p. 226). Com efeito, uma vez que novas tecnologias computacionais já foram criadas a partir da reprodução computacional do realismo biológico, psicológico, social, etc., a aplicação destes conhecimentos na engenharia costuma seguir um padrão bastante reducionista. Neste sentido, Fodor (2000) chegou a dizer que *“AI was generally supposed to be about engineering, not about science; and certainly not about philosophy”* (p. 5). As ciências cognitivas, como domínio interdisciplinar envolvendo a filosofia, a ciência e a engenharia (engenharia do conhecimento notadamente), como enfatizado na primeira seção, engloba ambas perspectivas de trabalho, que são assim delimitadas pois naturalmente seguem objetivos distintos, como por exemplo conceber um *software* utilitário ou produzir conhecimentos científicos de base, como por exemplo respectivamente a heurística de busca do google® e a inteligência coletiva (*swarm intelligence*). Assim, também no largo domínio das ciências cognitivas, diferentes engajamentos ou compromissos ontológicos são adotados por especialistas em temas, por especialistas em experimentação e também por especialistas em modelagem computacional, sem que isto incomode a construção e revisão do corpo teórico e prático das ciências cognitivas.

Sob uma perspectiva sistemas complexos, no caso das ciências cognitivas, a cognição não é representada apenas de modo uniforme, mas também intervindo relações intra-níveis, níveis de agregação física ou biológica (agregação de símbolos e de processadores de símbolos, como na formação de *clusters* em sistemas multiagentes por exemplo) ou intervindo relações inter-níveis, envolvendo semântica e representações emergentes por exemplo (com causalidade descendente sobre os elementos, como no caso de sistemas auto-organizados). Esta perspectiva vem sendo interessante e pode ser útil desenvolver uma epistemologia multi-nível (ver Dennett, 1987) baseada em ontologias, permitindo definir de maneira múltipla e evolutiva diferentes capacidades cognitivas sobrepostas de referência sobre o real (ver Donald, 1991) com implicações sobre os modos experimental, conceitual e computacional de investigação da cognição.

Esta é a perspectiva que buscamos destacar neste ensaio. O postulado de estarmos trabalhando sobre as mesmas entidades pertencentes ao mundo real, cuja existência é independente do sujeito, permite o cruzamento entre dados computacionais, experimentais e teóricos. O cientista cognitivo parece não poder negar um engajamento ontológico, por menor que ele seja. Todavia, a noção de ontologia será ainda mais útil para instigar os modeladores a buscarem um acordo sobre o que está sendo tratado, a serem explícitos sobre seus compromissos ontológicos diferenciados ou comuns, buscando em ciência (não necessaria-

mente em engenharia) níveis de realismo mais elevados. É bastante comum em diversas áreas do conhecimento diferentes teorias postulando diferentes entidades para explicar um mesmo fenômeno. O que pode ser ainda mais incômodo é o uso de diferentes termos para fazer referência às mesmas entidades, o que leva a traduções terminológicas. As ontologias são indispensáveis para a boa elaboração do conhecimento científico e por sua transparência. Ela também deve ser usada para esclarecer o que o modelador entende pela validação do seu modelo, a qual depende na verdade de um engajamento das variáveis tratadas com elementos da realidade, mas também

de uma convergência de ontologias provenientes do modelo conceitual, do modelo experimental e do modelo computacional.

Portanto, no contexto interdisciplinar das ciências cognitivas e voltadas para a modelagem computacional, as ontologias cumprem um papel essencial na comunicação entre disciplinas e também no processo de inovação de teorias, modelos e experimentos. O engajamento ontológico constitui-se em um marco de um realismo científico, o que leva a modelagem computacional à busca de modelos mais realistas, mais próximos de uma perspectiva sistemas complexos da natureza e da cognição.

8. Referências bibliográficas

Abdi, H.; Valentin, D. (2006). *Mathématiques pour les sciences cognitives: avec des applications aux réseaux de neurones, au traitement du signal, à l'imagerie cérébrale et à la statistique*. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.

Arnellos, A.; Vosinakis, S.; Spyrou, T.; Darzentas, J. (2006). The Emergence of Autonomous Representations. *Journal of Computers*, 1(6), 29-36.

Aussenac-Gilles, N.; Laublet, P.; & Reynaud, C. (1996). *Acquisition et ingénierie des connaissances*. Toulouse: Cépaduès-Éditions.

Bertalanffy, L. (1968). *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. New York: George Braziller.

Bishop, C. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning*. Singapore: Springer.

Booch, G.; Jacobson, I.; Rumbaugh, J. (1998). *The Unified Modeling Language User Guide*. Reading, Mass: Addison Wesley Longman.

Brooks, R. (1991). Intelligence Without Representation. *Artificial Intelligence Journal*, 47, 139-159.

Colander, D. (2000). *The Complexity Vision and the Teaching of Economics*. Northampton, MA: E. Elgar.

Clark, A. (1997). *Being there: putting brain, body, and world together again*. Cambridge: MIT Press.

Demeulenaere, P. (2011). *Analytical Sociology and Social Mechanisms*. Cambridge: Cambridge University Press.

Dennett, D. C. (1987). *The intentional stance*. Cambridge, MA: MIT Press.

Donald, M. (1991). *Origins of the Modern Mind: Three Stages in the Evolution of Culture and Cognition*. Cambridge, Mass, and London: Harvard University Press.

Ellis, N. C.; Larsen-Freeman, D. (2010). *Language as a Complex Adaptive System*. Malden, MA: Wiley-Blackwell.

Epstein, J. M.; Axtell, R. (1996). *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. Cambridge, MA: MIT Press.

Ferber, J. (1995). *Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*. Paris: InterEditions.

Ferber, J. (2007). Multi-agent Concepts and Methodologies. In: Phan, D. & Amblard, F. *Agent-based modelling and simulation in the social and human sciences*. Oxford: The Bardwell Press.

Ferber, J.; Michel, F.; Baez, J. (2005). *AGRE: Integrating Environments with Organizations*. In:

- E4MAS'04 Environments for Multiagent Systems* (pp. 127-134). Melbourne, Australia.
- Fodor, J. A. (1983). *The Modularity of Mind: An Essay on Faculty Psychology*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Fodor, J. A. (2000). *The Mind Doesn't Work That Way: The Scope and Limits of Computational Psychology*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Gilbert, N.; Doran, J. (1994). *Simulating Societies: The Computer Simulation of Social Phenomena*. London: UCL Press.
- Grimm, V. (1999). Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future? *Ecological Modelling*, 115, 129-148.
- Grenon, P. (2007). BFO (Basic Formal Ontology): pour la standardisation des ontologies biomédicales OBO. In: Roux, M. (Ed.). *Biologie systémique. Standards et modèles* (pp. 97-121). Paris: Omniscience.
- Gruber, T. R. (1993). Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. *International Journal Human-Computer Studies*. 43 (5), 907-928.
- Holland, J. H. (2006). Studying complex adaptive systems. *Journal of Systems Science and Complexity*, 19, 1-8.
- Hooker, C. (2011). *Philosophy of Complex Systems*. North Holland: Elsevier.
- Kennedy, J. F.; Eberhart, R. C.; Shi, Y. (2001). *Swarm Intelligence*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann.
- Le Moigne, J.-L. (1977). *La théorie du système général - Théorie de la modélisation*. Paris: PUF.
- Lemaire, P. (1999). *Psychologie Cognitive*. Paris, Bruxelles: De Boeck.
- Lenay, C. (1994). Organisation émergente dans les populations: biologie, éthologie, systèmes artificiels. *Intellectica*, 19, 9-17.
- Libera, A. (1996). *La querelle des universaux 'De Platon à la fin du Moyen-âge*. Paris: Seuil.
- Livet, P.; Müller, J.-P.; Phan, D.; Sanders, L. (2010). Ontology, a Mediator for Agent-Based Modeling in Social Science. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 13 (1). Retirado em 12/09/2012, de world wide web: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/1/3.html>.
- Luger, G. F. (1994). *Cognitive science: The science of intelligent systems*. San Diego: Academic Press.
- Marr, D. (1982). *Vision: A Computational Investigation Into the Human Representation and Processing of Visual Information*. San Francisco: W.H. Freeman.
- Matlin, M. W. (2001). *La cognition: une introduction à la psychologie cognitive*. Paris: DeBoeck.
- Maturana, H.; Varela, F. J. (1980). *Autopoiesis and Cognition: the Realization of the Living*. Dordrecht: Reidel. (Original de 1973)
- Maturana, H.; Mpodozis, G. (1999). *La dérive des espèces par la voie de la sélection naturelle*. Lyon: Presses Universitaires de Lyon. (Original de 1992)
- McCulloch, W. S.; Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, 115-133.
- Miller, J. H.; Page, S. (2007). *Complex Adaptive Systems: an introduction to computational models of social life*. Princeton: Princeton University Press.
- Minsky, L. M. (1965). Matter, Mind and Models. *Proceedings of IFIP Congress*, 45-49.
- Mitchell, M. (1998). A complex-systems perspective on the "computation vs. dynamics" debate in cognitive science. In: *Proceedings of the 20th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 710-715). Mahwah, NJ: Erlbaum.

- Müller, J-P.; Phan, D.; Varenne, F. (2009). An ontological perspective on the action - structure debate for agent-based framework: the case of "following a rule". *XVI èmes rencontres de Rochebrune, Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels: Ontologie et dynamique des systèmes complexes, perspectives interdisciplinaires*. Megeve, França, 19-23 de janeiro.
- Newell, A.; Simon, H. (1976). Computer science as empirical inquiry: Symbols and search. *Communications of the Association for Computing Machinery*, 19 (3), 113-126.
- Nicolelis, M. (2011). *Muito além do nosso eu: A nova neurociência que une cérebro e máquinas - e como ela pode mudar nossas vidas*. São Paulo: Companhia das Letras.
- Parunak, H.V.D.; Odell, J. (2002). Representing social structures in UML. In: *Agent-Oriented Software Engineering II of Lecture notes in computer science LNCS (1-16)*. Berlin: Springer.
- Pavlov, I. P. (1970). O cérebro e as ciências naturais. In: Pavlov, I. P. *Obras Escolhidas* (pp. 65-77). São Paulo: Hemus. (Original de 1909)
- Pavlov, I. P. (1984). Resposta de um fisiólogo aos psicólogos. In: Civita, V. (Ed.). *Pavlov: Vida e obra* (pp. 99-124). São Paulo: Abril Cultural. (Original de 1932)
- Phan, D.; Amblard, F. (2007). *Agent-based modelling and simulation in the social and human sciences*. Oxford: The Bardwell Press.
- Phan, D.; Varenne, F. (2010). Agent-Based Models and Simulations in Economics and Social Sciences: from conceptual exploration to distinct ways of experimenting, *JASSS*, 13(1), 5. Retirado em 12/09/2012, de *World Wide Web*: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/1/5.html>
- Pickenhain, L. (1999). The Importance of I. P. Pavlov for the Development of Neuroscience. *Integrative Physiological and Behavioral Science*, 34 (2), 85-89.
- Pomian, J.-L.; Pradère, T.; Gaillard, I. (1997). *Ingénierie et ergonomie*. Toulouse, France: Cépaduès-Editions.
- Prigogine, I. (1997). *The End of Certainty*. New York: The Free Press.
- Pulvermüller, F. (2002). *The Neuroscience of Language: On Brain Circuits of Words and Serial Order*. New York: Cambridge University Press.
- Pylyshyn, Z. W. (1984). *Computation and cognition: toward a foundation for cognitive science*. Cambridge: MIT press.
- Quine, W. V. O. (1969). *Ontological relativity and other essays*. New-York: Columbia University Press.
- Ramos, V. (2002). On the Implicit and on the Artificial - Morphogenesis and Emergent Aesthetics in Autonomous Collective Systems. In: Maubant, J. L. et al. (Ed.), *Architopia Book, Art, Architecture and Science* (pp. 25-57). Institut d'Art Contemporain.
- Rocha, L. M.; Hordijk, W. (2005). Material representations: from the genetic code to the evolution of cellular automata. *Artificial Life*, 11, 189-214.
- Rumelhart, D. E. (1998). The architecture of Mind: A Connectionist Approach. In: Thagard, P. (Ed.) *Mind readings: introductory selections on cognitive science* (pp. 207-238). Cambridge, MA: A Bradford Book.
- Scheffler, I. (1963). *The Anatomy of Inquiry - Philosophical Studies in the Theory of Science*. New York: Knopf.
- Skinner, B. F. (1984). *Contingências do reforço: Uma Análise Teórica*. São Paulo: Abril Cultural. (Original de 1969)
- Smith, B. (2003). Ontology. In: Floridi, L. (Ed.). *Blackwell Guide to the Philosophy of Computing and Information* (pp. 155-166). Oxford: Blackwell.
- Steels, L. (1998). The origins of ontologies and communication conventions in Multi-Agent

- Systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 1(2), 169-194.
- Steels, L. (2000). Language as a complex adaptive system. Parallel problem solving from nature - PPSN VI. In: Schoenauer, M. (Ed.). *Lecture Note in Computer Science* (Vol. 1917, pp. 17-26). Berlin: Springer.
- Steels, L. (2003). Intelligence with representation. *Philosophical Transactions of the Royal Society, A* 361(1811), 2381-2395.
- Suppes, P. (1989) *The Semantic Conception of Theories and Scientific Realism*. Urbana: University of Illinois Press.
- Theraulaz, G.; Gautrais, J.; Camazine, S.; Deneubourg, J.-L. (2003). The formation of spatial patterns in social insects: from simple behaviours to complex structures. *Philosophical transactions - Royal Society. Mathematical, physical and engineering sciences*, 361 (1807), 1263-1282.
- Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59, 433-460.
- Varela, F. J.; Thompson, E.; Rosch, E. (1993). *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. Cambridge: Massachussets Institute Press.
- Varenne, F. (2010). Les simulations computationnelles dans les sciences sociales, *Nouvelles Perspectives en Sciences Sociales*, 5 (2), 17-49.
- Varenne, F. (2012). *Théorie, réalité, modèle*. Paris: Editions Matériologiques.
- Van Gelder, T.; Port, R. F. (1995). It's about time: an overview of the dynamical approach to cognition. In: Port, R. F.; Van Gelder, T. *Mind as motion: explorations in the dynamics of cognition* (pp. 1-43). Cambridge, MA: MIT Press.
- Wooldridge, M. (2002). *An introduction to multiagent systems*. London: John Wiley & Sons, LTD.