

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
DE PRODUÇÃO E SISTEMAS**

**Um *Framework* para Simulação Econômica Baseado em um Modelo de  
Agente Adaptativo Antecipatório com Racionalidade Limitada**

**Sérgio Luiz de Medeiros Rivero**

**Dissertação apresentada como  
requisito para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia de Produção**

**Orientador: Raul Sidnei Wazlawick**

**Florianópolis  
Agosto de 1999**

**Um *Framework* para Simulação Econômica Baseado em um Modelo de Agente Adaptativo Antecipatório com Racionalidade Limitada**

**Sérgio Luiz de Medeiros Rivero**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, especialidade em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina.

---

Ricardo Miranda Barcia, Ph. D.

Banca Examinadora

---

Raul Sidnei Wazlawick, Dr.  
Orientador

---

Guilherme Bittencourt, Dr.

---

Luiz Fernando Jacintho Maia, Dr.

---

Alejandro Martins, Dr.

## Dedicatória

*Ao meu pai Mac Donald  
À minha mãe Maria do Carmo*

*Para Kênia, Antônio e Clara*

## Agradecimentos

Ao prof. Antônio Carlos Mariani, cuja colaboração desinteressada, competência e rigor científico foram fundamentais tanto na inspiração quanto na execução deste trabalho.

A Bernd H. Storb que com nossas discussões e seus *insights* e habilidades matemáticas clarearam e orientaram o emaranhado de idéias que eventualmente ocorria.

Ao prof. Raul S. Wazlawick, pela orientação e apoio.

Aos colegas do LSC que ajudam a produzir um ambiente de colaboração e espírito crítico fundamental para o desenvolvimento de qualquer pesquisa.

Aos professores da área de Inteligência Aplicada da PGEP.

Aos colegas do departamento de Economia da UNIR, pela liberação no período de mestrado.

À Universidade Federal de Rondônia (UNIR) e à CAPES pelo apoio financeiro.

The road not taken

Two roads diverged in a yellow wood,  
And sorry I could not travel both  
And being one traveler, long I stood  
And looked down one as far as I could  
To where it bent in the undergrowth;

Then took the other, as just as fair,  
And having perhaps the better claim,  
Because it was grassy and wanted wear;  
Though as for that the passing there  
Had worn them really about the same,

And both that morning equally lay  
In leaves no step had trodden black.  
Oh, I kept the first for another day!  
Yet knowing how way leads on to way,  
I doubted if I should ever come back.

I shall be telling this with a sigh  
Somewhere ages and ages hence:  
Two roads diverged in a wood, and I -  
I took the one less traveled by,  
And that has made all the difference.

Robert Frost

## O caminho recusado

Num bosque amarelo, dois caminhos  
Divergiam - e diante da escolha  
Demoradamente olhei, sozinho;  
Um que eu via melhor que o do vizinho  
E se perdia em curvas em folhas;

Mas fui pelo outro, pois se estendeu  
Também mais ao meu gosto  
Nos vegetais, no que ofereceu;  
Seria o mesmo, imaginei eu,  
Se preferisse o caminho oposto,

Pois na manhã cada qual dormia  
Sobre folhas nunca palmilhadas.  
- Fique o primeiro para outro dia!  
Mas sei bem que estrada puxa estrada  
E pressenti que não voltaria...

Vou sempre chorar o que ocorreu  
Nos dois caminhos, tristeza imensa;  
Ah, divergiam num bosque e eu  
Quis o que mais raro pareceu  
- E isto fez toda a diferença...

(tradução Jorge Wanderley)

## Resumo

A metáfora de uma economia como uma rede complexa onde um conjunto muito grande de agentes se interrelacionam determinando, a partir das suas interações a trajetória agregada do sistema é uma idéia recorrente nos trabalhos de alguns grupos de pesquisa na área de economia. Esta visão tem levado à construção de modelos de simulação econômica baseados em agentes adaptativos artificiais. Por outro lado, a área de inteligência artificial desenvolveu a noção de agente artificial como um novo paradigma para a construção de sistemas baseados em conhecimento. Tanto a perspectiva dos agentes adaptativos artificiais, quanto a de sistemas multiagentes da IA têm em comum a idéia da construção do comportamento agregado do sistema a partir da implementação do comportamento de cada agente. Este elemento comum tem possibilitado diversas interações e uma fecunda troca de idéias entre estes dois campos, tanto na construção de modelos de simulação quanto no avanço da teoria. Um elemento que tem uma conexão clara entre as duas perspectivas e a teoria econômica é a noção de antecipação desenvolvida por Ekdal, Astor e Davidsson (1994) e por Davidsson (1996) a partir do trabalho de Rosen (1985).

A noção de antecipação é comparada, neste trabalho à noção de racionalidade limitada formulada por R. Simon. É construído um modelo teórico de agente antecipatório que incorpora a noção de racionalidade limitada. A partir deste modelo é definido um conjunto de requisitos necessários para a construção de um agente adaptativo artificial para simulação econômica.

E definido, então um *framework* multiagentes, próprio para simulação econômica. Este *framework* incorpora a implementação de um modelo de agente adaptativo artificial com racionalidade limitada baseado na noção de sistema antecipatório e na racionalidade limitada de H. Simon.

O *framework* é comparado com as diversas ferramentas existentes.

## **Abstract**

Economic Systems can be viewed as a complex net with a profusion of interacting agents. The system's global trajectory is determined by these interactions. That metaphor is a recurrent theme in the work of some research groups in economics. Economic simulation models have been constructed using that adaptive artificial agents perspective. By other way, artificial intelligence researchers developed the notion of artificial agent. This notion has become a new paradigm in knowledge based systems modeling and implementation.

Both artificial adaptive agents and AI perspective share the idea that aggregate system behavior is the result of each agent behavior plus the interaction between these agents. This common element has made a prolific interaction between these two scientific disciplines possible, either in simulation models construction or in setting new theoretical insights. A clear connection between that two perspectives and the economic theory is the notion of anticipation developed by Rosen (1985) and computationally implemented by Ekdal, Astor & Davidsson (1994) and Davidsson (1996).

In our work the notion of anticipation is compared to H. Simon's notion of bounded rationality. A theoretical model of anticipatory agent with bounded rationality is thus constructed. From this model a set of necessary requisites for the construction of an adaptive artificial agent to be used in economic simulation is defined. Some multiagent implementation frameworks are compared and a multiagent economic simulation framework is constructed.

This framework includes a model of adaptive artificial agent based on the notions of anticipatory system and Simon's bounded rationality. A comparison between the various frameworks has been made.



# Sumário

1	Introdução.....	1
2	Racionalidade Substantiva e Racionalidade Limitada.....	3
2.1	Racionalidade Substantiva e Expectativas Racionais.....	4
2.2	Expectativas Racionais e Simulação Computacional.....	6
2.3	Racionalidade Limitada e Racionalidade Processual.....	8
3	Racionalidade e Incerteza.....	13
3.1	Tempo e Incerteza.....	14
3.2	Decisões de Rotina e Incerteza.....	15
3.3	Racionalidade e Incerteza.....	15
3.4	Conceitos de Incerteza e Imprecisão dentro da Economia.....	17
3.4.1	Ausência de Incerteza.....	17
3.4.2	Incerteza Substantiva.....	17
3.4.3	Incerteza Processual.....	18
3.4.4	Incerteza-K.....	18
4	Expectativas.....	20
4.1	Expectativas e Probabilidade.....	20
4.2	Expectativas de Curto e Longo Prazos.....	21
4.3	Expectativas, Tempo e Incerteza.....	22
5	Agentes Antecipatórios e Simulação.....	25
5.1	Definições de Agente.....	25
5.2	Sistemas Antecipatórios.....	28
5.3	Uma Implementação de Agentes Antecipatórios.....	32
5.4	Uma Definição de Agente Adequada Para Simulação Econômica.....	36
6	Frameworks Multiagentes.....	40
6.1	Características Desejáveis de um Framework de Simulação Multiagentes em Economia.....	42
6.2	Frameworks Genéricos.....	44
6.3	Frameworks para Simulação.....	46
6.3.1	Swarm.....	48
6.3.2	SDML.....	50
6.4	Os Diversos Frameworks e o Estado Atual da Simulação Multiagentes.....	56
7	O Modelo Proposto.....	58
7.1	A Estrutura do Agente.....	58
7.1.1	Componentes do Agente.....	61
7.1.2	Definição do Modelo de Seleção de Situações.....	62
7.1.3	O Mecanismo de Competição.....	64
7.1.4	Evolução do Modelo do Mundo.....	65
8	A Implementação do <i>Framework</i> .....	66
8.1	Framework Multiagentes.....	66
8.1.1	Modelo de Eventos Discretos.....	66
8.1.2	As Classes para Simulação Econômica.....	68
8.1.3	Características do <i>Framework</i> .....	68
8.1.4	Classes Básicas de Simulação Econômica.....	69
8.2	Agente Adaptativo - uma Implementação.....	70
8.3	AssetsWorld.....	72
8.4	ClassicalModel.....	75
8.5	Comparação com Outros Modelos.....	77
8.5.1	Comparação com o modelo de Davidsson.....	77
8.5.2	Comparação com o Swarm.....	77
8.5.3	Comparação com o SDML.....	78
8.5.4	Quadro Resumo da Comparação entre os <i>Frameworks</i> .....	78
9	Conclusões e Recomendações.....	80
9.1	Mundo dos Agentes.....	81
9.2	Simulação Multiagentes.....	82
10	Bibliografia.....	83

11	Anexo - Artigo.....	87
1.	INTRODUCTION.....	89
2.	COMPUTATIONAL SIMULATION AND ECONOMIC THEORY.....	90
3.	CAUSAL SYSTEMS AND ANTICIPATORY SYSTEMS.....	92
4.	THE ANTICIPATORY AGENTS MODEL.....	93
4.1.	Auction.....	94
4.2.	Evolution of Rules.....	96
	Rule and message system.....	96
	Apportionment of credit system.....	96
	Genetic Algorithm.....	97
5.	CONCLUSIONS AND FUTURE WORK.....	98
6.	ACKNOWLEDGEMENTS.....	99
12	REFERENCES.....	100

## Índice de Figuras

Figura 1 - Um Agente Antecipatório (Rosen, 1985).....	30
Figura 2 - Uma Implementação de Agente Antecipatório (Davidsson, 1996).....	33
Figura 3 - Uma representação Gráfica de uma Simulação no Swarm (Stefansson, 1998).....	49
Figura 4 - Hierarquia de Tipos do SDML.....	51
Figura 5 - Seqüência das Bases de Regras dos Agentes (Moss, 1996).....	53
Figura 6 - Fluxos de Informação no Processo de Aprendizado de um Agente (Moss & Edmonds, 1998).....	54
Figura 7 - Modelo de Agente Antecipatório (Rivero, Storb, Wazlawick, 1998).....	60
Figura 8 - Mundo dos Atores - Classes Básicas para Simulação a Eventos Discretos.....	67
Figura 9 - Classes Básicas para Simulação Econômica.....	69
Figura 11 - AssetsWorld: Fluxos de Informação.....	72
Figura 12 - AssetsWorld: Classes Implementadas.....	73
Figura 13 - Janela da Execução do AssetsWorld.....	74
Figura 14 - ClassicalModel: Fluxos de Informação.....	75
Figura 15 - ClassicalModel - Passo de Simulação (Script).....	76
Figura 16 - ClassicalModel: Classes Implementadas.....	76

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Tipos, condições e modelos para a incerteza.....	17
Tabela 2 - Comparação dos <i>Frameworks</i> multiagentes .....	56
Tabela 3 - Quadro comparativo dos frameworks.....	79

# 1 Introdução

O uso de modelos de simulação computacional tem se tornado cada vez mais comum em diversos campos de áreas tão díspares como simulação de sistemas de produção e otimização, até em antropologia (Kohler & Carr, 1997) e sistemas biológicos (Sumpter & Broomhead, 1997). Um campo que tem uma crescente produção nos últimos anos é a aplicação de ferramentas de inteligência artificial (IA) em modelos de simulação. Estas ferramentas variam desde o uso de sistemas especialistas até redes neurais e algoritmos genéticos. Um campo em particular onde o uso de ferramentas de IA tem tido significativa discussão é a simulação de sistemas econômicos<sup>1</sup>.

Uma abordagem em particular de simulação de sistemas econômicos começa a tomar força no debate atual: o uso de agentes adaptativos artificiais (AAA). Esta abordagem, discutida inicialmente a partir do Santa Fe Institute (SFI), vem tomando cada vez mais espaço na literatura contemporânea de simulação econômica (Arthur, Darlauf & Lane 1997), em particular com o crescimento do uso de implementações e teoria que usam a abordagem multiagentes.

Dentro do campo da IA, a abordagem multiagentes surge como a perspectiva que teve grande atenção nos últimos anos. As aplicações de sistemas multiagentes têm grande diversidade e vão desde o uso de agentes de busca na Internet (Cockayne & Zyda, 1997; Heilmann et. al. 1995), até a simulação de um mercado de ações (Arthur et. al. 1996).

Tanto a perspectiva dos Agentes Adaptativos Artificiais, quanto a de sistemas multiagentes da IA têm em comum a idéia da construção do comportamento agregado do sistema a partir da implementação do comportamento de cada agente. Este elemento comum tem possibilitado diversas interações e uma fecunda troca de idéias entre estes dois campos, tanto na construção de modelos de simulação quanto no avanço da teoria. Um elemento que tem uma conexão clara entre as duas perspectivas e a teoria econômica é a noção de antecipação desenvolvida por Ekdal, Astor e Davidsson (1994) e por Davidsson (1996) a partir do trabalho de Rosen (1985), que tem um paralelo com a noção de expectativa dos agentes em economia.

As principais contribuições deste trabalho são as seguintes:

- é definido um conjunto de requisitos necessários para a construção de um agente adaptativo artificial para simulação econômica;
- é definido um conjunto de características adequadas para um *framework*<sup>2</sup> multiagentes para simulação econômica.

A partir destas definições é feita uma implementação parcial de um modelo de agente adaptativo antecipatório com racionalidade limitada baseada no modelo proposto por Rivero, Storb e Wazlwick, (1998).

É implementado também um *framework* para simulação multiagentes em economia baseado no *Mundo dos Atores* (Mariani, 1998a, 1998b).

---

<sup>1</sup> Alguns lugares na internet onde esta discussão pode ser encontrada são: Santa Fe Institute: <http://www.santafe.edu/sfi/publications>; Centre for Policy Modelling: <http://cpm.mmu.ac.uk> e no IIASA: <http://www.iiasa.ac.at/>

<sup>2</sup> A palavra *framework* pode ser entendida, neste trabalho, como uma estrutura de classes básicas. Uma estrutura de trabalho para a implementação dos modelos discutidos aqui.

## 2 Racionalidade Substantiva e Racionalidade Limitada

Incompletude e imprecisão no conhecimento dos agentes econômicos sobre as variáveis relevantes para os seus negócios, parecem estar presentes na maior parte dos eventos onde a tomada de decisão é necessária em problemas econômicos. Uma decisão sobre investimento em uma empresa qualquer (por exemplo, uma fábrica de autopeças) deve levar em conta elementos como: a trajetória futura da demanda para o seu tipo de produto, a tecnologia existente no mercado, a atitude dos concorrentes, a futura política econômica e monetária, etc. Todos estes aspectos podem alterar o rendimento futuro esperado do investimento. A decisão sobre quanto e qual investimento fazer é, portanto, baseada nas expectativas do agente sobre o comportamento dos outros agentes no futuro.

A ação dos agentes econômicos em um mercado real transforma o mundo e as expectativas dos outros agentes, mudanças na tecnologia envolvida nos processos de produção e comercialização geralmente alteram as estruturas de custo e a participação das empresas no mercado, e conseqüentemente a expectativa das empresas sobre a margem e volume de lucros, mesmo mantendo inalterados os preços.

Estas mudanças na *estrutura* do ambiente econômico são um aspecto inerente a considerar na tomada de decisão pelos agentes em assuntos como a aquisição de bens duráveis pelas famílias ou as decisões de investimento das empresas. Todas estas decisões são tomadas com base nas *expectativas* sobre o futuro, pois é no futuro que o uso dos bens (e portanto a renda gerada por eles) vai se realizar.

Decisões são escolhas entre alternativas, pressupõem portanto alguma racionalidade dos agentes que as estão tomando. Modelar esta racionalidade é um ponto de partida fundamental para que a teoria econômica possa explicar estas decisões e para construir modelos plausíveis para o comportamento dos agentes econômicos.

Um modelo consistente para o comportamento dos agentes econômicos precisa levar em conta, portanto, dois aspectos: a) a incerteza associada ao ambiente onde estes estão inseridos; b) as limitações da racionalidade dos agentes. Problemas de decisão muito simples tornam a questão do limite da capacidade computacional do agente irrelevante, se o custo computacional de buscar uma solução ótima é irrelevante uma racionalidade otimizadora é a alternativa adequada, pois, soluções ótimas são alcançáveis.

Problemas de decisão relevantes, porém, tendem a ser computacionalmente complexos. Mesmo supondo-se que não há alterações estruturais no ambiente, a complexidade computacional dos problemas de decisão pode ser muito acima da capacidade de qualquer agente. Um exemplo típico para este problema, é o jogo de xadrez, onde a computação de soluções ótimas é virtualmente impossível, embora as regras sejam poucas, o número de elementos do jogo determinado e a sua estrutura invariável.

Na maior parte problemas econômicos reais a limitação da capacidade computacional torna-se um problema inevitável. Há um número muito maior de agentes a serem considerados que num jogo de xadrez, um número maior de regras a observar. Não há nenhuma garantia que estas regras não vão mudar logo após a tomada de decisão do agente. A estrutura do jogo (número de jogadores, importância de cada jogador), além das regras, também se modifica.

A modelagem de agentes econômicos, passa, portanto, pelo reconhecimento de que a capacidade de acessar e computar a solução ótima de um problema está associada à complexidade do ambiente onde o agente econômico está inserido e aos limites físicos do próprio agente.

Serão discutidos a seguir alguns modelos teóricos de racionalidade econômica mais importantes na perspectiva de sua aplicação à implementação de modelos de simulação multiagentes. Os modelos são a *racionalidade substantiva* e a *racionalidade limitada*. A racionalidade substantiva é discutida no contexto de sua implementação de maior relevância teórica, a teoria das expectativas racionais e a racionalidade limitada a partir da formulação de H. Simon.

## **2.1 Racionalidade Substantiva e Expectativas Racionais**

A principal teoria do *mainstream econômico* (a teoria das expectativas racionais) trabalha, segundo Sargent (1993, p. 3) com dois requerimentos fundamentais:

- a) Racionalidade individual: que pressupõe uma função qualquer de preferências (função de utilidade) e a intenção do agente em otimizar estas preferências;
- b) Consistência mútua das percepções dos agentes sobre o ambiente, o que pressupõe um conhecimento dos agentes sobre as distribuições de probabilidade de equilíbrio no sistema econômico que (o próprio Sargent admite) estão muito acima do conhecimento que os agentes podem possuir.



O ambiente pressuposto em a) tem necessariamente uma simplicidade suficiente para que o custo de computar soluções ótimas seja desprezível. Esta racionalidade, que tem o ajuste do sistema ao ambiente externo determinado apenas pela meta (o ambiente interno), sem nenhuma informação sobre o *processo* usado para computar a solução ótima, é chamada por Simon (1981) de *racionalidade substantiva*. É no ambiente da racionalidade substantiva que se põem os agentes da teoria das expectativas racionais.

Esta racionalidade pressupõe a maximização de uma função de preferências tendo um conjunto parcial de informações do mundo. O agente escolhe, dentre as alternativas postas, qual a que lhe leve à melhor utilidade, dadas as expectativas. Aqui temos o nosso segundo pressuposto (item b): para que a solução possa ser ótima os agentes devem todos usar o mesmo modelo macroeconômico (o melhor modelo possível) para basear suas previsões. Este modelo único é que pode levar à consistência mútua das expectativas. Aqui temos algumas hipóteses heróicas; a primeira é de que todos os agentes conhecem o melhor modelo possível para a economia e a segunda é que os agentes econômicos formam suas expectativas sobre o comportamento do *mercado* acreditando que todos os outros agentes econômicos utilizarão o mesmo modelo como ponto de partida para as suas projeções (Simonsen, 1989, p. 530).

A teoria das expectativas racionais obteve notável capacidade de explicação em mercados de ativos financeiros. Porém, quando se trata de aplicar seus modelos a problemas dinâmicos da macroeconomia real, temos toda a construção de um modelo de *racionalidade* extremamente idealizado. Por trás da hipótese realista e atraente de que os agentes econômicos projetam suas variáveis endógenas a partir do comportamento esperado das variáveis exógenas, temos a suposição de que estas expectativas são necessariamente consistentes entre si. O desenvolvimento deste modelo, embora formalmente elegante, leva a contradições, paradoxos e, muitas vezes, a conclusões absurdamente irrealistas (Vercelli, 1992). Um exemplo cômico, citado por Simonsen (1989, p. 531) é o desenvolvimento irônico, feito por Modigliani, a partir dos pressupostos das expectativas racionais, das causas da depressão dos anos trinta. Este desenvolvimento formal chega a conclusão que a crise foi resultado de uma brutal epidemia de preguiça dos trabalhadores!

Não é possível criticar uma teoria econômica apenas pelo seu irrealismo (embora uma teoria deva ser, em princípio, o mais realista possível). Toda teoria

pressupõe, necessariamente algum grau de simplificação, afinal, não queremos um mapa do mundo do tamanho do mundo, porém, é necessária uma percepção clara do que se perde com as simplificações impostas pelo modelo. Vercelli (1992, pp.10-11) cita um conjunto de paradoxos observados a partir do desenvolvimento formal sobre as hipóteses das expectativas racionais. Estes paradoxos, segundo a sua perspectiva, devem-se a uma *incongruência semântica* dos axiomas da teoria das expectativas racionais. A principal inconsistência formal, segundo o autor, deve-se ao fato de que a teoria fundamenta-se na noção de equilíbrio a partir de um ponto de vista estático. A dinâmica desenvolvida a partir desta abordagem tem a invariabilidade da estrutura econômica (distribuição e/ou tecnologia dadas) como um dos elementos fundamentais. Uma incorporação de elementos da teoria dinâmica na teoria econômica tem sido um aspecto importante do trabalho desenvolvido em alguns centros no mundo, especialmente no Santa Fe Institute (SFI). Esta abordagem considera a transformação estrutural (evolução dos paradigmas tecnológicos, evolução das organizações, ciclos longos) como um aspecto inerente à construção da teoria, mudança estrutural que é resultado da ação dos *agentes econômicos* que tomando decisões o tempo todo alteram o ambiente e põem a incerteza (no sentido de Knight, 1972 e Keynes, 1921/1973) no centro do palco.

## **2.2 Expectativas Racionais e Simulação Computacional**

Modelos que incorporem incerteza e transformação estrutural, onde os agentes econômicos sejam menos idealizados e mais empiricamente plausíveis, tendem a ser muito mais complexos e conseqüentemente de solução analítica extremamente difícil ou mesmo impossível. Para Sargent (1993, p.2):

“Ironically when we economists make the people in our models more ‘bounded’ in their rationality and more diverse in their understanding of the environment, *we* must be smarter, because our models become larger and more demanding mathematically and econometrically” (p. 2).<sup>3</sup>

O dilema posto para os teóricos da economia é que o uso de suposições mais realísticas em relação à racionalidade e à interação dos agentes econômicos, leva a um aumento da complexidade formal dos modelos. Porém, o aumento da consistência empírica dos modelos parece estar em abordagens que considerem exatamente este tipo de complexidade. Uma das soluções possíveis para este tipo de problema é a simulação computacional. A disseminação de computadores mais baratos e poderosos tornou a

---

<sup>3</sup> "Ironicamente, quando nós economistas tornamos as pessoas em nossos modelos mais 'limitadas' na sua racionalidade e mais diferenciados na sua compreensão do ambiente, *nós* precisamos ser mais espertos pois nossos modelos se tornam maiores e mais custosos tanto matematicamente quanto econometricamente".

abordagem da simulação cada vez mais comum. Mas, que tipo de simulação pode auxiliar o avanço da teoria?

Uma abordagem possível é a formulação (via métodos econométricos) e solução (via simulação numérica) de sistemas de equações diferenciais (ou de equações a diferenças finitas) não lineares. Esta é uma das abordagens mais usadas atualmente para simulação computacional de problemas econômicos complexos (Kydland e Prescott, 1996). Este tipo de abordagem apresenta alguns problemas (Rivero, Storb e Wazlawick, 1998):

- a) A transformação estrutural (alteração das parcelas de mercado dos agentes, progresso técnico, etc.) leva a mudanças nos coeficientes das equações usadas no modelo. Estas mudanças devem ser consideradas na sua formulação, i.e. temos que ter algum tipo de *meta-regra* para mapear o padrão de transformação estrutural do modelo no tempo sob pena de explicar apenas o curtíssimo prazo.
- b) O comportamento das variáveis nem sempre pode ser ajustado a uma distribuição de probabilidade. A ocorrência de *eventos cruciais* (decisões de investimento de um agente econômico em um oligopólio, por exemplo) não são passíveis de repetição;
- c) A formulação das estratégias dos agentes depende, não somente do presente e do passado, mas da expectativa que o agente tem sobre o comportamento futuro dos outros agentes. O que, na suposição de racionalidade ilimitada, levaria a uma recursão infinita.

As observações anteriores nos levam a discutir como seria possível superar as dificuldades listadas acima. Uma abordagem possível seria construir a noção de racionalidade econômica a partir de uma outra perspectiva: a consideração dos limites da capacidade cognitiva e computacional dos agentes como elemento inerente à sua modelagem. Os agentes lidam com a complexidade do ambiente e tomam decisões apesar de sua limitação na capacidade de obter e processar todas as informações relevantes. Portanto, estes limites são um elemento inerente tanto aos agentes econômicos reais quanto aos eventuais agentes econômicos simulados.

A formulação de esquemas evolucionários que mimetizem a dinâmica da transformação estrutural é algo que vem sendo desenvolvido na teoria econômica a partir

do trabalho de Nelson & Winter (1982) e de Dosi (1982), a modelagem desta dinâmica é fortemente baseada em abordagens de simulação computacional.

O tratamento de eventos cruciais (Shackle, 1955) necessita da superação da abordagem probabilística para a formulação das estratégias dos agentes (Davidson, 1991). Os agentes categorizam *trajetórias do mundo*, reconhecem *situações*. Se a sua capacidade de memória é limitada os agentes não têm como guardar todas as situações do mundo que foram observadas, estes agentes, portanto, ou *esquecem* parte das situações observadas, ou estabelecem algum processo de categorização para os estados do mundo e associando estados com algum grau de similaridade. Comparar estados do mundo observados com estados categorizados na memória dificilmente produzirá um *matching* que tenha similaridade total. Trajetórias possíveis também levam algum *grau de confiança*. Estas expectativas (antecipações) sobre as trajetórias futuras do mundo, inclusive sobre o comportamento de outros agentes, não exploram todas as possibilidades abertas em um determinado ponto da trajetória.

Supor todos estes elementos para superar os problemas abertos pelas abordagens de simulação baseadas nas expectativas racionais leva à necessidade de superar a concepção teórica de racionalidade das expectativas racionais. Precisamos supor, em vez da racionalidade substantiva alguma outra racionalidade que considere as limitações cognitivas dos agentes do mundo real.

### **2.3 Racionalidade Limitada e Racionalidade Processual**

A concepção de racionalidade limitada se deve a Herbert Simon, cujo trabalho sempre esteve estabelecido solidamente em três campos teóricos aparentemente distintos, a Psicologia, a Economia e a Inteligência Artificial. A compreensão de Simon do escopo teórico destas três áreas, sua independência teórica, seu compromisso com problemas concretos e seu trabalho sobre o tema da racionalidade humana levaram-no à discussão dos pressupostos de racionalidade da teoria econômica e à sua formulação da noção de *Racionalidade Processual (Procedural Rationality)*. Neste trabalho se analisará as noções de *Racionalidade Limitada (Bounded Rationality)* e *Racionalidade Processual* bem como as suas implicações teóricas para a modelagem e simulação de sistemas econômicos.

Simon propõe a idéia de Racionalidade Limitada em contraste com a idéia de que os agentes maximizam seus objetivos, e que é lugar comum na teoria econômica

tradicional. A racionalidade substantiva supõe, para Simon (1981, p.32), que o sistema em questão:

"... adapts to an outer environment, subject only to the goal, defined by its inner environment. To predict its behavior we need information about the outer environment and the goal, but we need no information about the process used to compute the optimal quantity"<sup>4</sup>

Racionalidade substantiva, teria intrínseco um processo de otimização, esta otimização, porém, não supõe informação completa sobre o mundo. Falhas na percepção ou no acesso à informação por si só não seriam condições que invalidariam a racionalidade substantiva.

Racionalidade substantiva também não exclui a possibilidade de adaptação do agente econômico às transformações do mundo real. Na citação que fizemos, o processo de adaptação está explícito. O sistema se *adapta* a um ambiente externo. O aprendizado, *não é* excluído da visão de Simon sobre a racionalidade substantiva. Neste sentido, a noção de racionalidade limitada proposta por Sargent (1993), se contrapõe à perspectiva de Simon.

Em sua abordagem da racionalidade limitada, Sargent (1993, p.22-23) considera que as “*pessoas artificiais*” (os agentes artificiais), processam dados e tomam decisões construindo e usando teorias sobre o mundo em que vivem. Comportam-se como os próprios economistas (ou econométristas), os agentes artificiais, portanto, têm seu comportamento determinado pelos mesmos princípios utilizados para modelá-los. Isto é, para avançar na modelagem dos agentes artificiais é necessário defini-los de forma a *mimetizar*, da maneira mais próxima do real que for possível, o comportamento dos agentes econômicos. Esta é a constatação de Sargent sobre a forma possível de resolver os problemas da inconsistência das expectativas racionais com o comportamento observado dos agentes. Esta concessão à uma perspectiva mais realística sobre o comportamento dos agentes, porém, esbarra em dois problemas fundamentais: A incompatibilidade de um modelo de agentes heterogêneos com a perspectiva do *equilíbrio em expectativas racionais*, e a complexidade da modelagem dos agentes a partir de uma abordagem dinâmica com fundamentos cognitivos realísticos.

Sargent (1993, p.23) define expectativas racionais como “*...an equilibrium concept that at best describes how such a system might eventually behave if the system will ever settle down to a situation in which all of the agents have solved their scientific*

---

<sup>4</sup> "...adapta-se a um ambiente externo sujeito somente à meta definida pelo seu ambiente interno. Para predizer seu comportamento precisamos de informação sobre o ambiente externo e a meta, mas não precisamos de nenhuma informação sobre o processo usado para calcular a quantidade ótima"

*problems*”<sup>5</sup>. Este equilíbrio supõe certamente a consistência mútua das percepções e a maximização das funções objetivo de cada agente econômico. Esta visão de equilíbrio é que permite aos economistas que constroem os modelos encontrar soluções analíticas. Esta limitação, porém, leva um modelo de racionalidade limitada de novo à racionalidade substantiva.

Outra dificuldade é que a construção de modelos de agentes econômicos com uma teoria dinâmica com fundamentos cognitivos realísticos esbarra no conhecimento de como estes modelos são construídos pelos agentes, e de como se pode dar uma descrição correta e precisa o suficiente para que este modelo sobre as formas de modelar seja implementável formalmente.

A proposta de Sargent para a racionalidade limitada é, então incluir dois elementos na abordagem dos modelos de agentes econômicos: a) informação incompleta ou imprecisa sobre as variáveis exógenas relevantes; b) capacidade de adaptação ou aprendizado;

Os agentes artificiais não teriam acesso a todas as informações relevantes para a tomada de decisão ótima, o sistema, então funcionaria fora de uma situação de equilíbrio onde os agentes artificiais seriam heterogêneos, tanto na informação que utilizam, quanto nos modelos que usam para fazer suas projeções do comportamento futuro do sistema. A otimização da função utilidade dos agentes artificiais não seria possível devido à informação imprecisa ou incompleta sobre as variáveis exógenas ou sobre o próprio modelo de previsão.

Esta dinâmica fora do equilíbrio, produzida pela heterogeneidade dos agentes artificiais, seria superada pela sua capacidade de se adaptar e aprender o melhor modelo de previsão para a economia. Este aprendizado pode ser modelado por técnicas de inteligência artificial como redes neurais, algoritmos genéticos e sistemas classificadores (Holland, 1996, Goldberg, 1989).

Os componentes da noção de racionalidade limitada de Sargent, estão todos postos na perspectiva de Simon sobre a racionalidade substantiva. Os agentes otimizam uma função objetivo interna (seu *ambiente interno*) adaptando-se às mudanças no *ambiente externo*, mesmo na presença de informação imprecisa ou incompleta.

---

<sup>5</sup> "... um conceito de equilíbrio que melhor descreve como algum sistema pode eventualmente se comportar se o sistema sempre estabilizar em uma situação em que todos os agentes tenham resolvido seus 'problemas científicos' ".

A abordagem de Simon, parte da perspectiva que a modelagem da racionalidade dos agentes (econômicos ou não) deve considerar a complexidade do ambiente onde os agentes estão inseridos, mas não deve reduzi-la a um único postulado psicológico, como a maximização da utilidade em economia (Newel e Simon, 1972, pp. 53-54). Este tipo de abordagem reducionista, na perspectiva dos autores, prece ser mais adequada para o estudo da estrutura do ambiente onde os agentes (pessoas ou animais) estão inseridos do que ao estudo da natureza do comportamento destes *organismos*. Uma teoria que supere a simples reflexão do ambiente onde os agentes estão inseridos e se torne uma *teoria psicológica da racionalidade humana* precisa estabelecer claramente onde se posicionar. Para os autores esta teoria “*precisa olhar para dentro do sujeito*” (Newel e Simon, 1972, pp. 55) a partir de dois aspectos fundamentais: (a) nos limites de sua habilidade para determinar o que é um “*comportamento ótimo*”; (b) na sua habilidade para executá-lo, se puder determiná-lo.

O foco modifica-se então do acesso à informação incompleta e à capacidade de aprendizado, para uma perspectiva onde o processo de cálculo do comportamento adequado toma uma importância maior. O modelo modifica-se rumo a um maior realismo. O problema deixa de ser “*(...) finding the right course of action (substantive rationality) to finding a way of calculate what that course of action is (procedural rationality)*”<sup>6</sup> (Simon, 1981, p. 33-34).

O elemento fundamental para esta mudança é o grau de complexidade envolvido no cálculo de soluções ótimas para problemas de maior nível de decisão. Para problemas envolvendo longo prazo, como políticas de investimento, decisões sobre programas de pesquisa e desenvolvimento, políticas de gerenciamento de recursos humanos, por exemplo, a formalização das técnicas da pesquisa operacional, embora possível, “*(...) must discard essential facets of real-world situations, and worse yet, must postulate parameters and variables that cannot be measured.*”<sup>7</sup> (Simon, 1981, p. 36).

O autor aponta então que as barreiras fundamentais para a extensão das técnicas de pesquisa operacional para problemas de nível mais alto de gerenciamento são: incerteza, complexidade computacional e ausência de operacionalidade. Estes três elementos estão associados, na perspectiva de Simon, aos limites da capacidade de

---

<sup>6</sup> “(...) encontrar o curso correto da ação (racionalidade substantiva) para encontrar uma forma de calcular o que este curso de ação é (racionalidade processual)”.

<sup>7</sup> “(...) deve descartar facetas essenciais de situações do mundo real, e ainda pior, deve portular parâmetros e variáveis que não podem ser medidas”.

cognição e processamento dos agentes. Soluções ótimas para estes problemas estão acima das suas capacidades, portanto, como “*What a person cannot do he will not do, no matter how much he wants to do it*”<sup>8</sup> (Simon, 1981, p. 36), os agentes devem achar uma forma de calcular, a um custo computacional razoável, as soluções mais próximas do ótimo que for possível. Então, longe da otimização, inalcançável em um tempo e/ou custo razoáveis, os agentes buscariam soluções *satisfatórias* (*satisficing*) para os problemas.

A idéia de *satisficing* não exclui as dificuldades computacionais para encontrar soluções para problemas econômicos. Simon (1981, p. 43) inclui como dois aspectos mais difíceis de tratar, mesmo com soluções sub-ótimas: a *incerteza em relação a eventos externos*, e, a existência de *expectativas mútuas*. Incerteza está associada a uma série de fontes e de problemas que vão desde presença de imprecisão na informação disponível para o agente econômico até a existência de eventos que alteram fundamentalmente a estrutura do ambiente onde o agente econômico toma decisões. O segundo elemento é a existência de mútuas expectativas. Estas expectativas estão associadas com a construção, pelos agentes econômicos, de algum modelo plausível para a antecipação da trajetória futura do ambiente. O uso de modelos de previsão pelos agentes que considere o comportamento de outros agentes leva a um paradoxo de auto-referencialidade. A superação deste paradoxo na economia real passa, para Simon (1981, p. 46) pela compreensão de que a racionalidade dos agentes é limitada e é isto que faz com que as instituições existam e funcionem.

A abordagem de Sargent para a racionalidade limitada, como vimos, não parece superar os elementos fundamentais da definição de Simon sobre racionalidade substantiva. No entanto, ao assumir a possibilidade de limites no acesso à informação, e a heterogeneidade dos modelos dos agentes econômicos, Sargent abre espaço para a colocação da incerteza como um aspecto fundamental do comportamento e da formação das expectativas dos agentes (Minsky, 1996). Modelar o comportamento dos agentes de uma forma mais plausível, portanto, impõe supor e tratar a presença da incerteza no ambiente onde as decisões são tomadas de maneira descentralizada e a modelagem de agentes com capacidades cognitivas e computacionais limitadas. O ponto de partida para este modelo de agente é a racionalidade processual de Simon.

---

<sup>8</sup> "O que uma pessoa não pode fazer ela não vai fazer, não importa quanto ela queira fazê-lo".



### 3 Racionalidade e Incerteza

Se os agentes econômicos tivessem certeza absoluta sobre o futuro, não haveria sentido de abdicar da aquisição de bens ou serviços, para se guardar moeda. A hipótese que os agentes econômicos conhecem o futuro com certeza absoluta é, não só pouco realística, mas também não consegue estabelecer os determinantes das decisões dos agentes e dar à teoria um maior poder de explicação para estas decisões.

Decisões de investimento, onde se tem escolhas que alterarão significativamente o futuro (a instalação de uma nova máquina, a criação de um novo produto, por exemplo) podem não ser passíveis de repetição. Um exemplo possível, quase paradigmático, é o caso do ambiente operacional *Windows*. Quando a *Microsoft* mostrou à *IBM* o ambiente operacional *Windows*, a *IBM* não viu naquele produto as possibilidades que ele abria para o futuro da computação. A ausência de um acordo de comercialização e a lentidão da *IBM* inverteram a sua posição no mercado de *PC's* de 80% para 20% (Carrol, 1994). O *Windows*, e a transformação produzida no mercado de computadores por ele, são únicos. Um evento crucial alterou profundamente o contexto. Uma companhia quase monopolista no mercado de computadores (*IBM*) perdeu rapidamente sua posição, uma companhia de software (*Microsoft*) se tornou quase monopolista. As transformações produzidas na estrutura do mercado (as posições das duas companhias no mercado de software) e na tecnologia utilizada (de mainframes para *PC's*) não podem ser revertidas sem que se incorra em custos monetários (Carvalho, 1989, pp. 185-187).

Os agentes em uma economia capitalista, porém, não conseguem combinar todos os seus planos de investimento previamente. As decisões de investir e produzir são tomadas a cada instante pelos milhares de agentes em uma economia real sem nenhuma (ou com muito pouca) coordenação ou sincronismo. Não há um leiloeiro walrasiano ou um planejador central para estabelecer os preços e quantidades de bens produzidos e comprados. Num ambiente onde não existe nenhum acordo prévio entre os agentes econômicos para que suas decisões sejam mutuamente consistentes, e onde reverter decisões de investimento implica custos proibitivos, a incerteza e o tempo passam a ter um papel fundamental.

### 3.1 Tempo e Incerteza

Para decisões cruciais, não parece ser possível produzir estimativas exaustivas do risco envolvido. O fato do ambiente ser alterado pelas decisões dos agentes econômicos implica que a experiência passada e as relações entre os fatos ocorridos não são os únicos elementos a serem considerados no seu processo de decisão. As expectativas dos agentes econômicos sobre o futuro são elaboradas com base em sua percepção sobre o estado do mercado e sobre a possibilidade de criar novas alternativas para alcançar seus objetivos. Existe então, uma *dimensão criativa* no processo de tomada de decisão dos agentes que consiste em, mais que a projeção do passado, criar novas alternativas, novas trajetórias no futuro (M. S. Possas, 1995).

Outro fato fundamental sobre a economia capitalista é a presença da moeda. A moeda permite aos agentes econômicos adiarem suas escolhas de gasto, é segurança num ambiente onde o futuro é incerto. E, ao mesmo tempo, a existência da moeda como algo que é mais que um meio de troca, impõe, devido à possibilidade do adiamento das decisões dos agentes, uma incerteza que *é parte da essência teórica do modelo*, já que uma decisão de gasto adiada, não pode ser conhecida por ninguém além do agente que tomou a decisão, mas pode afetar o futuro. O dinheiro (e a possibilidade de guardá-lo) permitem a violação da lei de Say (Shackle, 1991, cap. 9).

Combinando os elementos apresentados aqui, temos:

- a) conhecimento dos agentes sobre a realidade é limitado o que não lhes permite estabelecer qual é a decisão mais adequada (a decisão que maximizaria a sua função objetivo) num determinado momento. Esta limitação pode decorrer tanto da impossibilidade prática do agente ter conhecimento sobre as decisões de todos os agentes, quanto da ausência de *capacidade de processamento do agente* para uma busca exaustiva em todas as possibilidades existentes no processo de tomada de decisão.
- b) Um agente pode tomar decisões que afetem significativamente o futuro, o que modificará as relações entre as variáveis observadas, isto implica no fato que as expectativas do agente sobre o futuro não podem ser baseadas apenas na observação dos eventos passados.

- c) A moeda estabelece a possibilidade dos agentes adiarem a decisão de gasto. E impõe o fato de que, se mudar o estado das expectativas dos agentes, os níveis de produção e investimento mudarão também, independente da trajetória anterior.

A incerteza, porém, não impede os agentes de investirem e produzirem. Dito de outro modo, a incapacidade de prever (probabilisticamente) o futuro não impede os agentes de inventá-lo!

### **3.2 Decisões de Rotina e Incerteza**

Um outro aspecto do processo de tomada de decisão dos agentes é a existência de decisões de rotina. Se a expectativa dos agentes em relação ao mundo é que as condições estabelecidas permaneçam estáveis, então o conhecimento anterior pode permitir aos agentes a certeza estatística necessária para a tomada de decisão com algum grau de certeza sobre o futuro.

Decisões de rotina permitem que os agentes tenham acesso a um grande número de observações sobre o comportamento das variáveis e, portanto, podem ajustá-las a uma distribuição de probabilidade qualquer. O futuro, neste caso, torna-se previsível, embora permaneça algum grau de imprecisão que é determinado pelas limitações do conhecimento dos agentes de todos os fatores relevantes para o seu negócio.

### **3.3 Racionalidade e Incerteza**

A incerteza associada a decisões de rotina é o que podemos chamar de *incerteza substantiva*. Esta incerteza está associada à impossibilidade do agente conhecer todas as variáveis que afetam o seu negócio. O conhecimento que o agente tem do mundo seria *incompleto*, a racionalidade otimizadora seria impossível. O agente porém pode conhecer as distribuições de probabilidade das variáveis relevantes para o seu negócio, portanto, um outro tipo de racionalidade é possível, a *racionalidade substantiva* que permite ao agente, na média, se o universo considerado não mudar, tomar as decisões mais próximas do comportamento otimizador.

Um outro tipo de racionalidade está associado à incapacidade do agente cobrir toda a árvore de possibilidades no processo de tomada de decisão. Isto significa que, mesmo conhecendo todos os dados relevantes, o número de possibilidades que o agente tem que cobrir para estabelecer uma solução ótima para o seu problema excede a sua

capacidade computacional, o que impediria a tomada da melhor decisão. Este tipo de incerteza é chamado de *incerteza processual (procedural uncertainty)*.

É claro, que quanto maior a capacidade computacional que o agente dispõe, melhor a decisão que ele pode tomar. Outro aspecto é que os eventuais erros cometidos no passado, podem permitir ao agente descartar opções que resultaram em perdas ou em desempenhos muito baixos no resultado apurado pelo agente. O agente então, criaria critérios *ad hoc* que permitiriam "*abandonar ramos inteiros da árvore de possibilidades*" (M. S. Possas, 1995, p. 182) melhorando, através do conhecimento dos erros e acertos do passado o seu desempenho. A racionalidade associada a este tipo de atitude é chamada de *racionalidade processual*.

O resultado que o agente busca alcançar, então, não é o máximo da sua função objetivo (ele não tem como encontrá-lo) mas uma posição *satisfatória (satisficing)* em relação ao resultado. Neste caso, é a heurística que vai governar a decisão dos agentes fazendo que estes procurem, aprendendo com os erros do passado, melhorar seus algoritmos e estabelecer as melhores alternativas no futuro.

Um terceiro tipo de incerteza está associado ao fato que colocamos anteriormente das decisões dos agentes alterarem significativamente o futuro. Neste caso, não seria possível construir distribuições de probabilidade com os dados do passado, pois, a decisão do agente modifica estas distribuições. Este tipo de incerteza é chamado por M. S. Possas (1995,p.183, Vercelli,1992) de *incerteza-K*. O passado, na tomada de decisões sob incerteza-K, tem um peso relativo menor. Os agentes estabelecem as suas decisões levando em conta, mais a sua expectativa sobre o futuro e o grau de confiança que têm nas suas expectativas, que o que ocorreu anteriormente. Em particular, o investimento, é uma decisão onde o comportamento futuro das variáveis tem importância.

### 3.4 Conceitos de Incerteza e Imprecisão dentro da Economia

As noções de incerteza/imprecisão são resumidas na Tabela 1.

Tipo de Incerteza/Imprecisão	Condições	Modelo	Observações
Ausência de Incerteza	Conhecimento pleno das variáveis	maximização da função objetivo sob condições de restrição (Neoclássico)	
Incerteza Substantiva (Imprecisão/Incompletude)	Conhecimento das distribuições de probabilidade das variáveis	maximização da função objetivo sob condições de restrição com conhecimento das distribuições de probabilidade das variáveis (Expectativas Racionais – Racionalidade Substantiva)	A maximização é permitida devido ao conhecimento da distribuição de probabilidade das variáveis, todo o conjunto de probabilidades pode ser coberto
Incerteza Processual (Complexidade)	Excessiva complexidade, acima da <i>capacidade de processamento</i> dos agentes	Heurística para achar a solução mais próxima do máximo que for possível. (Racionalidade Processual)	A incerteza processual corresponde à <i>dimensão adaptativa</i> do comportamento dos agentes.
Incerteza-K (Não-Ergodicidade)	Um evento pode alterar significativamente o ambiente, as estratégias e expectativas dos outros agentes.	Expectativas formuladas com um grau de crença. Decisões tomadas considerando maior confiança nas expectativas e maior benefício esperado.	Os agentes estabelecem as suas expectativas com um determinado <i>grau de confiança</i> as expectativas não são nem aditivas nem complementares

Tabela 1 - Tipos, condições e modelos para a incerteza

#### 3.4.1 Ausência de Incerteza

O primeiro modelo é o chamado modelo neoclássico, que presume que o agente tem pleno conhecimento das variáveis e maximiza uma função objetivo. As restrições são dadas pelo nível da técnica, orçamento, disponibilidade de insumos, etc. O tempo não existe neste modelo, nem é presumido qualquer processo de aprendizado (o agente sabe tudo). Uma decisão individual de compra ou produção não influencia o preço do produto. Não existem decisões cruciais.

#### 3.4.2 Incerteza Substantiva

Esta incerteza está associada à incapacidade de conhecimento de todas as variáveis do ambiente. O agente conhece as distribuições de probabilidade das variáveis. A média dos eventos no tempo vai convergir, para um número significativo de observações. O tipo de incerteza associado a este modelo é a imprecisão/incompletude (M. L. Possas, 1995, Vercelli, 1992, M. S. Possas, 1995).

### 3.4.3 Incerteza Processual

A incerteza processual, como já colocamos, deriva do fato que os agentes não têm condições de fazer uma busca exaustiva para achar a solução ótima. Problemas que envolvem estratégias com um grande número de elementos e uma projeção do comportamento futuro do sistema (como um jogo de xadrez), geralmente vão ter um conjunto de alternativas enorme que os agentes descartam via algum processo heurístico e tratam a busca apenas num número pequeno soluções possíveis (Simon, 1981, Vercelli, 1992)

Os agentes buscam durante o processo adaptar seus algoritmos selecionando aqueles que tiveram melhor desempenho. A incerteza processual, portanto, corresponde à *dimensão adaptativa* do comportamento dos agentes (M. S. Possas, 1995).

### 3.4.4 Incerteza-K

Na incerteza-K os agentes econômicos estabelecem as suas expectativas com um determinado *grau de confiança* as expectativas não são aditivas, i.e. como o agente não pode ter certeza se suas expectativas estão corretas ele toma suas decisões considerando dois elementos fundamentais (Keynes, 1936/1985, p. 110) :

- a) O *grau de possibilidade* do melhor prognóstico do agente ser falso;
- b) O *nível de impacto* de situações adversas sobre o seu negócio;

Quando o agente considera o grau de possibilidade do seu prognóstico se revelar falso, ele estabelece alguma medida do nível de confiança na ocorrência de cada situação esperada. O agente vai necessariamente trabalhar com *um conjunto de situações possíveis*. Estas situações, mesmo se tivermos pensando na racionalidade substantiva, não podem ser conhecidas completamente. Mesmo que o agente conheça todas as distribuições de probabilidade das variáveis, ele não tem como conhecer todos os planos dos agentes que têm alguma relação com ele no mercado (fornecedores, consumidores, banco central, etc.). A existência da moeda e a preferência pela liquidez permitem aos agentes, caso as expectativas sejam modificadas, o adiamento das decisões de gasto. Alterações estruturais como inovações tecnológicas também imporão modificações importantes nas expectativas de longo prazo. Isto nos permite concluir que a decisão de gasto, vai estar mais associada com o estado das expectativas do que com a história do sistema.

O agente também vai considerar o nível de impacto de situações adversas, i.e. vai avaliar os piores prognósticos, o grau de confiança que ele tem nestes prognósticos e decidir o nível de gastos que vai efetuar (ou mesmo se vai efetuar algum gasto).

As possibilidades que o agente vai considerar no processo de tomada de decisão *não vão ser exaustivas*, vão ser apenas as em que o agente tem maior grau de confiança na sua ocorrência, escolhidas entre as que lhe dão maior nível de ganho e têm menor chance de produzir prejuízo.

Aqui podemos ver que incerteza e racionalidade estão intrinsecamente ligadas. A complexidade do ambiente, que leva a custos de deliberação inviáveis, impõe ao agente econômico encontrar formas de tomar decisão que sejam suficientemente eficientes para que o processo de deliberação não gaste um tempo excessivo e suficientemente eficazes para que os resultados alcançados sejam satisfatórios (M. S. Possas, 1995). Isto significa que, em vez de procedimentos de maximização, que tentem encontrar soluções ótimas inalcançáveis, os agentes econômicos utilizam outro tipo de procedimento onde as soluções são menos que ótimas mas encontradas no tempo necessário para a tomada de decisão.

Um segundo elemento deste processo é a possibilidade de transformação estrutural, devido à *não-ergodicidade*<sup>9</sup> do ambiente (Davidson, 1991). Se a validade das probabilidades associadas a um evento futuro possível não pode ser verificada, o agente precisa usar algum modelo de expectativas onde o *grau de crença* sobre o futuro possível entre no cálculo. Este modelo de formação de expectativas não é novo. Sua discussão foi estabelecida de maneira fundamental por Keynes.

---

<sup>9</sup> Diz-se de um sistema ser *ergódico* quando mudanças numa seqüência de experimentos não afetam as medidas de probabilidade destes experimentos, considerando um tempo significativamente grande. O teorema ergódico coloca que, se o espaço de probabilidades não muda, uma transformação no tempo não afeta a medida de probabilidade de um evento. Uma discussão mais completa sobre este teorema pode ser encontrada em Billingsley (1965) e Wong (1971).

## 4 Expectativas

Em economia, as decisões sobre produção e investimento são sempre tomadas a partir da expectativa sobre algum ganho futuro. Um empresário, ao decidir sobre uma determinada quantidade de bens a ser produzida por sua indústria, não tem, normalmente, nenhuma garantia de que suas expectativas serão satisfeitas. Quando o alvo das decisões é o investimento (aquisição de novos equipamentos, construções, etc.), a incerteza associada a este processo é ainda maior, pois as suas expectativas estão ligadas à renda futura do investimento. Esta *renda futura esperada* se realizará em muitos períodos de produção. Neste caso, quanto mais distante no futuro a renda está, mais incerto o empresário também estará sobre a viabilidade do seu investimento (Chick, 1993, 128-136).

Um autor que deu um tratamento fundamental à questão das expectativas sob condições de incerteza foi Keynes (Shackle, 1991). O modelo de agente econômico artificial desenvolvido neste trabalho (Modelo Proposto) está baseado fundamentalmente nas idéias de Keynes.

### 4.1 Expectativas e Probabilidade

O desenvolvimento teórico de Keynes sobre a questão da incerteza data de “*A Treatise on Probability*”. Neste trabalho, expõe a sua visão da probabilidade (e da formação das expectativas dos agentes) como uma “*lógica das crenças parciais*” (McCain, 1987). Em seu capítulo 26 do *Treatise on Probability* (1921/1973) Keynes apresenta sua visão sobre como a probabilidade, ação e tempo que, se interrelacionam. É possível ver neste texto como esta perspectiva supera os axiomas da teoria da probabilidade em seu tempo. Apesar da complexidade, desta perspectiva, a sua visão sobre probabilidade vai produzir fecundas influências em Shackle (1955). Esta perspectiva não chega, porém, a ser plenamente desenvolvida, mas os seus elementos podem ser vistos na lógica de conhecimento e crença e na teoria das possibilidades. A *quase-definição* é:

“Given as our basis what knowledge we actually have, the probable, I have said, is that which it is rational for us to believe. This is not a definition. For it is not rational for us to believe that the probable is true; it is only rational to have a probable belief in it or to believe it in preference to alternative beliefs. To believe one thing *in preference* to another, as distinct from believing the first true or more probable and the second false or less probable, must have a



reference to action and must be a loose way of expressing the property of acting on one hypothesis rather than another.” (p. 339)<sup>10</sup>.

*Crença racional*, então, não corresponde a um valor verdadeiro ou falso, mas a um *valor de verdade parcial*, em preferência a um conjunto de outros valores possíveis. Mais ainda, “(...) *the probable is the hypothesis on which it is rational for us to act*”, i.e. *provável*, em Keynes, está associado a algum grau de satisfação (utilidade, lucro, etc.) que o agente econômico espera obter com a ação que ele efetuar. O *agente econômico keynesiano* toma suas decisões ponderando as várias alternativas de ação que estão ao seu alcance, formulando expectativas sobre a satisfação que espera obter. Estas expectativas não são mutuamente exclusivas, i. e. caso o agente tenha um valor para cada possibilidade (definida de 0 a 1), a somatória de todas as possibilidades pode ser maior que 1.

Esta aparente inconsistência entre a descrição de Keynes de crença racional e a teoria das probabilidades já refletia sua percepção de que a racionalidade humana, na presença de situações de incerteza-K, produz decisões onde o resultado não tem garantia nenhuma de maximização. Os agentes econômicos keynesianos, aproximam-se, então dos agentes com racionalidade limitada de Simon, sendo que, para o segundo (Simon) a incerteza está associada à incapacidade de calcular todas as possibilidades e conseqüências das ações, enquanto para Keynes os agentes constroem as expectativas por algum procedimento convencional e agem no sentido do maior ganho esperado (Shackle, 1991, p.145).

## **4.2 Expectativas de Curto e Longo Prazos**

Keynes (1936/1985) considera explicitamente a definição das expectativas apenas em relação ao produtores, Chick (1993, pp. 22-23) considera, porém, que a mesma distinção feita por Keynes do papel das expectativas na tomada de decisão sobre produção pode ser usada para a formulação das expectativas dos consumidores. Neste trabalho se considerará apenas a análise feita por Keynes para as expectativas dos produtores.

Keynes estabelece dois tipos de expectativas no seu modelo (Keynes, 1936/1985, cap. 5, p. 43): as *expectativas de curto prazo (ecp)* que “*relaciona(m)se com o preço que um fabricante pode esperar obter pela sua produção 'acabada', no momento em que se compromete a iniciar o processo de produção (...)*” e as *expectativas de longo*

---

<sup>10</sup> Dado como base o conhecimento que realmente temos, o provável, pode-se dizer, é aquilo em que é racional para nós acreditar. Isto não é uma definição. Não é racional para nós crer que o provável é verdadeiro; é somente racional ter uma crença provável nele em preferência a crenças alternativas. Acreditar em alguma coisa *em preferência* a outra é distinto

*prazo (elp)* que "refere(m)-se ao que o empresário pode esperar ganhar sob a forma de rendimentos futuros, no caso de comprar (ou talvez manufaturar) produtos 'acabados' para os adicionar a seu equipamento de capital". Esta distinção feita entre *ecp* e *elp* é, segundo Chick (1993, pp.21-21), teórica e deve ser vista mais como "um instrumento intelectual" do que como uma constatação empírica. No dia-a-dia dos agentes econômicos, tanto o estoque de capital (máquinas e equipamentos) quanto os níveis de produção estão sendo alterados continuamente, os agentes econômicos estão tomando suas decisões sobre produção e investimento de forma completamente distribuída e não coordenada. A distinção sobre expectativas de curto e longo prazo, porém, pode ser compreendida teoricamente associada a duas visões:

- a) A alteração das possibilidades de produção. Como em Marshall (1985), curto prazo está associado a *funções de produção* dadas. As alterações no produto são o resultado de diversas combinações possíveis dos *fatores de produção*. O estoque de capital, neste caso, é dado. O longo prazo, por outro lado, supõe a variação do estoque de capital, isto é: a existência de *investimento e depreciação*. Portanto, as *possibilidades de produção* (i. e. o uso ótimo dos fatores de produção) variam no longo prazo.
- b) Diferentes horizontes de expectativas determinam o segundo significado de curto e longo prazo. As decisões de curto prazo estão associadas na estimativa de demanda futura referente a um único período de produção. Já as decisões de longo prazo estão associadas a um prazo onde vários períodos de produção devem ser considerados.

Pode ser dito, então, que decisões de produção consideram expectativas de curto prazo e decisões de investimento consideram expectativas de longo prazo.

### **4.3 Expectativas, Tempo e Incerteza**

Estabelecida a distinção entre *ecp* e *elp*, pode-se avaliar quais os outros elementos do processo de formação das expectativas. Um primeiro elemento é o tempo para revisão das expectativas dos produtores. Este tempo está condicionado ao período de produção. Keynes chama este período de *unidade efetiva mínima do tempo econômico* (Keynes, 1936/1985, p.43), i.e. entre dois períodos de produção os produtores revisam suas

---

de acreditar que a primeira é verdadeira ou mais provável e a segunda, falsa ou menos provável, deve-se ter uma referência à ação e deve ser uma forma fraca de expressar a propriedade de *agir* em uma hipótese em vez de outra.

decisões de gasto. Isto significa que a revisão das expectativas das empresas (de curto ou longo prazo) tem um efeito sobre a demanda agregada que só se efetiva completamente, no mínimo, após um lapso de tempo necessário para que todas as empresas cheguem ao próximo período de produção, mesmo que não aconteçam novas mudanças nas expectativas.

Outro elemento é que a tomada de decisão de gasto (na produção ou investimento) se dá antes da realização do processo de produção, i. e. antes que os produtores auferam qualquer renda associada àqueles gastos. Ora, se a realização da produção (ou o retorno dos investimentos) está no futuro, não há como superar a incerteza associada à possibilidade de erros sobre as estimativas de demanda. Mesmo supondo um ambiente *estacionário* (Chick, 1993, p. 26) as *ecp* para os produtores podem ser frustradas por variações aleatórias na oferta ou demanda. Outro elemento que associa a noção de incerteza ao processo de formação de *ecp* e *elp* é a racionalidade limitada dos produtores. Mesmo supondo o acesso a todas as informações relevantes à tomada de decisão sobre produção e/ ou investimento, os produtores não tem como calcular todas as possibilidades de ação. Neste caso, os agentes econômicos se encontram na presença de *incerteza processual* o que pode levar à frustração de expectativas ainda que o ambiente não se altere.

Um último elemento é a *especificidade* das variáveis utilizadas para a tomada de decisão no curto e no longo prazos (Chick, 1993, p.27; Keynes, 1936/1985, p. 45). Expectativas de curto prazo são mais específicas. Decisões de curto prazo podem basear-se em variáveis como custo de produção e volume de vendas. Estas variáveis podem ser conhecidas com certeza e ser reavaliadas a cada período produtivo. A decisão sobre produção, neste sentido, pode ser considerada uma *decisão de rotina*. Decisões de longo prazo, dificilmente podem ser efetivadas considerando tal especificidade. Embora os fatos observados no passado sejam relevantes para a tomada de decisão sobre o longo prazo e conhecidos com razoável grau de *certeza* (ou seja, baixo grau de imprecisão), as decisões de longo prazo têm sua realização (i. e. a aferição de renda sobre determinado investimento) em sucessivos períodos no futuro. Estes *eventos futuros*, vão ser previstos, então, com um grau maior ou menor de *confiança* (Keynes, 1936/1985, p. 108).

Keynes diferencia *grau de certeza* e *grau de confiança* no seu modelo de formação das expectativas de longo prazo. *Grau de certeza*, está associado à maior ou menor precisão no conhecimento das variáveis relevantes. *Grau de confiança* está

associado à capacidade do agente de *antecipar* mudanças que afetarão seu negócio. O *grau de confiança*, então, será, tanto menor quanto maiores forem as mudanças esperadas no ambiente econômico ou quanto menos seguros estamos da forma que estas mudanças poderão tomar (Keynes,1936/1985, p. 110).

Na presença de incerteza-K os agentes têm ainda mais possibilidade de ter frustradas as suas expectativas sobre a realização da produção em períodos futuros. Transformações como alterações no grau de monopólio e inovações podem ocorrer no ambiente econômico após a tomada de decisão de investimento dos agentes econômicos. Decisões de investimento não são reversíveis, não podem ser revisadas no próximo período de produção, essa irreversibilidade, associada ao fato que o ambiente pode ser modificado por uma decisão deste tipo é o que dá à incerteza-K a sua importância e torna este tipo de decisão *crucial* (M. S. Possas, 1995, p 183).

A incerteza processual, porém, já é condição suficiente para que os agentes tenham suas expectativas frustradas. A incapacidade dos agentes de processar todas as trajetórias possíveis para as variáveis econômicas relevantes já leva a uma antecipação do futuro que embute algum grau de confiança.

Expectativas vagas também são consideradas em decisões de produção e consumo. Estas decisões são tomadas com base em uma previsão do comportamento futuro dos agentes que contém incerteza, seja ela determinada pela incapacidade do agente de descobrir todas as variáveis que influenciam seu comportamento, seja pela incapacidade do agente processar todas as alternativas possíveis.

## 5 Agentes Antecipatórios e Simulação

A noção de agente tem suscitado uma grande controvérsia na literatura recente sobre inteligência artificial (IA). Diversos autores tem produzido trabalhos cujo objetivo é dar uma definição e estabelecer classificações para os diversos tipos de agentes existentes. Estas classificações tem se caracterizado por sua diversidade e parcialidade. Por diversidade deve-se entender que os autores têm produzido um conjunto muito grande de classificações diferentes. Estas classificações têm se caracterizado como tipificações que são produzidas de acordo com um conjunto de características que os autores estabelecem. Estas características são determinadas a partir de critérios associados principalmente com as características e objetivos do trabalho dos autores.

Uma resenha exaustiva das classificações e definições de agente, mapeando as fontes de controvérsia e buscando uma definição (e, conseqüentemente, uma classificação) completa e genérica de agentes é um trabalho da teoria de agentes. Este desenvolvimento, porém, suplanta o escopo deste trabalho de dissertação. A definição que desenvolveremos aqui terá como objetivo delimitar o conceito de agente ao campo da simulação computacional, portanto, nossa definição será orientada pela sua aplicabilidade.

### 5.1 Definições de Agente

Agentes, na definição de D. Dennet são sistemas intencionais que são os sistemas "*whose behavior can be predicted by the method of attributing belief, desires and rational acumen*"<sup>11</sup> (Dennet, 1987).

Um sistema intencional pode ser de primeira ou de segunda ordem. Um sistema intencional de primeira ordem tem crenças e desejos mas não tem crenças e desejos sobre crenças e desejos. Já os sistemas intencionais de segunda ordem tem crenças e desejos sobre suas crenças e desejos e sobre as de outros agentes. Agentes econômicos reais, tomando decisões em um mercado oligopolizado, por exemplo, podem ser qualificados como sistemas intencionais de segunda ordem.

A noção de postura intencional, longe de ser um simples antropomorfismo, é um elemento útil para aplicar na modelagem de sistemas de que não se conhece completamente a estrutura. Ser um sistema intencional parece ser condição necessária (embora não suficiente) para definir um agente. Noções intencionais seriam então

---

<sup>11</sup> "Cujo comportamento pode ser previsto pelo método de atribuir-se (ao sistema) crenças, desejos e agudeza racional".

ferramentas de abstração que permitem “*a convenient and familiar way of describing explaining, and predicting the behavior of complex systems*”<sup>12</sup> (Woldridge & Jennings, 1995, p.9).

Uma resenha fundamental sobre teorias, arquiteturas e linguagens de agentes é a de Wooldridge e Jennings (1995). Neste trabalho os autores estabelecem uma das noções de agentes que talvez seja a mais citada por outros autores no campo da IA. Esta noção está baseada nas características que um sistema computacional de *software* e/ou *hardware* deve ter para ser chamado *agente*. Os autores propõem uma noção *fraca* e uma noção *forte* de agentes. Na noção *fraca* listam as seguintes características: *Reatividade* consiste em perceber o ambiente e responder de maneira oportuna (*timely fashion*) a mudanças que acontecerem nele; *autonomia* é a capacidade de operar sem intervenção direta de humanos ou outros e ter alguma espécie de controle sobre suas ações e estado interno; *habilidade social* é a capacidade de interagir com outros agentes via algum tipo de linguagem de comunicação de agentes; *pró-atividade* é a capacidade de exibir comportamentos baseados em objetivos. Em uma noção *mais forte* são atribuídas algumas outras características como conhecimento, crença, intenção e obrigação e também estados emocionais. Alguns tipos de agentes também, teriam características antropomórficas.

Franklin & Graessser (1996) produziram um trabalho que suscitou bastante polêmica, tanto nas listas de discussão especializadas em agentes quanto no congresso onde o trabalho foi apresentado. Neste trabalho os autores procuram dar resposta a duas questões fundamentais. A primeira é uma definição formal abrangente de *Agente*; a segunda é estabelecer a possibilidade de uma classificação uniforme dos agentes (o que os autores chamam de uma *taxonomia* dos agentes). Para responder à primeira questão, são listados pelos autores várias definições de agente e se percebe que a palavra agente tem dois usos mais comuns:

- a) Quem age ou pode agir;
- b) Quem age em lugar de outro com permissão.

(Nota-se que a segunda definição depende logicamente da primeira)

Outro elemento listado pelos autores para produzir uma definição abrangente de agentes é que estes são *situados* e são parte de um ambiente. As percepções e ações dos agentes são determinadas e controladas por eles mesmos. Os agentes também agem todo o

---

<sup>12</sup> "Uma maneira conveniente e familiar de explicar e prever o comportamento de sistemas complexos".

tempo. A partir destes requisitos os autores chegam à seguinte definição de agente autônomo (Franklin & Graesser, 1996):

"An autonomous agent is a system situated within and a part of an environment that senses that environment and acts on it, over time, in pursuit of its own agenda and so as to effect what it senses in the future."<sup>13</sup>

Os autores, seguindo a sua definição de agente, concluem que um termostato pode ser definido como tal. Já um robô incapaz de perceber o ambiente não seria classificado como um agente por esta definição. Um corretor ortográfico, disparado a partir de um processador de texto, também não seria um agente. Já um corretor ortográfico que corrigisse o texto durante o processo de digitação poderia ser classificado como um agente.

Esta definição recebeu algumas críticas que foram apresentadas no ATAL'96 (*Agent Theories, Architectures and Languages*), listaremos aqui os principais elementos das críticas. Castelfranchi (1996) observa que, para a construção de uma definição consistente de agente é necessário estabelecer a visão de *fechamento circular* (*circular closure*) entre o agente e o ambiente e que a definição de Franklin & Graesser confunde este conceito com realimentação do ambiente.

Wooldridge (1996) coloca que a definição de Franklin & Graesser é incompleta segundo sua própria definição de agente. O autor coloca que três características necessárias não existem na definição de agente de Franklin & Graesser:

- a) *autonomia*, que seria a capacidade de tomar decisões independentes sem ser guiado por outros agentes ou pessoas;
- b) *reatividade*, que é um comportamento desejável dos agentes. Estabelecer a integração consistente entre o comportamento reativo e comportamento pró-ativo é um campo de pesquisa importante da implementação de agentes. Esta integração parece levar a modelos mais consistentes de agentes artificiais, especialmente quando estes estão inseridos em situações de tempo real, onde processos deliberativos mais complexos nem sempre podem ser executados em tempo hábil;
- c) *habilidade social*, que é uma necessidade prática para a realização do potencial mais importante da pesquisa de agentes: os sistemas multiagentes. Na maior parte das implementações de agentes a necessidade de

---

<sup>13</sup> "Um agente autônomo é um sistema situado em e uma parte de um ambiente que percebe aquele ambiente e atua nele, em função do tempo, buscando executar sua própria agenda e considerando como ela afeta o que ele percebe no futuro"

comunicação e cooperação (ou mesmo concorrência – num sentido econômico) é um componente que permite a modelagem de sistemas com capacidade suficiente para solucionar problemas complexos.

Um agente para simulação pode ter uma estrutura mais simples que um agente para a inteligência artificial distribuída (IAD). Alguns componentes das definições usuais da IAD podem, porém, ser incorporados a uma definição de agente para simulação econômica. Estes componentes são: *inserção social* (*social situatedness*) - um agente está necessariamente inserido no ambiente e interage com outros agentes e este é um componente determinante de seu comportamento; *racionalidade limitada* – a limitação da *capacidade de processamento* ou a *incompletude* e/ou *imprecisão* na percepção do ambiente são um elemento fundamental na elaboração de um agente para simulação econômica; *antecipação* - um agente econômico simulado age em função de suas *expectativas* em relação aos futuros estados do mundo e da alteração que suas *ações* poderão produzir nos estados futuros do mundo; *satisfação* – existe uma relação entre os estados do mundo e o grau de *satisfação* que um agente pode ter. O agente econômico tomará suas decisões buscando provocar (ou encontrar) os estados do mundo onde seu grau de satisfação seja maior. Esta relação entre estados do mundo e graus de satisfação do agente é geralmente representada na teoria econômica como uma *função utilidade*.

Estes componentes da definição de um agente para simulação serão discutidos com mais detalhes adiante. Antes disso, porém, deve-se detalhar um elemento fundamental para estabelecer uma definição de agente para simulação econômica: a noção de *antecipação*. É preciso também, estabelecer qual a conexão entre a noção de antecipação e a de expectativas (cap. 4).

## **5.2 Sistemas Antecipatórios**

A noção de expectativas foi posta por Keynes (1936/1985) como o elemento fundamental na tomada de decisão sobre produção, consumo e investimento. A elaboração de modelos consistentes sobre o comportamento econômico tem como condição necessária a construção de modelos onde o processo de formação de expectativas seja explicitado de alguma maneira. A tentativa mais bem sucedida para este tipo de modelo são as expectativas racionais. Vimos que modelos de expectativas racionais, embora formalmente elegantes, são extremamente restritivos na descrição do comportamento dos agentes. A solução para este dilema parece estar na visão de racionalidade limitada proposta por



Simon (1981). A noção de racionalidade limitada, porém, não implica nenhum modelo específico de formação de expectativas.

Uma formulação possível para um modelo de formação de expectativas formalmente consistente e, computacionalmente implementável é a idéia de R. Rosen de *sistema antecipatório*. As idéias fundamentais sobre sistemas antecipatórios foram desenvolvidas por Rosen em 1972 quando este era pesquisador visitante no *Center for the Study of Democratic Institutions*, em Santa Bárbara, Califórnia. As idéias sobre sistemas antecipatórios surgiram da sua percepção que em todos os processos de planejamento e formulação de política havia a presença de mecanismos de previsão do futuro e da tentativa de *planejá-lo* (Rosen, 1985, p.6).

Um sistema antecipatório é definido por Rosen como:

“... a system containing a predictive model of itself and/or of its environment, which allows it to change state at an instant in accord with the model's predictions pertaining to a latter instant” (Rosen, 1985, p.339).<sup>14</sup>

Rosen (1985, pp.12-15) define um contexto restritivo para o seu sistema antecipatório de forma a melhor modelá-lo. Este contexto contém os seguintes componentes

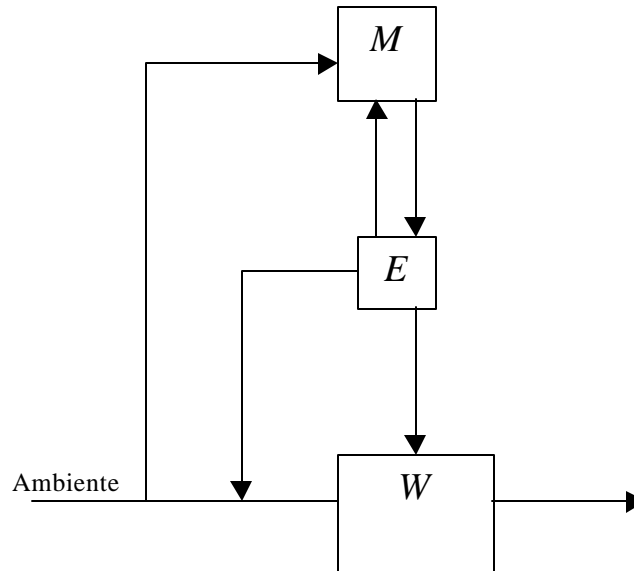
- a) Um dado sistema  $W$ <sup>15</sup>, que pode ser um “*indivíduo, um organismo ou sistema social ou econômico*”.  $W$  é chamado *sistema objeto* e suposto como um sistema não-antecipatório (ou *ordinário*).
- b) Um sistema dinâmico  $M$ , associado a  $W$ , sendo um  $M$  um *modelo* de  $W$ . O modelo deve *prever* o valor de  $W$  em um determinado instante de tempo. Portanto,  $M$  deve, de alguma forma encontrar mais rapidamente (que  $W$ ) o valor futuro de  $W$ .
- c)  $M$  e  $W$  estão acoplados. Isto é os dois sistemas vão interagir de maneira específica. Uma forma de interação é a possibilidade alteração das propriedades dinâmicas de  $W$  através de um conjunto de *atuadores E*.

---

<sup>14</sup> “... um sistema contendo um modelo preditivo de si mesmo e/ou seu ambiente, que lhe permite o estado em um instante de acordo com as previsões do modelo pertencentes a um instante anterior”

<sup>15</sup> Rosen chama o sistema-objeto de  $S$ . A letra  $W$  é utilizada neste trabalho para representar o sistema objeto, tendo em vista a notação usada em Rivero, Storb e Wazlawick (1998).

Graficamente, Rosen representa este sistema como:



**Figura 1 - Um Agente Antecipatório (Rosen, 1985)**

Neste modelo as setas representam alterações no estado de cada componente. Algumas outras características importantes são citadas por Rosen em seu modelo simplificado de um sistema antecipatório. Em primeiro lugar, caso  $M$  não seja um modelo perfeito de  $W$ , o sistema pode ser considerado quase-antecipatório. Para um mesmo estado de  $W$ , pode-se escolher diversas *trajetórias possíveis* para o modelo. Portanto, a escolha de um modelo de mundo estabelece qual a trajetória que este modelo vai prever. Estas trajetórias podem ser mais ou menos consistentes com os dados observados do ambiente.

Existem regiões *desejáveis* e *indesejáveis* em  $W$ . Que são definidas por alguma restrição dada pelo *agente*. Estas restrições que deverão compor o mecanismo que leva o agente a efetuar *ações* através do seu conjunto de atuadores ( $E$ ) sobre o sistema  $W$ .

As ações de  $E$  afetam  $W$  e também afetam  $M$ . Para que  $M$  seja um modelo preditivo consistente, as ações efetivadas sobre  $W$  devem produzir resultados equivalentes também em  $M$ .

$W$  é um *componente* do ambiente, ligado ao *agente* mas  $W$  interage com o ambiente de várias formas. Os mesmos efeitos em  $M$  podem ser dados por vários tipos de estruturas. Ou seja,  $M$  pode eventualmente estabelecer alguma trajetória possível para  $W$ , que seja consistente com os valores observados (uma relação funcional qualquer) mas inconsistentes com a trajetória observada no próximo instante.

O modelo  $M$  é necessariamente menor que  $W$  e não capta todas as interações de  $W$ . Presumimos, portanto que  $M$  é incompleto. Esta incompletude leva a erros de previsão. Além disso, mapear todas as interações possíveis de  $W$  que afetem o agente pode ser computacionalmente inviável.

A incompletude do modelo de mundo do agente e a dificuldade computacional aludidas por Rosen na sua definição da relação de modelagem, remetem diretamente à noção de racionalidade limitada de Simon. Estas conexões não parecem ser resultado do desenvolvimento de idéias associadas ao estudo, pelos dois autores, do mesmo problema, o comportamento de sistemas em ambientes dinâmicos complexos.

Rivero, Storb e Wazlawick (1998, pp. 65-66) modelam um sistema antecipatório como um sistema que terá um modelo de mundo associado com a trajetória passada e com uma expectativa de uma trajetória futura num dado intervalo de previsão. Formalmente, temos:

$$m_t = f_t(m_1, m_2, \dots, m_{t-1}, \hat{m}_t^t, \hat{m}_{t+1}^t, \dots, \hat{m}_{t+k(t)}^t) \quad (1)$$

onde:

- $m_s, 1 \leq s < t$ , é o estado do sistema no tempo  $s$ ;
- $\hat{m}_s^t, t \leq s \leq t+k(t)$ , é uma previsão de  $w_s$  feita ao tempo  $t$ ;
- $k(t)$  é o tamanho do intervalo de previsão ao tempo  $t$ ;
- $f_s$ , representa a dependência funcional, conhecida pelo agente em  $s$ , entre o passado observado, o estado presente e o futuro esperado. Esta dependência funcional, por questão de simplicidade está aqui associada ao tempo. Porém os seus determinantes vão muito além do tempo. Podemos dizer que  $f_s$  pertence a uma família de funções que vai variar com o tempo, o conhecimento dos agentes sobre as variáveis do ambiente, a capacidade de memória, a capacidade de processamento do agente, etc.

Esta maneira de formular as expectativas do agente caminha no sentido de superar a noção mecanicista das formulações onde o estado atual do mundo depende apenas do passado. Esta formulação, porém, impõe uma complexidade muito maior aos modelos de mundo implementados, visto que, além da relação entre o passado observado e o presente, tem-se o futuro esperado como um componente do modelo. A determinação de

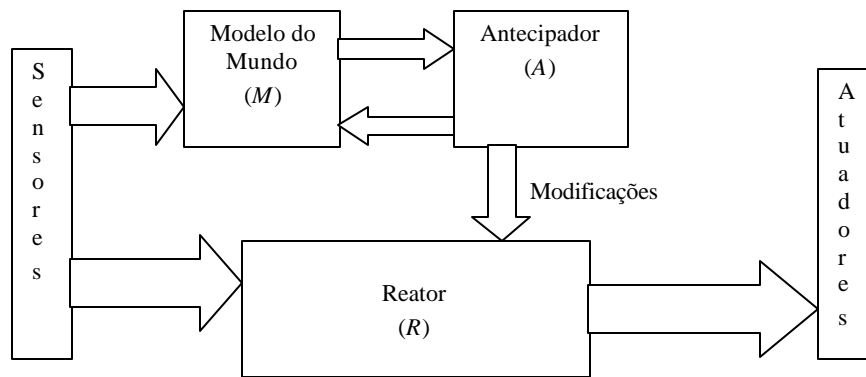
soluções analíticas neste tipo de modelo é extremamente difícil, uma solução para este problema pode ser a sua implementação computacional. Esta implementação pode usar como um instrumento para teste deste tipo de modelo a abordagem da inteligência artificial (IA). Esta abordagem evita inicialmente a complexidade de formulações analíticas. Com ela, é possível a elaboração de experimentos considerando o comportamento dos agentes antecipatórios de uma maneira menos idealizada.

A uso da idéia de *agentes* para a implementação de sistemas antecipatórios não substitui o desenvolvimento de modelos analíticos. Mas a simulação computacional destes modelos pode ampliar o conhecimento sobre as suas propriedades de forma que possa se alcançar o desenvolvimento de modelos analíticos mais apropriados. Este tipo de abordagem (implementação computacional de sistemas antecipatórios), é objeto dos trabalhos de Ekdahl (1998), Davidsson (1996), Ekdahl, Astor & Davidsson (1994).

### **5.3 Uma Implementação de Agentes Antecipatórios**

Em sua tese de doutorado Davidsson (1996) sugere um *framework* para a implementação de agentes antecipatórios. Esta estrutura já vinha sendo desenvolvida desde 1994 juntamente com Ekdahl e Astor. O modelo implementado por Davidsson, Ekdahl e Astor é composto principalmente por três *entidades* (Davidsson, 1996, p. 32-33):

- a) um sistema objeto (*W*). Considerado como um sistema dinâmico ordinário (não antecipatório). *W* é algum tipo de *sistema reativo*, sendo chamado pelos autores de *reator*;
- b) um modelo do mundo (*M*). Que é uma descrição do ambiente incluindo *W*;
- c) um *componente de meta-nível* correspondendo ao que os autores chamam de *antecipador*. Este antecipador não está incluído em *M*. O antecipador pode fazer previsões utilizando *M* e utilizar estas previsões para transformar as propriedades dinâmicas de *W*, deve produzir suas previsões mais rápido que o tempo real.



**Figura 2 - Uma Implementação de Agente Antecipatório (Davidsson, 1996)**

O componente mais complexo deste modelo é o antecipador. É papel do antecipador fazer previsões sobre a trajetória (ou trajetórias) possíveis do mundo e comparar situações observadas e situações previstas de forma a verificar a eficácia da ação do reator e decidir quando e como produzir modificações nas regras do reator. Este *meta-nível* (conhecimento sobre como alterar as regras de maneira eficiente) parece se adequar à visão de Simon sobre *racionalidade processual*, o antecipador procuraria calcular qual a transformação necessária do curso da ação para que o agente se mantivesse o mais próximo possível de sua meta.<sup>16</sup>

As restrições de tomar decisão no tempo real também impõem considerar as limitações de capacidade do agente levando assim ao requisito de implementar tanto o antecipador como o reator com graus de eficiência suficientes para uma tomada de decisão adequada. Este requisito de eficiência, porém, restringe a possibilidade de tomadas de decisão ótimas, pois elas provavelmente tomariam um tempo maior que o disponível para o agente. O agente então, buscaria uma posição *satisfatória*, a partir de algum critério estabelecido (uma meta, ou conjunto de metas, para Davidsson).

O comportamento deste agente é o seguinte:

- a) Os sensores recebem entradas do ambiente. Estas entradas estimulam o reator e, paralelamente atualizam o modelo do mundo;
- b) O reator, a partir dos estímulos do ambiente toma uma decisão manda uma resposta (alguma ação) para os atuadores;
- c) Em paralelo a (b), o antecipador usa o modelo do mundo para fazer suas previsões e decide *se e quais* propriedades dinâmicas do reator devem ser

<sup>16</sup> Vimos que esta *meta*, no modelo de sistema antecipatório proposto por Rosen (1985, p.14), corresponde a uma *região desejável* que é estabelecida pelo agente.

modificadas. Cada vez que o reator é modificado, o antecipador atualiza também a parte do modelo do mundo correspondente a ele.

Podemos ver então que o comportamento dos componentes deste modelo se dá de forma concorrente, o antecipador e o reator trabalhando em paralelo. Os dois processos executam de maneira assíncrona, tendo o reator maior prioridade que o antecipador. Isto significa que o antecipador executará sempre que o reator estiver, em algum estado de espera. O antecipador deve ser algum algoritmo *anytime*<sup>17</sup>, i.e. deve sempre produzir alguma resposta quando for interrompido.

Davidsson considera todo o ambiente reativo, governado por regras condição-ação. O antecipador também produz suas antecipações baseado apenas em regras condição-ação. A antecipação para o autor é *linear*. Este define então, formalmente seu agente, um agente linearmente quase-antecipatório (ALQAAA - *A Linearly Quasi-Anticipatory Artificial Agent*) como uma tupla:

$$\langle R, W, U, M \rangle$$

Onde:

**R** é o conjunto de regras condição-ação definindo o reator.

**W** é a descrição do ambiente (o modelo do mundo).

**U** é o conjunto de estados indesejáveis.

**M** é o conjunto das regras descrevendo como modificar **R**.

**U** e **M** definem o antecipador. Para cada elemento em **U** deverá haver uma regra correspondente em **M**. Quando algum estado indesejável for antecipado deverá haver uma regra que permitiria ao agente modificar **R**. Haverá então uma função  $f: U \rightarrow M$  que determinaria para cada estado existente em **U** qual regra de transformação do reator deverá ser aplicada.

O autor define então um *testbed*<sup>18</sup> para o seu agente antecipatório e considera o modelo do mundo (**W**) como uma descrição de todo o ambiente e todos os outros agentes presentes neste ambiente. O *testbed* consiste numa grade 10x10 com um número variável

---

<sup>17</sup> Algoritmos *anytime* são aqueles que podem produzir sempre uma resposta válida, independente do momento em que forem interrompidos.

de obstáculos e um ou mais alvos. Foram testados um agente reativo e o ALQAAA. Os resultados observados pelo autor mostram que o desempenho do agente ALQAAA tende a melhorar (relativamente ao agente reativo) quando o número de obstáculos do *testbed* é aumentado.

Foram feitos testes também com mais agentes no ambiente. Os testes consideraram agentes ALQAAA e reativos, bem como situações cooperação e competição. Em situações competitivas, agentes antecipatórios demonstraram um comportamento mais eficaz que agentes puramente reativos. Também em situações cooperativas agentes antecipatórios foram melhor. Uma ressalva é feita pelo autor: a presença de vários agentes antecipatórios cooperando em um mesmo ambiente leva ao problema de que um agente antecipatório deve antecipar o comportamento de outro agente antecipatório que por seu turno deve antecipar o comportamento do primeiro agente (que está antecipando o seu comportamento). Isto leva a uma recursão infinita que é o paradoxo da auto-referencialidade já discutido aqui (item 2.3) Davidsson sugere evitar este paradoxo supondo que os agentes conhecem apenas o componente reativo de cada um e que comunicam aos outros agentes qualquer modificação neste componente reativo.

O modelo visto aqui propõe a implementação de sistemas antecipatórios a partir da perspectiva de Rosen. Alguns elementos porém precisam ser avaliados em relação à implementação proposta pelos autores.

O primeiro elemento é o fato de que, embora os autores configurem formalmente o seu modelo como uma implementação de um agente com racionalidade limitada num ambiente complexo, sua implementação supõe um modelo de mundo completo e um ambiente extremamente simplificado para o teste dos seus agentes. Embora deva se notar que é necessária alguma simplificação para a construção de ambientes de teste para os agentes, as suposições de um modelo completo do mundo e de um mapeamento pleno das modificações possíveis no reator dado um conjunto conhecido de estados do mundo indesejáveis, parecem em desacordo com um dos principais elementos propostos por Rosen para um agente antecipatório, a capacidade de aprendizado. Não que a capacidade de aprendizado seja desconsiderada no trabalho como um todo, ela é o principal tema dos capítulos seguintes. Parece haver, porém, uma conexão fraca entre modelos de construção de conceitos discutidos pelo autor e esquemas eficazes de conexão entre os modelos de mundo (que são o objeto único do aprendizado, na tese de Davidsson)

---

<sup>18</sup> Poderia ser traduzido para '*ambiente de teste*'

e o modelo do agente antecipatório proposto nos capítulos iniciais. A idéia do uso de algoritmos para classificação de categorias o *insight*<sup>19</sup> de que este é um componente fundamental do modelo de mundo em um agente antecipatório, parecem ser os dois elementos mais importantes a apreender do trabalho de Davidsson.

Um segundo elemento é que o trabalho do autor ignora todo o desenvolvimento de um tipo de algoritmo *anytime* que parece adequado para a implementação de um sistema de construção e modificação de regras em ambientes complexos (algoritmos genéticos e, especificamente sistemas classificadores). Estes algoritmos podem ser um componente de um modelo de aprendizado baseado em regras condição ação.

Terceiro, a elaboração de metas em ambientes complexos como um sistema econômico parece ser mais adequadamente representada como uma *função de utilidade* que estabeleça valores cardinais para o *grau de satisfação* do agente para os estados do mundo do que como um conjunto de estados desejáveis ou indesejáveis determinados. Esta enumeração de estados desejáveis ou indesejáveis pode levar a um crescimento exponencial das possibilidades se o número de estados possíveis do mundo aumenta muito.

Abandonando-se, porém, a noção de que o agente conhece plenamente o mundo, é possível pensar num agente que, com memória limitada, possa construir um modelo de mundo usando a noção de protótipos para os seus estados. Estes protótipos seriam armazenados na memória limitada do agente, portanto, haveria um limite para o número de situações de mundo que o agente poderia lembrar. As trajetórias possíveis do mundo poderiam ser antecipadas, baseadas em situações que conectariam estes estados. A observação do agente superaria a antecipação linear, por uma antecipação baseada em uma medida de similaridade e uma *trajetória* possível para o mundo. Situações que levariam a estados do mundo onde o agente conseguiria uma maior utilidade seriam preferíveis a outras onde a utilidade fosse menor. Estes elementos podem compor um modelo de agente antecipatório que incorpore a idéia de categorização proposta por Davidsson num *framework* adequado para simulação econômica.

#### **5.4 Uma Definição de Agente Adequada Para Simulação Econômica**

Uma definição consistente de agente que seja útil para o trabalho desenvolvido aqui deve considerar o papel da interação entre os agentes. Necessariamente deve

---

<sup>19</sup> Poderia ser traduzido como 'percepção' ou 'sacada'.



considerar alguma capacidade de comunicação, esta capacidade de comunicação porém, pode ser completamente restrita ao domínio da aplicação. Uma possibilidade pode ser a definição de uma estrutura simples de comunicação baseada num formalismo qualquer (KQML, por exemplo), outra possibilidade, mais simples pode ser a implementação de algumas mensagens padrão para os agentes (compra, pedido, preço, custo, pagamento, etc.).

Outro elemento fundamental numa definição de agente adequado para simulação econômica é uma noção de *utilidade*. É uma idéia antiga em economia estabelecer uma função que determine o grau de *preferência* entre conjuntos de alternativas com as quais um agente econômico se defronta, ou para avaliar o grau de *satisfação* de um agente em relação a um estado do mundo. O seu uso pela IA parece uma consequência de que a possibilidade de alguma definição formal do nível de preferência em relação a um conjunto qualquer de estados do mundo possíveis (um espaço de busca) é um critério interessante para nortear a tomada de decisão de um agente artificial. Neste sentido, Russel & Norvig (1995, pp. 44-45) definem *agentes baseados em utilidade*, que são aqueles que agem no sentido de aumentar o seu grau de *felicidade* ou *satisfação*. Mais que *metas*, os agentes procuram maximizar alguma função utilidade explícita. As decisões dos agentes levarão sempre em conta como poderá estar a sua *satisfação* dada uma determinada trajetória de evolução do mundo e uma escolha de ação feita por eles.

Neste sentido, a noção de utilidade usada pelos autores em IA encontra uma conexão com a visão de *expectativas* que definimos aqui a partir de Keynes (cap. 4). A *utilidade* em que se baseia uma agente para tomar sua decisão não é apenas a *utilidade atual*, mas a satisfação que o agente teria em uma situação futura do mundo tendo em vista uma ação (ou conjunto de ações que ele pretende efetuar). Uma formalização possível para este tipo de agente é a noção de *agente antecipatório*, formulada por Rosen (1985), tratada acima.

A necessidade de agir em um ambiente onde imperam complexidade e incerteza leva à suposição necessária de que o agente não tem capacidade computacional e/ou informação suficiente para a tomada de decisão ótima. Esta é, como vimos (cap. 2), uma aproximação necessária do modelo do agente artificial a um agente econômico do mundo real.

A suposição de limitações na memória e na capacidade de processamento impõe um modelo de agente com duas características para sua memória e modelo de mundo, quais sejam:

- a) O agente não tem como armazenar todos os valores para as variáveis observadas durante a sua interação com o ambiente. Isto significa que sua memória precisa de algum *esquema de categorização* para situações observadas, i.e. o agente vai armazenar *situações* (conjuntos de valores para as variáveis observadas) que tenham algum grau de similaridade. Novas situações observadas no ambiente seriam associadas às situações armazenadas na memória do agente através de alguma *medida de similaridade*.
- b) A incompletude do conhecimento que o agente tem do ambiente e a possibilidade de transformação irreversível no mundo produzida pelas ações dos diversos agentes econômicos (incerteza-K) impõem um modelo de agente econômico artificial que possa adaptar-se a estas transformações modificando o seu *modelo de mundo* e as *ações* que ele pode efetuar. Um agente econômico artificial precisa modelar alguma forma de aprendizado.

Um agente artificial adequado para a simulação no contexto definido para este trabalho deve ter as seguintes características:

- a) *capacidade de comunicação*;
- b) uma função de *utilidade*;
- c) *racionalidade limitada* que implica capacidade de *categorização* de situações e capacidade de *aprendizado*;
- d) capacidade de *antecipação* das situações do mundo, i.e. uma função que permita a formação de expectativas;

Um agente para simulação econômica não pode ser pensado como um indivíduo isolado no mundo. Embora alguns economistas tenham usado esta metáfora, só é possível pensar em simulação econômica utilizando muitos agentes econômicos para a sua execução. Qualquer modelo consistente de diversas matizes político-ideológicas - para citar dois exemplos bastante diferentes: Walras e Marx (Simonsen, 1994) - põe como atores no palco vários agentes. Estes agentes podem ser homogêneos no conhecimento e na

capacidade de agir caminhando sempre para um equilíbrio estável (como em Walras) ou heterogêneos nos meios, conhecimento, capacidade de ação e objetivos movendo-se em permanente contradição (como em Marx). De qualquer forma é nas interações entre os agentes que a economia se move. Portanto pensar modelos de simulação em economia significa necessariamente pensar em sistemas multiagentes. Além de um modelo de agente consistente é necessário então pensar numa estrutura para mediar a *interação* entre os agentes.

Existem vários *frameworks* disponíveis para a implementação de uma abordagem multiagentes para simulação. Alguns deles são genéricos e utilizam uma abordagem distribuída onde os agentes podem estar em diversos computadores numa rede e outros são mais específicos para simulação. O ponto de partida para a implementação de uma abordagem de simulação multiagentes parece ser, então, uma avaliação dos principais *frameworks* existentes.

## 6 Frameworks Multiagentes

Sistemas multiagentes, dentro da perspectiva da IA são definidos por Durfee et al. (1989) como: “*a loosely coupled network of problem solvers that work together to solve problems that are beyond their individual capabilities*”<sup>20</sup>. Esta definição tem impressionante semelhança com a conjectura proposta por Leijonhufvud (1993) sobre a economia como: “*a network of interacting processors, each one with less capability to process information than would be required of a central processor set to solve the overall allocation problem for the entire system*”<sup>21</sup>.

A semelhança entre estas duas definições não é acidental, mas, reflete um elemento comum aos dois objetos tratados aqui. Sistemas econômicos são eminentemente distribuídos e, a maior parte das decisões tomadas pelos seus *elementos atômicos* (os agentes econômicos) *não é centralmente controlada ou coordenada*. A interação entre estes agentes econômicos, porém, produz soluções parciais para o problema da alocação de recursos entre eles. Isto não significa que o processo de tomada de decisão de forma descentralizada leve a soluções ótimas para o problema da alocação de recursos, mas que agentes com conhecimento e capacidade de processamento limitadas podem ajustar os seus volumes de gasto para que o sistema resolva de forma *satisfatória* o problema.

Estas formas de interação descentralizada produzem o funcionamento do sistema econômico. Estes processos econômicos, segundo Arthur, Darlauf & Lane (1997, p. 4) têm as seguintes características que, tornam difícil o seu tratamento pela abordagem matemática tradicionalmente usada na economia:

- a) a *interação dispersa* em paralelo entre muitos agentes heterogêneos. A ação de um agente depende da antecipação da ação de um número limitado de outros agentes e da dinâmica agregada do sistema que é produzida pelos agentes;
- b) não há um *controlador global* para as interações entre os agentes. Os mecanismos de competição e coordenação controlam estas interações. Regras, convenções e instituições mediam a interação;

---

<sup>20</sup> "Uma rede fracamente acoplada de resolvidores de problema que trabalham juntos para solucionar problemas que estão além de suas capacidades individuais"

<sup>21</sup> "Uma rede de processadores interagindo, cada um com menos capacidade de processar informação do que seria requerido de um conjunto processador central para resolver completamente o problema de alocação para todo o sistema."

- c) há *muitos níveis de organização e interação* entre os agentes, podendo as unidades de um nível servirem como *blocos de construção* de unidades de outro nível, mas sem a limitação de algum tipo de interação entre os níveis;
- d) os agentes mantêm-se em um processo da *adaptação contínua* revisando seus comportamentos e ações constantemente à medida que adquirem informação sobre o sistema;
- e) os agentes criam constantemente novos nichos de atuação, mantendo o sistema em um estado de novidade perpétua (*perpetual novelty*);
- f) Esta novidade perpétua mantém o sistema em uma *dinâmica fora do equilíbrio*, o que leva o funcionamento da economia para longe de qualquer equilíbrio global ou nível ótimo.

Sistemas que compartilham estas propriedades foram chamados por Holland (1988) de *redes não-lineares adaptativas*. Estes sistemas têm como característica essencial o fato de anteciparem a dinâmica do sistema onde estão imersos. Esta abordagem para a economia impõe complexidades de tratamento formal que vão, segundo os autores, além das ferramentas costumeiramente usadas pelos economistas. A modelagem de problemas econômicos a partir de uma perspectiva que incorpore estes elementos da complexidade do ambiente real é o foco do Programa de Pesquisa em Economia do Santa Fe Institute (SFI). Arthur, Darlauf & Lane (1997, p. 6) definem os processos econômicos como:

" ... seeking emergent structures arising in interaction processes, in which the interacting entities anticipate the future through cognitive procedures that themselves involve interactions taking place in multilevel structures "<sup>22</sup>.

O que se pode ver a partir desta citação é que a caracterização dos modelos feita pelos autores tem elementos de uma abordagem *construtivista* da economia. Estes elementos são: as estruturas *emergem* na dinâmica do processo; a *interação* dos agentes joga um papel relevante; a *antecipação* do comportamento futuro do sistema é um elemento fundamental no processo de tomada de decisão dos agentes econômicos; os agentes econômicos aprendem e formam expectativas através de *procedimentos cognitivos*; e, finalmente, o comportamento e o aprendizado dos agentes é restrito e condicionado pelas estruturas sociais construídas a partir da sua interação.

---

<sup>22</sup> "... buscando estruturas emergentes surgindo em processos de interação, nos quais as entidades que interagem antecipam o futuro através de procedimentos cognitivos que, eles mesmos, envolvem interações ocorrendo em estruturas multinível."

A dificuldade para avançar neste programa de pesquisa é enorme, e, segundo os autores ainda é necessário um grande esforço para a construção da teoria e das ferramentas de estudo para que esta abordagem possa produzir resultados mais significativos. Um componente que tem importância crucial para o estudo deste tipo de sistema é a simulação computacional.

Neste contexto se inserem as ferramentas de simulação multiagentes. No SFI foi produzido o Swarm (Minar et. al., 1996). Outra ferramenta de simulação baseada numa abordagem semelhante é o SDML (a Strictly Declarative Modeling Language) produzida pelo Centre for Policy Modelling da Universidade Metropolitana de Manchester (Moss, et. al, 1997). Estas parecem ser as duas ferramentas mais utilizadas para a simulação multiagentes em economia e serão discutidas aqui.

*Frameworks* multiagentes genéricos também podem ter contribuições para a formulação das características de uma ferramenta de simulação. O desenvolvimento de simulações utilizando redes de computadores, um suporte para a comunicação entre os agentes e elementos de uma metodologia para a construção de sistemas multiagentes podem ser componentes de abordagens mais genéricas se sistemas multiagentes com possibilidade de ser incorporados aos *frameworks* de simulação.

O ponto de partida para a análise destes *frameworks* é o estabelecimento de algumas características desejáveis para a sua implementação. Listaremos estas características a seguir.

## **6.1 Características Desejáveis de um Framework de Simulação Multiagentes em Economia**

Para uma abordagem não exaustiva mas eficaz, para *frameworks* multiagentes, é necessário centrar foco naquelas implementações que têm características adequadas para o desenvolvimento de uma estrutura para a simulação computacional em economia. Que características são estas?

A primeira característica é o tratamento de sistemas a eventos discretos. A modelagem dos agentes numa simulação deve seguir algum esquema de tratamento de eventos discretos. O domínio do tempo para a tomada da decisão em modelos econômicos é discreto. O seu limite é algum tempo efetivo mínimo (item 4.3) que é estabelecido pelo tempo mais curto em que um agente revisa suas decisões de gasto. Todos os outros agentes expressarão suas decisões em múltiplos desta unidade. Ora, tendo uma *unidade efetiva*

*mínima* para o tempo, este modelo de sistema multiagentes é discreto. Este modelo precisa permitir que as decisões dos agentes a um determinado tempo possam ser tomadas em paralelo (ou em alguma simulação de paralelismo).

O segundo elemento para um sistema multiagentes é a possibilidade de implementação de agentes heterogêneos. Deve-se poder construir sistemas com diferentes *classes* de agentes mas, mesmo dentro destas classes o *conhecimento* dos agentes pode ser diferenciado, i. e. não há porque limitar o modelo a agentes econômicos que têm a mesma informação e capacidade de ação. Duas empresas de um mesmo ramo de produção podem ter diferentes expectativas sobre os níveis de demanda esperados, ou diferentes expectativas sobre as taxas futuras de juros praticadas na economia. Embora estas duas empresas tenham os mesmos produtos e os mesmos fornecedores as decisões de gasto para as duas podem ser diferentes.

Um terceiro elemento é a possibilidade dos agentes se comunicarem. É necessário haver um conjunto mínimo de *diretivas de comunicação* que permita aos agentes solicitar preços, efetuar uma compra, transferir um recurso. Este conjunto de diretivas não precisa ser inicialmente completo, mas deve ser extensível.

Uma integração com a linguagem de desenvolvimento do sistema é desejável. Esta integração pode evitar o surgimento de um grande conjunto de problemas associado à construção de uma linguagem específica para o desenvolvimento dos agentes. Uma integração com a linguagem permitiria a inclusão de novos conjuntos de classes e a utilização de componentes já desenvolvidos.

A independência de plataforma de sistema operacional também é uma característica desejável, visto que uma estrutura genérica deve poder ser utilizada no maior número possível de sistemas operacionais o que possibilita a sua disseminação e uma utilização eficiente de recursos já disponíveis nas diversas instalações.

Por último a execução distribuída em rede é uma característica também desejável. Modelos de simulação multiagentes tendem a ser computacionalmente custosos, especialmente se os agentes incorporarem mecanismos adaptativos como algoritmos genéticos e redes neurais, por exemplo. Se estes algoritmos já têm custo computacional relativamente alto, este custo se multiplica ainda mais se cada agente incorporar um algoritmo genético ou uma rede neural. Um sistema de simulação que possibilite uma execução distribuída pode aproveitar eficientemente os recursos computacionais existentes.

## 6.2 Frameworks Genéricos

Um elemento que salta aos olhos numa análise preliminar sobre *frameworks* multiagentes é que existe uma imensa quantidade de implementações e abordagens. Muitos modelos diferentes de agentes, e muitos modelos diferentes de estruturas para a integração destes agentes. No endereço eletrônico da *The Agent Society* (1998) são encontradas referências a mais de trinta companhias e quarenta universidades e institutos de pesquisa trabalhando especificamente em ferramentas e serviços associados à construção de agentes.

Um segundo elemento importante observado nestes *frameworks* é que a maioria deles está construído sobre um modelo de agente desenvolvido pelo autor ou autores com objetivos específicos associados à aplicações onde eles estão inseridos, tais como: interface, mobilidade em uma rede, jogos, cooperação com outros agentes, gerenciamento de serviços, gerenciamento de manufatura, etc.). Esta associação com as aplicações geralmente produz agentes eficientes para os fins específicos para que eles foram desenvolvidos.

Parece não haver ainda uma tecnologia (e nem uma teoria) completamente desenvolvida para a implementação de sistemas multiagentes. Então, como o foco nesta dissertação é a formulação teórica e implementação computacional de um tipo de agente adequado para simulação econômica, cabe avaliar os *frameworks* existentes de maneira a encontrar os elementos que podem ser adequados para os objetivos postos aqui. Idealmente, deve-se centrar foco em ferramentas específicas de simulação. Há, porém, elementos de teoria e experiência usados na construção das ferramentas genéricas para sistemas multiagentes que podem contribuir com *insights* interessantes para a construção ou melhoria de uma ferramenta de simulação baseada na noção de agentes.

Uma resenha abrangente sobre ferramentas de construção de agentes pode ser encontrada na tese de doutorado de Chauan (1997). O autor comparou três tipos de *frameworks* para a implementação de sistemas multiagentes: ferramentas de apoio ao desenvolvimento de agentes móveis baseadas em Java (IBM aglets, Concordia, Odyssey, Voyager), ferramentas baseadas em Java para o suporte a atos de fala (JATLite, JAFMAS), Outras ferramentas para o desenvolvimento de agentes (InteRRaP, dMars, Cybele, AgenTalk, Telescript, AgentTcl, Swarm, Echelon, Cool).

Dentre os *frameworks* genéricos para a construção de agentes analisados pelo autor, os *frameworks* escritos em Java têm como aspecto unificador fundamental o foco na



*mobilidade dos agentes*. Por mobilidade entende-se a possibilidade de o agente transpor seu código e dados entre máquinas em uma rede passando a executar na máquina de destino. Os *frameworks* multiagentes em Java analisados pelo autor possuem todos a característica da mobilidade.

Um segundo elemento que unifica os *frameworks* em Java é a sua independência de plataforma de sistema operacional (SO). Os agentes produzidos em Java executam seu código em qualquer SO que possua máquina virtual Java. Isto possibilita a utilização dos recursos de *hardware* e SO existentes nas instalações que utilizarem aquele framework.

Todos os *frameworks* analisados implementam a comunicação entre máquinas baseada em TCP/IP, o que parece ser o padrão de fato de protocolo para comunicação em rede. Já em relação à comunicação entre os agentes, a maioria dos *frameworks* escritos em Java implementa a comunicação direta entre os agentes. A exceção fica com o JATLite (onde os agentes se comunicam através de um roteador) e o JAFMAS, onde mensagens para todos os agentes (*broadcast*) são suportadas.

A maioria dos *frameworks* não suporta implementações de esquemas de interação entre os agentes baseados em KQML (Knowledge and Query Manipulation Language). A interação baseada em KQML permite que agentes heterogêneos comuniquem-se a partir de uma linguagem comum. Os *frameworks* JATLite e JAFMAS implementam esta linguagem.

Embora numa economia capitalista real a maioria das decisões não seja tomada de forma centralmente coordenada, há sempre algum nível de coordenação entre os agentes. A produção de um determinado bem por um agente econômico é resultado da combinação de um conjunto de insumos que são fornecidos por outros agentes. Esta combinação é um processo onde há algum grau de coordenação. Os agentes econômicos estabelecem contratos, organizam suas escalas de produção de maneira a atender os picos ou depressões sazonais da demanda para os seus produtos. Uma discussão sobre o papel de mecanismos de coordenação na organização de um esquema de fornecimento de insumos (*supply chain*) usando um sistema multiagentes pode ser encontrado em Barbuceanu & Fox (1996). A linguagem desenvolvida por estes autores foi um dos elementos implementados no JAFMAS.

A necessidade de uma linguagem de comunicação de agentes que permita a construção de mecanismos de coordenação e cooperação surge na implementação de processos de simulação mais complexos, onde, por exemplo, a negociação entre os agentes e a coordenação de atividades seja, em si, um objetivo da simulação. Simulações onde a coordenação e a cooperação dos agentes possa ser dada por rotinas de negociação mais simples podem prescindir deste tipo de característica. Apesar da sua complexidade mecanismos para implementação de coordenação e cooperação como os propostos nos trabalhos de Barbuceanu & Fox (1996), Chauan (1997) e Jennings (1996) são um componente que pode ser incorporado em modelos de simulação econômica.

A implementação de uma estrutura que suporte comunicação entre várias máquinas numa rede, além de uma linguagem de comunicação de agentes é outro componente importante de uma estrutura de simulação. Estes componentes já se acham completamente desenvolvidos nos *frameworks* multiagentes genéricos e são um elemento que ainda não foi incorporado nos *frameworks* específicos de simulação.

Por último, a independência de plataforma de sistema operacional, que é a característica fundamental das implementações feitas em Java também pode ser incorporada como uma característica de um *framework* de simulação.

### **6.3 Frameworks para Simulação**

A idéia da implementação de sistemas multiagentes a partir dos conceitos estabelecidos pela teoria econômica do equilíbrio geral não é nova no desenvolvimento de aplicações computacionais. Uma das primeiras implementações deste conceito foi usada para a coordenação e distribuição de tarefas em uma rede de computadores. Este trabalho vem sendo desenvolvido desde o início da década de 1990 por, B. Hubermann e sua equipe no PARC-XEROX em Palo Alto (Waldspurger et al., 1992; Huberman & Clearwater, 1995; Huberman, & Hogg, 1995). Neste laboratório foi desenvolvido o SPAWN, cujo objetivo é a simulação e teste do uso de mecanismos de mercado para a alocação de recursos em redes de computadores.

Estes mecanismos de distribuição estão baseados na formulação teórica de mercados em concorrência perfeita. Pode-se descrever seu comportamento da seguinte maneira: os serviços solicitados são submetidos a um leilão onde os agentes que podem executar o serviço fazem ofertas de preços levando em conta seus custos e recursos. Os agentes com as melhores ofertas vencem o leilão e fornecem o serviço. Mais,

recentemente, F. Ygge (1998) aplicou, em sua tese de doutorado, um algoritmo para o gerenciamento da distribuição de cargas de energia elétrica baseado em mecanismos de mercado.

Os mecanismos de mercado e a visão de que o processo de leilão na perspectiva walrasiana leva a uma alocação ótima de recursos têm influenciado a literatura sobre distribuição de recursos em redes. Uma diferença fundamental (e extremamente interessante) é que estas *redes econômicas simuladas* são muito mais próximas das formulações walrasianas que a nossa economia real. Portanto, a aplicação de mecanismos de mercado a problemas concretos de computação e distribuição de recursos prova que, em ambientes que respeitam as restrições impostas pela teoria a alocação ótima (ou algo muito próximo dela) alcançar pontos ótimos é possível. Porém, a comparação com uma economia real não é direta. Mercados reais estão muito distantes da concorrência perfeita, as decisões de um agente influenciam as decisões de outros agentes. Aprendizado, imitação, cooperação, barreiras à entrada, surgimento (entrada) de novos agentes e saída (falência, por exemplo) de agentes do mercado são elementos que complicam o modelo proposto e eventualmente precisam ser tratados.

Uma idéia subjacente ao uso de mecanismos de mercado é a de que cada "elemento" participante do processo de leilão é um *agente*. Tem-se, aqui, uma interação forte com uma abordagem da simulação em economia que considere os agentes como os componentes construtivos fundamentais. Estes sistemas de mercado (e os sistemas de mercado em geral) podem ser considerados sistemas multiagentes.

A idéia da economia como um sistema *dinâmico evolutivo complexo* que pode ser simulada com *agentes adaptativos artificiais (AAA)* deve-se ao trabalho seminal de Holland & Miller (1991). Estes autores (p. 365) caracterizam tal sistema como complexo no seguinte sentido:

- a) consiste de uma *rede* de agentes em interação;
- b) exibe um comportamento dinâmico agregado que *emerge* das atividades individuais dos agentes;
- c) o comportamento agregado do sistema pode ser descrito sem um conhecimento detalhado do comportamento dos agentes.

Os agentes, neste tipo de sistema conseguem atribuir a suas ações algum tipo de valor (lucro, retorno, utilidade, *fitness*<sup>23</sup>, etc.) e agem sempre no sentido de aumentar o valor deste resultado. Estes agentes estão sempre em interação com outros. O sistema geralmente opera longe de qualquer ótimo global.

Esta caracterização é inteiramente consistente com a produzida por Arthur, Darlauf & Lane (1997) citada anteriormente e pode ser compreendida, de uma maneira genérica, como uma definição do tipo de sistema complexo que inspirou o desenvolvimento do Swarm.

### 6.3.1 Swarm

O Swarm é a ferramenta de simulação construída no Santa Fe Institute (1999) e objetiva implementar "... a general purpose framework for simulating concurrent distributed artificial worlds"<sup>24</sup> (Bukhart, 1997). O Swarm pode ser definido, segundo Minar et al. (1996) como "... a multiagent software platform for the simulation of complex adaptive systems"<sup>25</sup>. Esta ferramenta implementa formalmente seus modelos como uma coleção de agentes independentes interagindo via *eventos discretos*. Agente, para o Swarm é uma entidade que pode gerar eventos que afetam a ela e a outros agentes. Agente, então, é a *unidade básica de uma simulação* no Swarm. Agentes interagindo consistem em uma simulação.

O primeiro componente de uma simulação é um *swarm*. Um *swarm* é uma coleção de agentes (que pode ser heterogênea) com um *cronograma* de eventos associado a estes agentes. Podemos ter, por exemplo, empresas e famílias, na simulação de um sistema econômico. As empresas e famílias seriam os agentes que compõem o *swarm* que simula uma economia.

Outro elemento fundamental do Swarm é o *Schedule*, que impõe uma explicitação do tempo no modelo. *Schedule* é uma estrutura de dados que combina ações na ordem específica que elas devem ser executadas.

Além de serem *containers* de agentes, *swarms* podem ser agentes. Neste caso, o comportamento do agente é definido pelo fenômeno emergente dos agentes internos ao *swarm*. *Swarms* podem ser criados e destruídos ao longo da execução, eles podem ser utilizados para construção de modelos onde níveis múltiplos de descrição emergem

---

<sup>23</sup> *Fitness* poderia ser traduzido como adequação do sistema ao ambiente onde está inserido.

<sup>24</sup> "...um *framework* de propósito geral para simular mundos artificiais concorrentes distribuídos".

dinamicamente. Assim, o Swarm suporta a modelagem de agentes que podem construir modelos de seu mundo (especialmente quando os agentes contém componentes cognitivos).

Os agentes, nesta ferramenta de simulação são implementados como objetos. A linguagem de implementação da ferramenta é o ObjectiveC. Agentes em Swarm são classes de objetos. Um tipo específico de agente pode ser implementado como uma subclasse de `SwarmObject` que é a classe onde se definem os agentes. No exemplo da economia simulada, *empresa*, por exemplo, seria uma subclasse de `SwarmObject`.

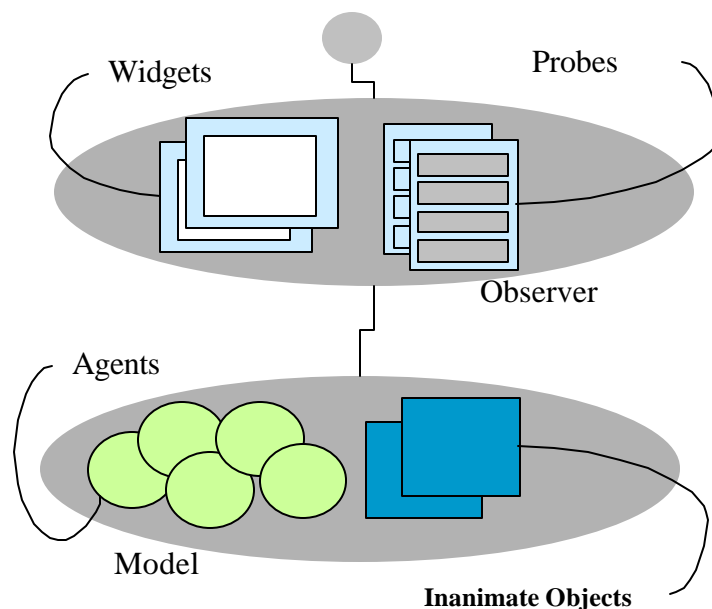


Figura 3 - Uma representação Gráfica de uma Simulação no Swarm (Stefansson, 1998)

Orientação a objetos joga um papel fundamental na construção deste software de simulação. As vantagens apresentadas pelo uso da orientação a objetos são a possibilidade de adicionar características à ferramenta de simulação (i.e. incluir novas funcionalidades) e a reusabilidade do software produzido por seus usuários. Neste sentido, o Swarm é uma ferramenta aberta e os seus criadores mantêm a mais intensa colaboração possível com os usuários no sentido de implementar cada vez mais componentes de software na ferramenta.

Um conceito importante para a abordagem de simulação proposta pelo Swarm é a separação entre *modelo* e a *coleta de informações* sobre a simulação (Podemos ver uma representação gráfica disto na figura 3). Esta separação permite ao usuário da simulação definir o seu modelo sem uma preocupação explícita de quais as variáveis que ele pretende

<sup>25</sup> "...uma plataforma de *software* multiagentes para a simulação de sistemas adaptativos complexos".

observar. Para isto é criada a classe `ObserverSwarm`, esta classe permite acessar independentemente do modelo os valores dos objetos na simulação. Esta independência entre simulação e coleta dos dados é facilitada pelo fato do projeto ter sido desenvolvido utilizando orientação a objetos.

Atualmente o Swarm está disponível para máquinas com versões do sistema operacional UNIX. O fato de ter sido escrito em ObjectiveC e utilizar X-Windows permite a migração para diversas máquinas que suportem versões do sistema operacional UNIX. Atualmente os *sabores* de UNIX suportados pelo Swarm são: GNU-LINUX, HP-UX, Solaris e IRIX. Atualmente o software está sendo portado para Windows NT.

O desenvolvimento dos agentes é completamente integrado ao *framework*. Os `Schedules` são implementados utilizando rotinas em ObjectiveC. Não há um modelo específico de agente a ser usado. A definição do modelo do agente fica a cargo do usuário. A definição do padrão de interação entre os agentes também fica a cargo do usuário.

Algumas bibliotecas que foram implementadas no Swarm podem prover suporte para o desenvolvimento de modelo de agentes adaptativos artificiais. Notadamente as bibliotecas de redes neurais e algoritmos genéticos de J. J. Merelo (1999a, 1999b) são ferramentas que possibilitam este tipo de implementação.

Uma das promessas do Swarm é a sua implementação em uma arquitetura que permita a execução de forma distribuída em uma rede de computadores. As demandas por capacidade de processamento em simulações computacionais ficam cada vez maiores, apesar do crescimento da capacidade computacional dos equipamentos existentes hoje. O advento das redes como um elemento presente em quase todas as instituições de pesquisa pode permitir um melhor uso da capacidade computacional disponível se implementações paralelas do Swarm, forem produzidas.

### 6.3.2 SDML

Outro software específico para simulação multiagentes em economia é o SDML. SDML é a abreviatura de *Strictly Declarative Modelling Language*, foi criada pelo *Centre for Police Modelling*, da *Manchester Metropolitan University*. Segundo os autores o desenvolvimento da linguagem tem dois pontos de partida (Moss, 1996):

- a) O software tenta abranger tanto o desenvolvimento de modelos do sistema econômico como um todo, como do comportamento de indivíduos utilizando *técnicas baseadas em conhecimento*;
- b) O uso de uma linguagem estritamente declarativa em vez de uma linguagem procedural.

O foco fundamental do desenvolvimento do SDML é a modelagem de organizações e do processo de decisão de indivíduos a partir de uma abordagem multiagentes. O fato deste *framework* ser baseado em uma linguagem declarativa tem como objetivo, segundo Moss (1996, pp.1-2) habilitar os desenvolvedores a produzir modelos com assertivas logicamente corretas e consistentes. A idéia é que o uso de uma linguagem declarativa provê uma disciplina de programação que facilita o desenvolvimento de idéias sobre estratégia e política e limita o desenvolvimento de modelos com desnecessária complexidade no seu código.

Outro elemento fundamental do SDML é a sua arquitetura multiagentes. No modelo implementado no SDML *agentes artificiais* são componentes independentes que têm regras incorporadas para cada indivíduo determinando o seu comportamento. Estas regras podem incorporar alguma teoria cognitiva na sua implementação, mas esta não é uma necessidade da arquitetura de implementação.

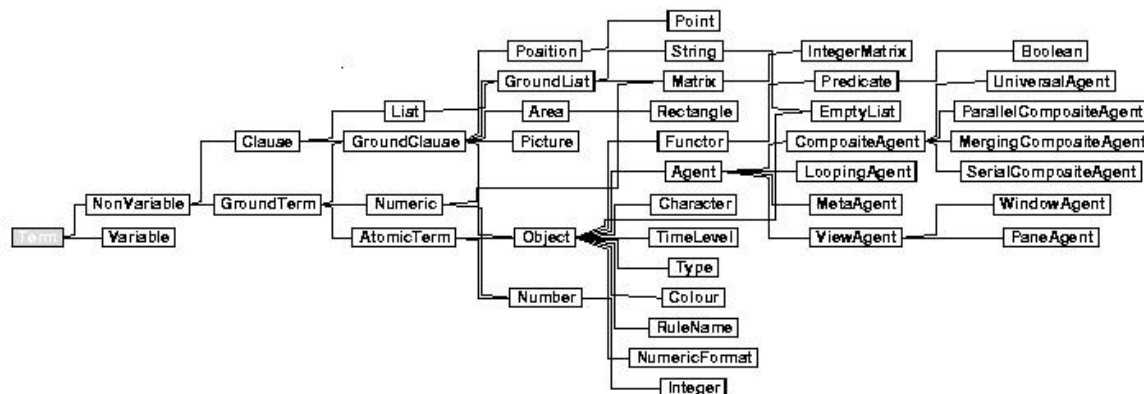


Figura 4 - Hierarquia de Tipos do SDML

O desenvolvimento do SDML utiliza, assim como o Swarm, uma abordagem orientada a objetos. Uma das vantagens desta abordagem é a incorporação no desenvolvimento dos modelos de características de uma implementação orientada a objetos como herança e polimorfismo. Estas características são fortemente facilitadas pelo fato do SDML ser desenvolvido em Smalltalk (mais especificamente em VisualWorks da

ParkPlace Digital). O fato do *framework* ser desenvolvido especificamente nesta versão do Smalltalk permite a sua utilização praticamente em todas as plataformas importantes de sistemas operacionais. As plataformas suportadas por esta implementação são: Unix (SunOS, AIX, DEC-Unix, HP-Unix, Linux, Irix), Windows (98 e NT) e MacOS. O que dá ao SDML um alcance talvez só superado por implementações de sistemas multiagentes que utilizam Java. Um outro elemento da implementação do SDML é o suporte à herança múltipla. Este suporte à herança múltipla é necessário na implementação dos tipos de agente que podem ser utilizados.

Uma classe fundamental na implementação do SDML é a classe `Agent`. Os elementos básicos utilizados numa simulação são instâncias da classe `Agent` ou instâncias das subclasses de `Agent`. As subclasses de `Agent` herdam as regras e estrutura definidas na superclasse, ou nas superclasses, já que no SDML a herança múltipla é possível. As subclasses de `Agent` que já vêm definidas no SDML são:

- a) `LoopingAgent`, que permite o desenvolvimento de simulações a eventos discretos. Um agente que tenha `LoopingAgent` como uma de suas superclasses poderá implementar regras referenciando tempo.
- b) `MetaAgent`, que permite construir agentes que possam modificar sua base de regras. Um agente que tenha `MetaAgent` como uma de suas superclasses poderá modelar alguma forma de aprendizado.
- c) `CompositeAgent`, que facilita a implementação de estruturas multiagentes. Tem as seguintes subclasses `SerialCompositeAgent`, `ParallelCompositeAgent` e `MergingCompositeAgent`. Um tipo de `CompositeAgent` permite que se implemente estruturas aninhadas onde um agente composto é *container* de outros agentes. As bases de regras dos agentes que estiverem dentro de um agente composto qualquer executarão após a base de regras do seu *container*.



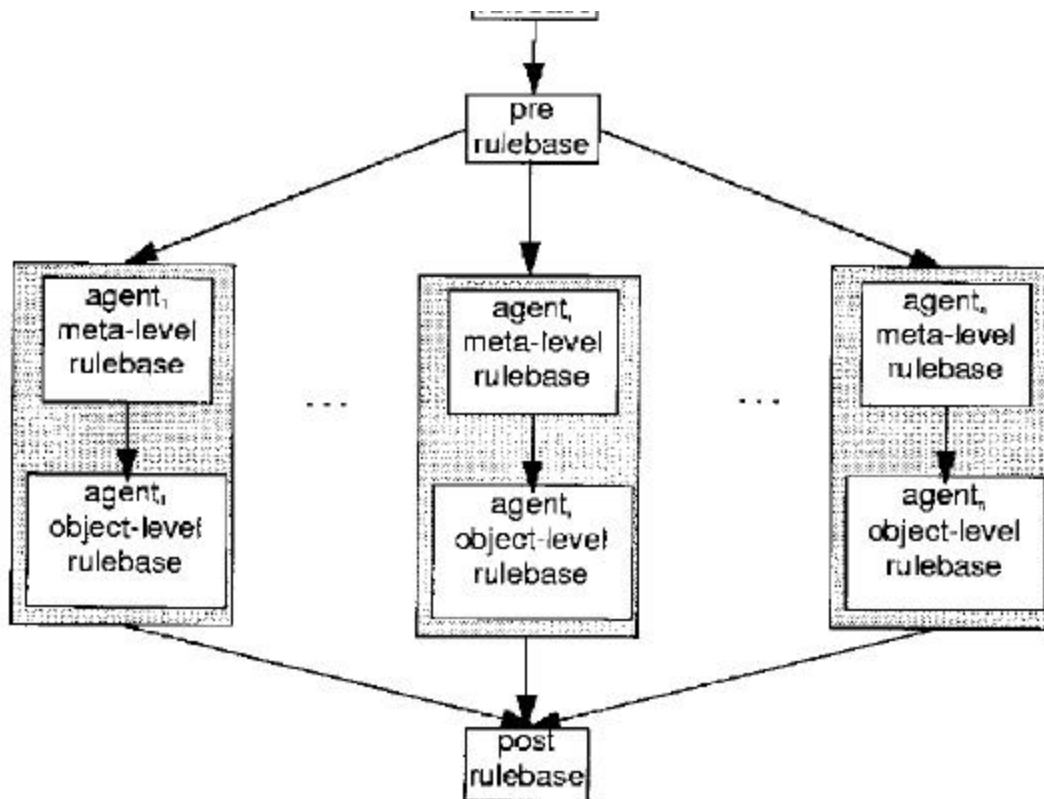


Figura 5 - Seqüência das Bases de Regras dos Agentes (Moss, 1996)

Os agentes também podem ter aninhados vários *níveis de tempo*. O nível de tempo mais abrangente é *eternity*. Outros subníveis podem ser definidos dentro de *eternity*. A cada passagem de um nível de tempo serão executadas as bases de regras referentes aquele nível de tempo para aquele agente.

Um componente fundamental do *framework* são as bases de regras. As bases de regras são onde estão estabelecidos os comportamentos dos agentes durante o processo de simulação. Existem várias bases de regras diferentes disparadas em instantes diferentes do processo de simulação.

No início do processo são disparadas regras que estabelecem as condições iniciais da simulação (*setup rulebase*); a cada início de um intervalo de tempo são disparadas regras iniciais para aquele agente (*pre rulebase*) e ao final de cada intervalo de tempo são disparadas as regras da base final (*post rulebase*) estas regras usualmente apuram resultados, a cada iteração são disparadas, para cada agente as regras associadas a eles. Estas regras podem ser disparadas de acordo com o modelo de agente composto que for escolhido. Caso seja escolhido um agente serial, por exemplo (*SerialCompositeAgent*), os agentes avaliarão suas regras em uma seqüência determinada.

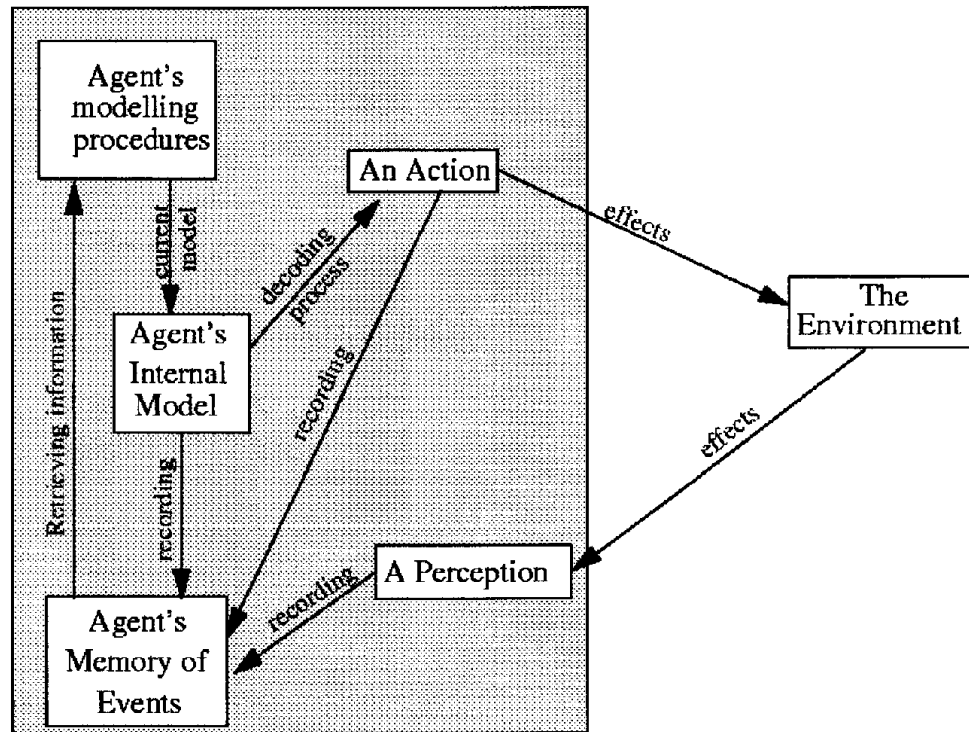


Figura 6 - Fluxos de Informação no Processo de Aprendizado de um Agente (Moss & Edmonds, 1998)

As regras para cada agente têm dois níveis. Um primeiro nível (*meta-level*), onde disparam as regras sobre a alteração das regras (meta-regras) que pode permitir ao agente modificar seu modelo de mundo e um segundo nível (*object-level*) onde disparam as regras associadas às variáveis de decisão e que correspondem a um comportamento reativo do agente.

Observando a forma de construção dos agentes no *framework* SDML pode-se dizer que a sua arquitetura pode ser híbrida combinando componentes deliberativos (um modelo simbólico de mundo), e componentes reativos que não precisam de esquemas complexos de raciocínio para funcionar (Paredes & Martinez, 1998).

A comunicação entre os agentes é feita com a escrita de mensagens (o resultado da avaliação de uma regra) no seu banco de dados ou no banco de dados compartilhado de um *container* (um agente composto qualquer). Um agente também pode ler informações resultantes de uma avaliação de regra de outro agente no banco de dados compartilhado. Este esquema permite a implementação de uma estrutura de comunicação do tipo *blackboard* (Engelmore & Morgan, 1988).

Um agente também pode ler informações que estão no banco de dados de outros agentes caso estas informações estejam definidas como *públicas*.

Não existe um conjunto de primitivas de comunicação entre os agentes no SDML. Qualquer implementação de comunicação explícita entre os agentes (que não seja através de escrever resultados em seus bancos de dados) deve ser feita pelo desenvolvedor do modelo. Ou seja, como no Swarm, não há uma linguagem de comunicação definida explicitamente para os agentes no *framework*.

As implementações de modelos de aprendizado produzidas no SDML utilizam programação genética. Isto se deve à limitação de sua linguagem de definição apenas a cláusulas declarativas. Não há implementação de outros esquemas de aprendizado como redes neurais ou algoritmos genéticos.

Como o SDML é um *framework* que conta com uma linguagem declarativa como parte de sua estrutura. A construção dos modelos se baseia apenas neste esquema (a linguagem de modelagem do *framework*). Isto significa que o Smalltalk é utilizado apenas como linguagem de desenvolvimento do *framework*. Sendo assim, a incorporação de novas características e funcionalidades ao *software* fica restrita a quem tem o acesso ao processo de desenvolvimento (e aos fontes) do SDML.

Um dos pontos fortes do SDML é a sua interface. Esta interface tem uma estrutura extremamente *amigável* que permite ao desenvolvedor, através do uso de *menus* e do acesso a um conjunto de janelas definir o modelo que vai utilizar. Este é um componente extremamente relevante para quem está desenvolvendo modelos. Um esquema mais *fechado* para a implementação do comportamento dos agentes e do modelo como um todo, embora retire um pouco da liberdade no processo de implementação do código, permite que desenvolvedores não precisem ter um conhecimento profundo da linguagem de desenvolvimento e que possam se concentrar mais na construção dos modelos a serem utilizados.

O SDML, não tem uma implementação distribuída. Esta, ao que parece, ainda é uma característica exclusiva de modelos multiagentes genéricos e ainda inexistente como parte da implementação dos *frameworks* de simulação. Isto se deve, provavelmente, à complexidade deste tipo de implementação.

## 6.4 Os Diversos Frameworks e o Estado Atual da Simulação Multiagentes

Com relação aos diversos *frameworks* multiagentes estudados aqui podemos dizer que encontramos as características desejáveis que definimos no item 6.1 atendidas parcialmente em cada um dos *frameworks* analisados. Não há, porém um *framework* que junte todas as características estabelecidas.

<i>Framework</i>	JAFMAS	SWARM	SDML
<b>Característica</b>			
Tratamento de Eventos Discretos	não	sim	sim
Agentes Heterogêneos	sim	sim	sim
Diretivas de Comunicação	sim	não	não
Integração da Linguagem com o <i>Framework</i>	sim	sim	não
Independência de S.O.	sim	não	relativa <sup>26</sup>
Execução Distribuída	sim	relativa <sup>27</sup>	não
Interface Gráfica para Desenvolvimento	não	não	sim
Incorporação de Código já Desenvolvido	sim	sim	não
Incorporação de Novas Características	sim	sim	não
Linguagem de Desenvolvimento	Java	ObjectiveC	Smalltalk
Linguagem de Implementação dos Modelos	Java	ObjectiveC	SDML

Tabela 2 - Comparação dos *Frameworks* multiagentes

O JAFMAS, como *framework* para a implementação de sistemas multiagentes parece ser o mais completo. Ele padece porém de um problema fundamental: o suporte a uma estrutura de tratamento de *eventos discretos*, sem isso qualquer processo de simulação computacional torna-se complexo de ser implementado. Talvez a incorporação de um esquema para este tipo de controle de *tempo* e de *execução de schedules* possa permitir o uso do JAFMAS ou de outra ferramenta de construção de sistemas multiagentes para este tipo de abordagem.

O Swarm talvez seja a ferramenta de simulação multiagentes mais popular atualmente. Apesar de sua proposição de ser uma ferramenta de simulação que retire trabalho de implementação dos cientistas que produzem os modelos, o fato de ser escrito em ObjectiveC e a complexidade do seu uso impõem um esforço significativo na construção das classes e dos comportamentos dos diversos agentes.

O fato do Swarm ser uma ferramenta aberta permite a incorporação de código já desenvolvido, o que facilita significativamente a incorporação de elementos como redes neurais e algoritmos genéticos nos agentes.

<sup>26</sup> O SDML pode ser implementado em todos os sistemas operacionais para os quais há uma versão do VisualWorks.

O SDML tem ao seu favor uma interface extremamente amigável para o desenvolvimento dos modelos, isto é uma idéia que pode ser incorporada a outros *frameworks*, o uso de algum esquema gráfico formalmente consistente para descrição do comportamento dos agentes (como a sugestão do uso, para a implementação dos protocolos de comunicação entre os agentes, de *Redes de Petri* em Chauan, 1997) pode ajudar muito o estabelecimento desta interface.

Nenhum dos dois *frameworks* de simulação (Swarm e SDML) possui um suporte já desenvolvido para comunicação entre os agentes. No caso do Swarm esta comunicação deve ser construída explicitamente com a implementação de mensagens (métodos) nos agentes (classes) e no caso do SDML a comunicação é feita preferencialmente através de um mecanismo de *blackboard*.

Apesar de ser uma promessa desde a sua primeira versão, a incorporação de novas plataformas de *software* que executem o Swarm ainda é uma perspectiva não consumada, já o SDML, por ser desenvolvido em uma versão do Smalltalk disponível para as plataformas de SO mais importantes do mercado (Unix, Windows e Mac) permite a utilização do software virtualmente por qualquer instituição. A vantagem de um *framework* desenvolvido em Java, como é o caso do JAFMAS, é o fato de sua disponibilidade praticamente universal e do uso de um linguagem que está se tornando um *padrão de fato* para o desenvolvimento de aplicações que utilizem redes TCP/IP.

O desenvolvimento de uma estrutura que permita executar simulações multiagentes distribuídas em rede parece ser uma tarefa extremamente relevante no contexto atual das implementações existentes. É porém uma tarefa de relativa complexidade. É necessário pensar tanto numa estrutura de suporte para a comunicação entre os agentes quanto numa estrutura para suportar o controle do processo de simulação. A execução de simulações de sistemas a eventos discretos impõe requisitos de sincronismo e coordenação que devem eventualmente ser atendidos em um *framework* de simulação distribuída.

---

<sup>27</sup> A implementação distribuída pode ser conseguida através da incorporação de código na programação dos agentes que suporte este tipo de abordagem (p. ex. algoritmos genéticos que executem de forma distribuída).

## 7 O Modelo Proposto

O modelo proposto neste trabalho atende dois objetivos fundamentais. O primeiro objetivo é a construção de um modelo de agente consistente com as noções de *racionalidade limitada* e de *antecipação*. O segundo objetivo é a construção de uma estrutura para suportar simulação multiagentes. Inicialmente se vai tratar da estrutura do agente e, depois, do *framework* multiagentes.

### 7.1 A Estrutura do Agente

O agente no modelo proposto deve ter as seguintes características (p. 38):

- a) *racionalidade limitada* que implica capacidade de *categorização* de situações e capacidade de *aprendizado*;
- b) capacidade de *antecipação* das situações do mundo, i.e. uma função que permita a formação de expectativas;
- c) uma *função objetivo* (pode ser uma *função utilidade*, ou outra com lucros, parcela de mercado, custos etc.);
- d) *capacidade de comunicação*.

A implementação desta arquitetura seguiu os elementos desenvolvidos neste trabalho nos capítulos anteriores.

Um agente com racionalidade limitada precisa ter um componente de categorização de situações que permita lidar com a complexidade e diversidade dos eventos com os quais ele se depara utilizando capacidades de memória limitada. Os modelos de mundo construídos por este agente precisam balancear um compromisso entre nível de *complexidade* e nível de *precisão* (Moss & Edmonds, 1998). Para que esta categorização se efetive é necessária alguma *medida de similaridade*. A forma e o tipo da medida de similaridade mais adequada para a categorização dos estados do mundo é uma discussão que, embora fundamental, foge do escopo deste trabalho. O estabelecimento de uma estrutura com um *protocolo* que permita incorporar alguma medida de similaridade é o elemento desenvolvido aqui.

O esquema de *categorização* necessário para o armazenamento de um modelo de mundo consistente na memória do agente pode ser definido como um *objeto*. Uma consequência desta definição é que este *objeto* que pode ter incorporados diversos

esquemas específicos de categorização, como redes neurais ART2 e SOM ou um algoritmo *k-means* (Haykin, 1994 ) que compartilham apenas o *protocolo* (i.e. os métodos usados para acessar este objeto). Um pesquisador interessado em estudar diversos esquemas de categorização para os estados do mundo pode usar os mesmos experimentos e o mesmo modelo, trocando apenas os mecanismos de categorização.

*Situação* é um outro conceito, mais genérico que o de *estado do mundo*, utilizado pelo agente para registrar as *trajetórias* das variáveis observadas. Uma *situação* é uma *série* de estados do mundo que o agente observou e armazenou em sua memória. Uma situação pode ter um tamanho qualquer mas é limitada pelo tamanho da memória do agente. Aqui novamente é necessário estabelecer o compromisso entre complexidade e precisão. Situações arbitrariamente grandes têm um tratamento mais caro e, portanto, não devem ser buscadas como um elemento do modelo. Por outro lado, uma situação que tenha apenas um *estado do mundo* categorizado parece ser arbitrariamente pequena para explicar algo sobre a dinâmica do modelo.

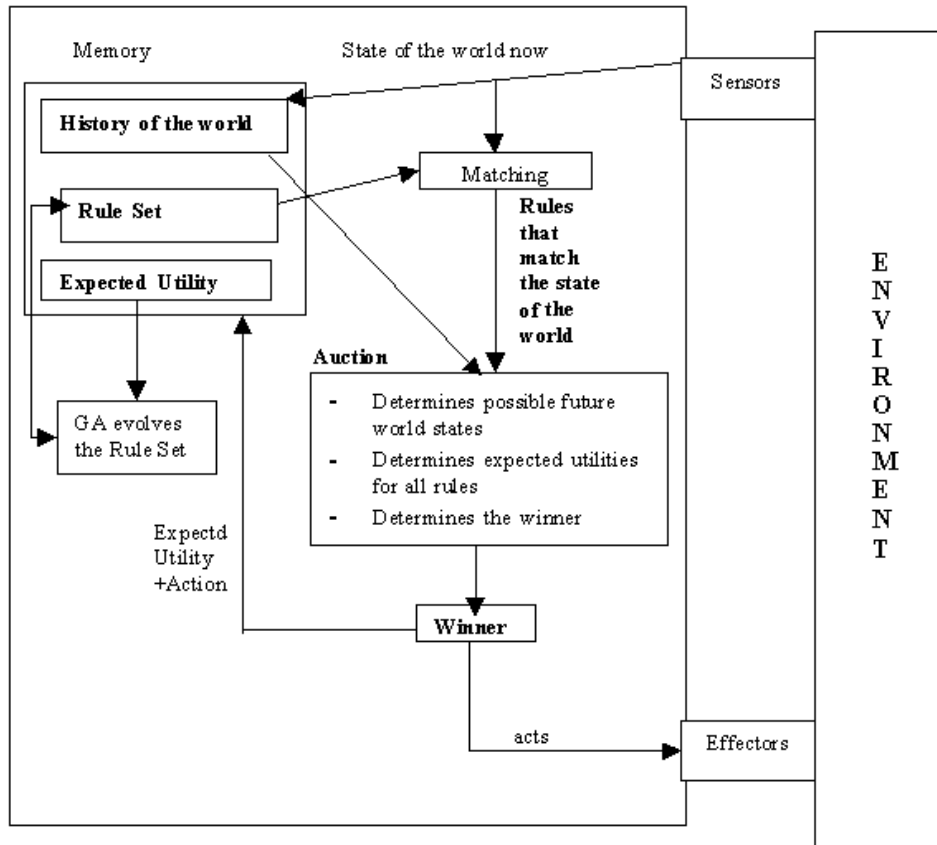
O segundo componente do agente definido no *framework* deve ser a capacidade de *antecipação*. Como vimos (Capítulo 4), um agente econômico toma as suas decisões com base nas *expectativas* que tem sobre o comportamento das variáveis relevantes, estas expectativas não estão associadas apenas a uma trajetória, mas a, eventualmente, muitas trajetórias, possíveis para o comportamento do ambiente. Cada trajetória tem um grau de certeza (precisão da estimativa) e de confiança. A escolha do agente é aquela expectativa que possua o melhor resultado (em relação a alguma função objetivo) e os melhores graus de certeza e confiança.

O terceiro componente é uma *função objetivo*. Esta função é diferente para cada agente. A função objetivo pode ser uma função utilidade (como em Rivero, Storb & Wazlawick, 1998) mas também pode, por exemplo, associar outros componentes como custos, lucros, parcela de mercado (para empresas) ou nível de salário e consumo (para famílias). Isto significa que também a nossa função objetivo deve ser definida como um objeto que permita a utilização de um protocolo padrão.

Deverá haver também um conjunto mínimo de *diretivas de comunicação* que permitam aos agentes comprar e vender, pagar, contratar etc. Estas diretivas não precisam ter uma base em atos de fala (Searle, 1969) ou outra teoria de comunicação, mas devem ser suficientemente independentes da implementação dos agentes para que possam ser

ampliadas e até modificadas no sentido de incorporar uma linguagem específica de comunicação de agentes como KQML.

Um agente com estas características foi proposto por Rivero, Storb & Wazlawick (1998). Este agente tem a seguinte estrutura (figura 7):



**Figura 7 - Modelo de Agente Antecipatório (Rivero, Storb, Wazlawick, 1998)**

A estrutura mostrada na figura 7 é uma visão genérica dos fluxos de informação do agente antecipatório proposto. Os componentes do modelo são:

- a) *History of the world* é uma coleção de pares que combinam estados do mundo e ações tomadas nestes estados;
- b) *Rule Set* é uma coleção de triplas de condições (estados do mundo) ações e força. Estas triplas podem ter a forma de classificadores (Goldberg, 1989, Holland et al. 1996), mas este modelo pode ser implementado de maneira a permitir outros esquemas alternativos de representação das regras;
- c) *Expected Utility (Objective Function)* expressa a *felicidade* do agente para um estado do mundo. Esta *felicidade* pode estar associada a um valor que o agente tentará aumentar com suas ações;



- d) *GA* é um mecanismo adaptativo que permite a evolução do conjunto de regras pode ser um algoritmo genético, mas no *framework* é implementado como um objeto independente e, portanto, pode ser alterado pelo usuário do modelo;
- e) *Matching* é o processo que, dada uma situação do mundo, seleciona quais as situações mais semelhantes encontradas na memória do agente e associa estas situações a alguma regra (ou conjunto de regras);
- f) *Auction* é o processo que escolhe qual a regra ou conjunto de regras o agente espera que leve a um maior valor da sua função objetivo;
- g) *Winner* atua via *effectors* e atualiza na memória a utilidade esperada e a ação tomada.

### 7.1.1 Componentes do Agente

O agente proposto neste trabalho tem os seguintes componentes:

- a) um conjunto de sensores que vai permitir ao agente *perceber* um determinado estado do mundo -  $S = (s_1, s_2, s_3, \dots, s_n)$ ;
- b) um conjunto de atuadores que possibilitam ao agente alterar o estado do mundo -  $E = (e_1, e_2, e_3, \dots, e_m)$ ;
- c) uma *memória de curto prazo (STM)* que armazena os últimos estados do mundo observados;
- d) uma *memória de longo prazo (LTM)* que armazena os estados do mundo categorizados pelo agente. Estes estados do mundo estarão conectados a *situações*;
- e) uma função objetivo (*função utilidade*) que associa um valor a estados do mundo esperados;
- f) Um mecanismo de seleção que estabelece quais, dentre os estados do mundo possíveis qual o que tem maior valor para a função objetivo do agente. Este mecanismo também incorpora o processo de descoberta de novas combinações para os estados do mundo possíveis.

## 7.1.2 Definição do Modelo de Seleção de Situações

Os principais componentes desta definição formal podem ser encontrados no artigo de Rivero, Storb & Wazlawick (1998). Faremos a seguir uma discussão de como esta definição se integra à discussão estabelecida nos capítulos 2, 3 e 4.

### 7.1.2.1 Estados do Mundo

Definimos  $w_s$  como o estado do mundo no tempo  $s$ . Chamamos então  $w_s$  como um vetor de  $p$  variáveis ambientais ( $ev$ ). Temos então o vetor  $w_s = (ev_{s,1}, ev_{s,2}, \dots, ev_{s,p})$ , sendo cada  $ev_{s,i}$ ,  $1 \leq i \leq p$  com valores em  $\mathbb{R}$ .

### 7.1.2.2 Situações

Uma situação representa um conjunto de estados do mundo de tamanho arbitrário que o agente observa. Na memória de curto prazo (STM) situações serão conjuntos de valores observados em um intervalo recente (em um intervalo de tamanho  $q$ , que vai de  $s-q$  até o tempo presente  $s$ ). Na memória de longo prazo (LTM) as situações estão categorizadas; isto significa que uma determinada situação armazenada na LTM representa um *caso* que pode ser recuperado a partir de uma medida de similaridade. Temos então que uma situação categorizada ( $S$ ) de tamanho  $l$  no tempo  $s$  é  $S = (S_1, S_2, \dots, S_l) = (w_{s-l+1}, w_{s-l+2}, \dots, w_{s-1}, w_s)$ .

### 7.1.2.3 Ações

As ações ( $a$ ) tomadas pelo agente no tempo  $s$  podem modificar o estado do mundo. As mudanças ocorridas entre  $s$  e  $s + 1$  podem ser medidas por  $r_s = w_{s+1} - w_s$ . Uma ação pode ser *composta* por um conjunto de *ações primitivas* que um atuador pode executar. Uma *ação composta*, então, pode ser representada com um vetor  $v^a \in \mathbf{N}^u$  (sendo  $u$  o tamanho do universo de ações simples). Por simplicidade, esta caracterização pressupõe que a ordem de execução das *ações primitivas* na *ação composta* é irrelevante para os seus efeitos.

### 7.1.2.4 Similaridade de Situações, Ações e Resultados

Em Rivero, Storb e Wazlawick (1998) é definida a norma euclidiana como medida de similaridade de situações, ações e resultados. O uso da norma euclidiana é apenas um exemplo paradigmático para caracterizar a possibilidade do uso de uma medida de similaridade para situações, ações e resultados. Podem e devem ser experimentadas outras medidas de similaridade de situação para o agente.

A medida de similaridade está diretamente relacionada com o modelo de categorização de situações. Uma categorização de situações é feita com uma medida de similaridade. Esta mesma medida, obviamente, deve ser utilizada no reconhecimento das situações na STM.

O agente espera que, em situações similares, a aplicação de *ações compostas* similares leve a resultados equivalentes. Isto é, a *mudança esperada* ( $\hat{R}$ ) no mundo dada uma situação atual, é similar à *mudança observada* ( $r'$ ) quando da aplicação de uma dada ação ( $a$ ) numa situação categorizada ( $S'$ ). Não há porém nenhuma garantia que a mudança efetiva no estado do mundo seja igual à mudança esperada. O mundo é *não-ergódico*, o agente tem *racionalidade limitada*, portanto o agente pode cometer erros quanto às mudanças esperadas no mundo.

Todas as situações categorizadas vão apresentar algum grau de similaridade à situação observada, visto que a função de similaridade (*Sim*) está definida para quaisquer valores de  $S$ . Isto implica que, para todas as situações observadas teremos valores de similaridade entre 0 e 1 em relação às situações categorizadas. Isto impõe a definição de um grau de confiança para as similaridades que funcione como um *nível de corte* para os resultados. Esta medida é chamada em Rivero, Storb e Wazlawick (1998) de grau de confiança (*conf*). Esta função é uma possível implementação da idéia de grau de confiança proposta por Keynes (item 3.4.4).

Os conjuntos de ( $S'$ ,  $a'$ ) recuperados a partir de uma função de similaridade (*Sim*) onde é aplicado um grau de confiança (*conf*) não precisam ser exaustivos (i.e. cobrir todas as possibilidades para as situações), visto que o agente pode comparar apenas situações que ele observou ou gerou, armazenadas na LTM com a situação atual. Do mesmo modo, os conjuntos ( $S'$ ,  $a'$ ) recuperados não precisam ser mutuamente excludentes. Os conjuntos representados pelas situações categorizadas podem ter áreas de interseção. A somatória das similaridades recuperadas pode ser maior ou menor que 1. Esta perspectiva sobre a formação das expectativas pode ser considerada como uma primeira aproximação da perspectiva de Keynes no *Treatise on Probability* (item 4.1).

#### 7.1.2.5 A função utilidade

A função de utilidade ( $u$ ) permite ao agente estabelecer um critério para a seleção dos resultados que ele espera obter para uma determinada ação no mundo. A utilidade esperada ( $\hat{u}$ ) é uma função utilidade aplicada sobre as mudanças esperadas numa situação

atual para uma determinada ação. Deve-se lembrar que o modelo permite a existência de várias trajetórias possíveis a partir de determinado instante no tempo. A função de utilidade esperada precisa considerar, portanto, um critério qualquer para possibilitar a sua classificação. Um agente *otimista* pode estabelecer a utilidade esperada como o máximo entre as utilidades em  $t + s$  um agente *pessimista* pode pensar na utilidade esperada como o mínimo entre todas as utilidades em  $t + s$ . Este critério de seleção para a utilidade esperada pode ser entendido como um indicador do grau de expectativa do agente em relação à mudança no estado do mundo. Agentes otimistas esperam mudanças maiores no mercado, agentes pessimistas (ou mais conservadores) podem esperar mudanças menores. É claro que os operadores mínimo e máximo não são os únicos possíveis para o estabelecimento de um critério de seleção das utilidades em  $t + s$ . É possível utilizar toda uma gama de operadores para o estabelecimento da utilidade esperada. Este campo de estudo ainda está para ser explorado.

#### 7.1.2.6 Seleção da Melhor Ação

O processo de seleção da ação a ser tomada é feito em três passos:

- a) determinar as possíveis ações para cada tupla similar ao estado do mundo atual segundo os critérios de similaridade e confiança;
- b) determinar as utilidades esperadas para cada ação considerando os estados do mundo possíveis e a trajetória recente do mundo, i. e., determinar as utilidades esperadas para cada resultado esperado a partir de uma função de utilidade;
- c) comparar as utilidades esperadas e escolher uma ação vencedora.

A ação vencedora será executada e a sua força será aumentada ou diminuída de acordo com a utilidade obtida em  $t + s$ .

#### 7.1.3 O Mecanismo de Competição

O mecanismo de competição permite às ações serem selecionadas para a sua aplicação. Um tipo de mecanismo de competição pode ser o leilão de um sistema classificador. Sistemas classificadores não são porém os únicos mecanismos para seleção das ações possíveis de serem implementados. Neste trabalho é implementado um mecanismo mais simples de competição baseado no critério de maior utilidade esperada.

#### 7.1.4 Evolução do Modelo do Mundo

A evolução do modelo do mundo pode ser feita utilizando mecanismos adaptativos como sistemas classificadores (Holland, 1996). As situações categorizadas podem ser combinadas entre si para produzirem novas situações possíveis. O mecanismo para construir novas regras e situações no modelo implementado neste trabalho é um algoritmo genético.

## 8 A Implementação do *Framework*

Para a implementação do *framework* dois componentes são fundamentais. O primeiro é a estrutura que possibilite a implementação de simulações multiagentes. O segundo é a implementação do modelo do agente antecipatório propriamente dito.

O ponto de partida para a construção do modelo é a ferramenta *Mundo dos Atores* (Mariani, 1998a, 1998b), que foi modificada para permitir a construção dos modelos de simulação discreta.

O Mundo dos Atores é implementado em Smalltalk e o *framework* foi desenvolvido também nesta linguagem.

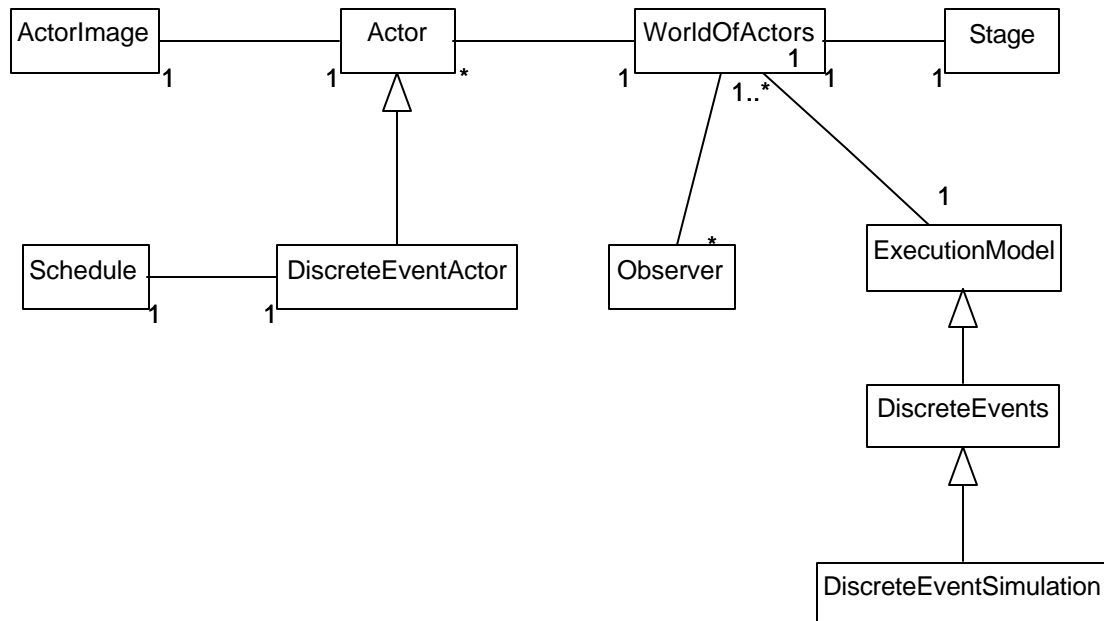
### 8.1 *Framework Multiagentes*

O modelo desenvolvido para a implementação do *framework* multiagentes está baseado sobre o *Mundo dos Atores* (Mariani, 1998a, 1998b). O mundo dos atores é uma ferramenta para o ensino de programação orientada a objetos. Sua aplicação atual, porém, é maior que sua concepção inicial. Este desenvolvimento se deu de maneira combinada pela atividade do Prof. Mariani e pelas discussões no grupo de agentes do LSC (Laboratório de Sistemas de Conhecimento). Durante as discussões sobre diversos modelos de sistemas multiagentes existentes, percebeu-se que a abordagem do mundo dos atores poderia suportar uma implementação de simulações a eventos discretos. O estudo do Swarm (Minar et. al., 1996) possibilitou o conhecimento de uma abordagem de simulação multiagentes que poderia ser viabilizada no mundo dos atores.

#### 8.1.1 Modelo de Eventos Discretos

Foi desenvolvida, pelo Prof. Mariani, a implementação de uma estrutura que possibilitaria simulação a eventos discretos no mundo dos atores. Foram implementadas três classes novas no mundo dos atores. A classe `PalcoComEventosDiscretos`, subclasse de `Palco`, que controla o processo de simulação e a execução do *papel* de cada ator na simulação. Como subclasse de *Ator* foi criada a classe `AtorComEventosDiscretos`, que executa um *papel* durante o processo de simulação. Foi criada uma classe `Schedule`, associada a cada ator, onde é armazenado o seu *papel*, i.e. os métodos que o ator vai executar durante o processo de simulação. A cada passo de simulação, para cada *Ator* no `PalcoComEventosDiscretos`, é executada a

Schedule a ele associada. O processo de simulação discreta acontece até que a condição de parada seja alcançada ou que ele seja interrompido pelo usuário. Os modelos de simulação são implementados pelo usuário utilizando as classes `AtorComEventosDiscretos` e `PalcoComEventosDiscretos`. Esta foi a versão 4.8 da ferramenta.



**Figura 8 - Mundo dos Atores - Classes Básicas para Simulação a Eventos Discretos**

Posteriormente, a partir da experiência na implementação das simulações, foi implementada uma nova versão (5.0) onde os componentes responsáveis pela visualização e pela execução dos modelos foram separados. Foi criada também uma versão em inglês da ferramenta (Figura 8).

A classe `Actor` teve os comportamentos da sua imagem separados da sua execução básica. Para isto foi criada a classe `ActorImage`. A classe `WorldOfActors` teve a sua visualização separada no componente `Stage` passando a responder apenas aos métodos necessários à execução das aplicações .

Um conceito que foi discutido e posteriormente implementado nas simulações foi a noção de *observador*. Um observador, assim como no `Swarm`, é um componente que permite a recuperação de informações dos atores durante um processo de simulação a eventos discretos sem interferir nesta execução. A classe que implementa esta idéia é `Observer`. É o observador que possibilita a visualização e gravação em arquivos dos dados de uma simulação.

A primeira implementação do mundo dos atores utiliza Smalltalk Express, posteriormente a ferramenta foi migrada para o ambiente VisualWorks, o que permite a sua utilização em várias plataformas de sistemas operacionais. Atualmente está em curso o desenvolvimento de uma nova ferramenta utilizando os conceitos desenvolvidos utilizando para isso Squeak Smalltalk.

### 8.1.2 As Classes para Simulação Econômica

A implementação das classes para simulação econômica segue alguns requisitos básicos de modelagem que estão associados à concepção da economia como um sistema dinâmico-evolutivo-complexo (Holland & Miller, 1991; Ekdahl, Astor & Davidsson, 1994; Davidsson, 1996; Rivero, Storb & Wazlawick, 1998). Estes princípios norteiam a construção das classes de agentes implementadas e dos esquemas de comportamento das classes (`Schedules`):

- a) Há vários *tipos* diferentes de agentes (consumidores, empresas, governo, banco central), consumidores e empresas com muitas instâncias do mesmo tipo de agente. Cada uma destas instâncias pode exibir comportamento levemente diferente.
- b) As estratégias dos agentes são continuamente testadas e modificadas dependendo do resultado das interações entre os agentes, ou seja, os agentes adaptam seu comportamento as condições de um mundo em permanente transformação.
- c) O comportamento dos agentes é influenciado pelas suas crenças sobre o comportamento futuro do sistema. Estas crenças são baseadas em algum tipo de antecipação sobre o funcionamento do sistema.
- d) O comportamento global do sistema emerge a partir do comportamento individual dos agentes.

Isto significa que o modelo é formulado como um sistema multiagentes onde os participantes são heterogêneos (a), adaptativos (b) e antecipatórios (c).

### 8.1.3 Características do *Framework*

Um dos princípios de construção do *framework* é a sua total integração à linguagem de desenvolvimento (Smalltalk) o que permite a implementação de novos componentes de software desenvolvidos na linguagem de implementação ou como



módulos *linkados*. Isto permite dizer que este *framework* é uma ferramenta aberta e expansível, isto é, a implementação de novos modelos de agente, a construção de novas aplicações econômicas vai se dar sempre na linguagem de implementação (Smalltalk) o que aumenta enormemente a reusabilidade das aplicações desenvolvidas.

### 8.1.4 Classes Básicas de Simulação Econômica

As classes implementadas para simulação econômica são:

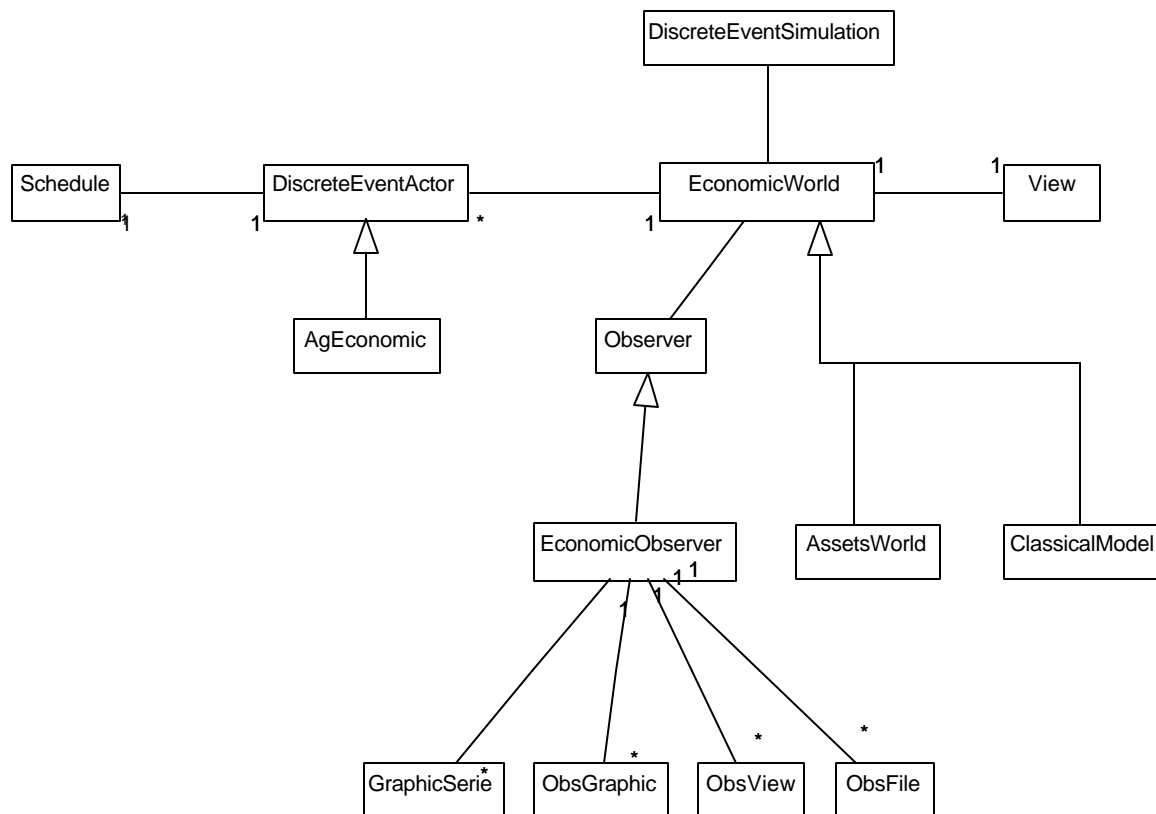


Figura 9 - Classes Básicas para Simulação Econômica

`EconomicWorld` - Subclasse de `WorldOfActors`. Implementa os métodos para controle do processo de simulação (`start`, `stop`, `pause`) para a execução dos observadores e para a inclusão dos atores no mundo (`fiatWorld`). Todos os modelos de simulação são implementados como subclasses de `EconomicWorld`. Foram feitas duas implementações com o objetivo de testar o modelo do agente adaptativo (`AssetsWorld`) e o funcionamento do modelo multiagentes (`ClassicalModel`).

`EconomicObserver` - Subclasse de `Observer`. Implementa métodos específicos para a geração de arquivos e gráficos das simulações.

AgEconomic - Subclasse de DiscreteEventActor. Implementa métodos e variáveis de instância básicos dos agentes econômicos (cash, credit:, debit, pay:to:, addInsume:).

## 8.2 Agente Adaptativo - uma Implementação

O agente adaptativo (AgEconomicAdaptive) implementado neste trabalho é uma versão simplificada do modelo desenvolvido em Rivero, Storb & Wazlawick (1998) e no capítulo 7. Este modelo foi desenvolvido dentro de um experimento com o mercado de ações (AssetsWorld). O agente adaptativo específico é a classe (AgFinancial que é subclasse de AgEconomicAdaptive).

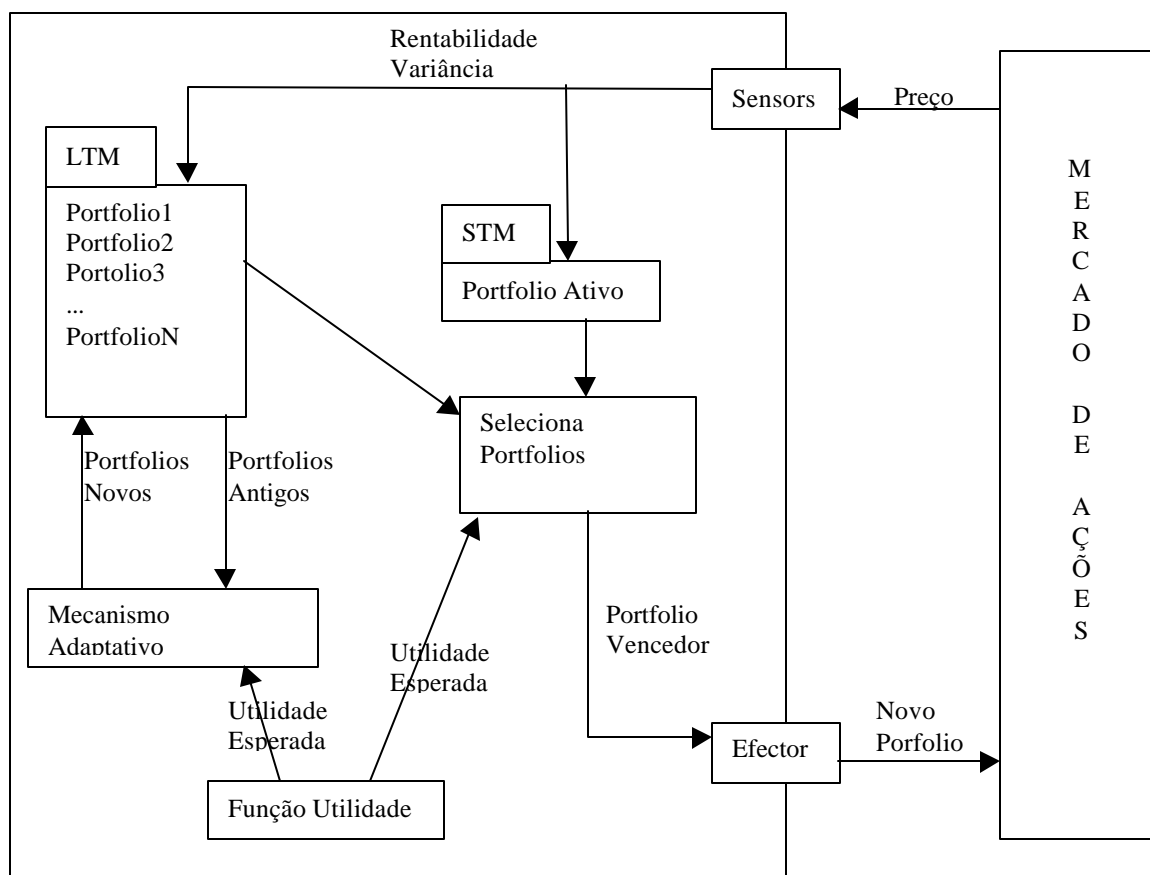


Figura 10- Agente Adaptativo implementado

O agente implementado neste trabalho (Figura 10) tem os seguintes componentes:

- sensores* - O agente recupera um os dados do ambiente a partir de um conjunto de métodos que lhe permitem recuperar os dados do mercado (MktAssets) ;

- b) *atuadores* - O agente pode comprar e vender ações usando métodos para comprar e vender ações;
- c) *memória de curto prazo (STM)* - O principal componente da memória do agente é o *portfolio (Portfolio)*. O *portfolio* é composto de ações de *portfolio (PortfolioAssets)* que contém as suas informações de preço. Os valores de preço atual, utilidade, utilidade esperada, das ações *portfolio* em que o agente está investindo compõem a memória de curto prazo do agente;
- d) *memória de longo prazo (LTM)* - Além do *portfolio* em que está aplicando, o agente mantém também uma população de *portfolios (searchPortfolios)* que é continuamente modificada pelo algoritmo genético. Os *searchPortfolios* incorporam valores para utilidade e utilidade esperada.
- e) *função utilidade* - A função utilidade calcula tanto a utilidade atual quanto a utilidade esperada. A função utilidade implementada neste agente associa valores de rentabilidade e risco. Esta função também é utilizada como função de *fitness* para o mecanismo adaptativo;
- f) *mecanismo adaptativo e de seleção* - O mecanismo adaptativo é um componente do agente que, nesta implementação, utiliza um algoritmo genético para a evolução e seleção dos *portfolios*. Este algoritmo genético é um componente também implementado em Smalltalk.

A principal diferença do agente implementado para o modelo proposto é que o esquema de categorização de situações não foi implementado. A avaliação feita no decorrer do trabalho foi que a implementação completa do esquema de categorização de situações envolvia a solução do problema de qual seria modelo mais adequado para a memória do agente. Embora seja possível trabalhar sobre a hipótese que alguma rede neural auto-organizável seja um bom ponto de partida para a categorização das situações, ainda assim a solução do problema de como tratar situações de tamanhos diferentes e de como podem ser comparadas.

### 8.3 AssetsWorld

O modelo onde o agente artificial está implementado é uma simplificação extrema do comportamento dos agentes em um mercado de ações. O modelo tem dois tipos de agente: O agente financeiro (`AgFinanc`) e o Mercado (`MktAssets`). Os agentes se comunicam apenas com o mercado de ações para atualizar o valor das ações em seu portfólio e para comprar e vender ações. Não há comunicação entre os agentes.

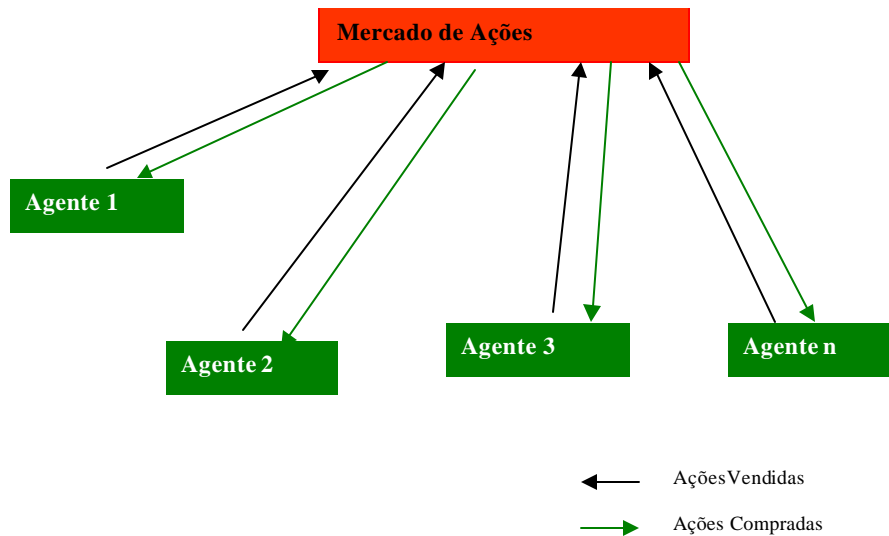


Figura 11 - AssetsWorld: Fluxos de Informação

O agente financeiro objetiva conseguir um valor satisfatório para a seguinte função utilidade:

$$u = aE(r) + bS^2$$

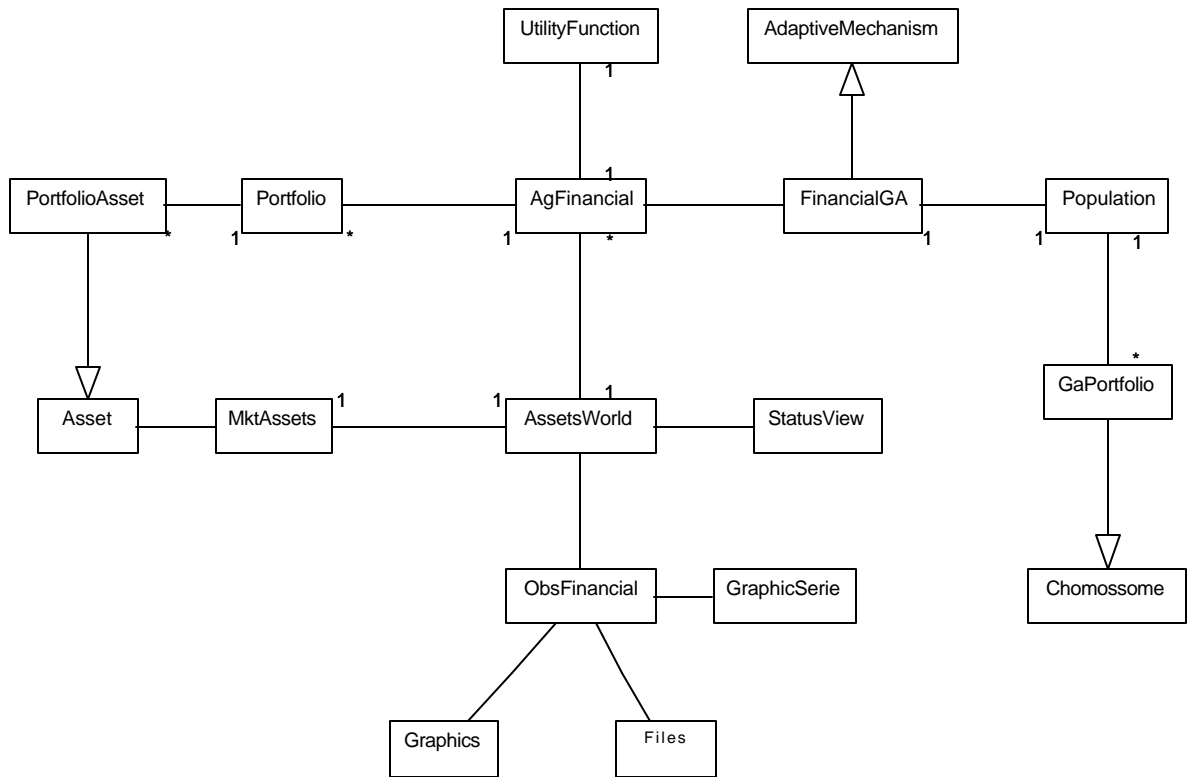
onde:

$E(r)$  é retorno esperado do portfólio

$S^2$  é a variância do portfólio

$a (> 0)$  e  $b (< 0)$  são dois fatores de ponderação que permitem aos agentes estabelecerem qual o grau de influência que cada uma das duas variáveis tem na utilidade. Um agente mais disposto ao risco, por exemplo, teria valores pouco negativos para  $b$ . Como cada agente tem a própria função utilidade, pode-se implementar vários perfis de agente em uma mesma simulação.

O modelo completo das classes implementadas é:



**Figura 12 - AssetsWorld: Classes Implementadas**

FinancialGA utiliza um algoritmo genético para evoluir os portfólios. O algoritmo genético é um componente incorporado ao framework. A expectativa é melhorar este componente e implementar outros mecanismos adaptativos (como redes neurais e sistemas classificadores) tornando possível o desenvolvimento de agentes que implementem completamente o modelo descrito no capítulo 7

Uma visão da Execução do AssetsWorld:

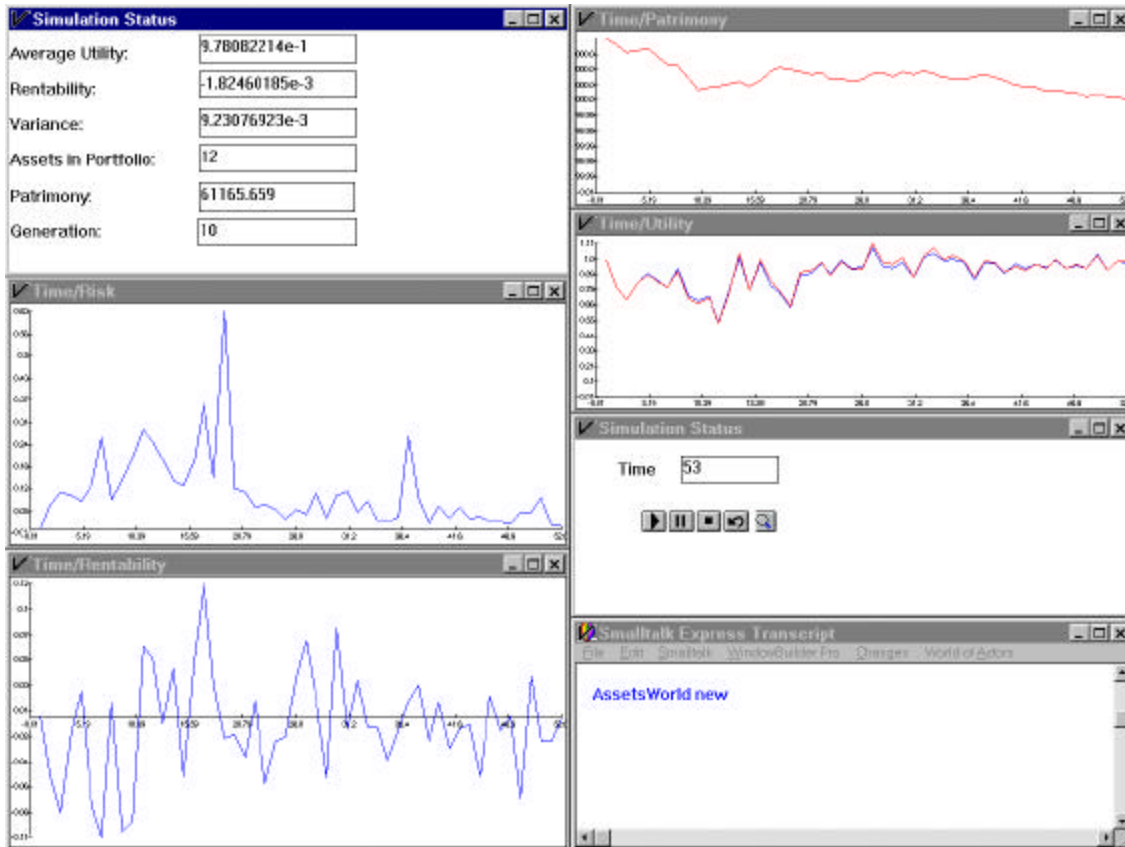


Figura 13 - Janela da Execução do AssetsWorld

Esta janela mostra o estado final da execução de uma simulação do AssetsWorld utilizando dados semanais da Bovespa para 1995. A execução do mundo é feita com um `doIt` sobre o texto `AssetsWorld new`. Todo o comando do processo de simulação é feito a partir dos botões incorporados na janela `SimulationStatus`.

As janelas com gráficos e a janela com resultados numéricos são geradas pelos observadores. Os observadores são componentes de software que permitem, durante o processo da execução da simulação, a coleta de dados sobre os valores das variáveis de instância dos agentes. Este esquema de uso dos observadores é possível devido ao fato de se utilizar a simulação a eventos discretos. Este modelo de execução da simulação possibilita que os observadores coletem dados sem nenhuma interferência no processo de simulação. As janelas mostrando gráficos são objetos específicos associados aos observadores para desenharem séries temporais para as variáveis observadas. As janelas com valores também são componentes de software específicos. Os resultados da simulação também podem ser gravados em arquivos possibilitando o seu tratamento posterior com softwares de análise de dados.

O uso de observadores possibilita também executar o mesmo experimento com diversos esquemas diferentes para a observação das variáveis de instância dos agentes. É possível, portanto, executar uma simulação com um determinado esquema de observação e, posteriormente reexecutar esta simulação com outro esquema de observação completamente diferente.

## 8.4 ClassicalModel

Esta implementação visa testar as possibilidades do *framework* de implementar uma estrutura com um grande número de agentes em interação. Nesta implementação os agentes conhecem todos os preços do mercado (racionalidade substantiva), cada agente tem uma influência mínima nos preços, e os agentes não aprendem com os erros (não são adaptativos). Estes pressupostos são os mesmos dos modelos neoclássicos mais simples (Simonsen, 1989).

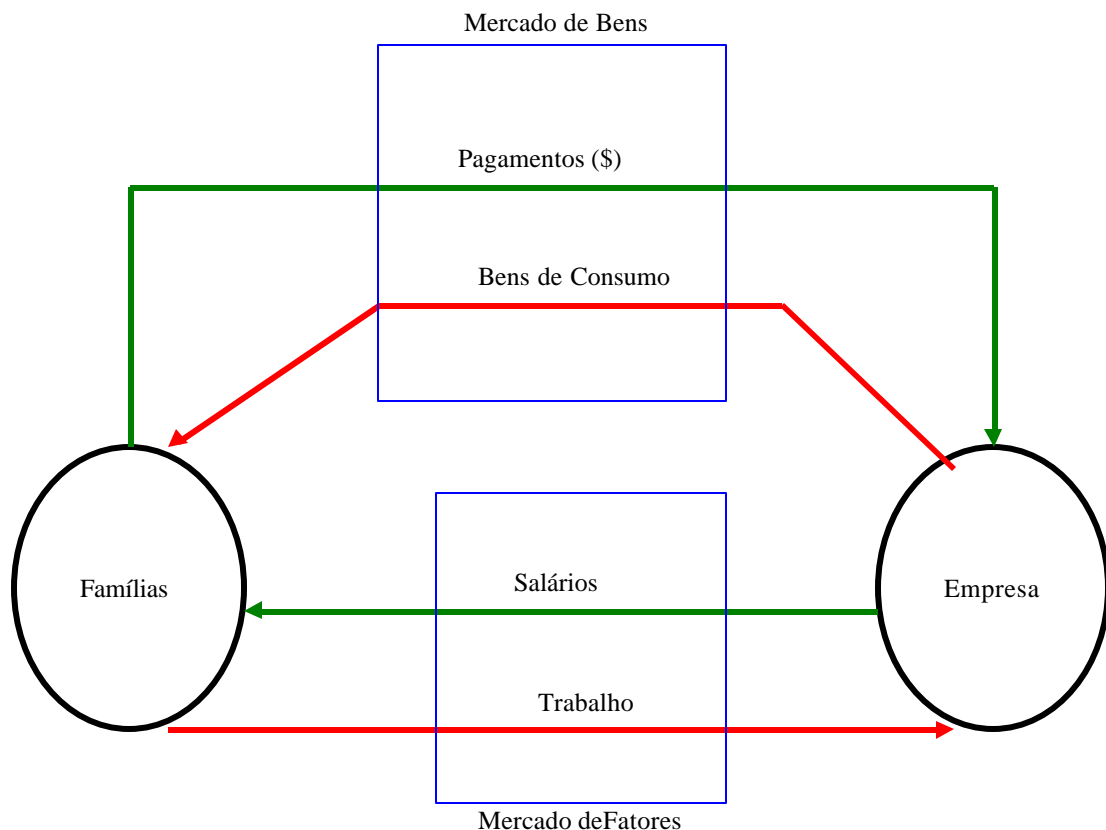


Figura 14 - ClassicalModel: Fluxos de Informação

Há apenas dois tipos de agentes neste modelo; famílias (*AgHouseholder*) e empresas (*AgFirms*). As famílias fornecem trabalho para as empresas e recebem como

pagamento um salário que é proporcional à quantidade de trabalho fornecida e ao preço contratado do trabalho. As empresas contratam as famílias pelos menores preços do trabalho oferecidos no mercado. As famílias não podem oferecer um preço que inviabilize a sua sobrevivência. Os bens produzidos pelas empresas utilizando o trabalho fornecido pelas famílias são vendidos no mercado. As famílias compram os bens que necessitam para a sua subsistência também pelo critério de menor preço.

Pode ser feito um processo de entrada e morte de agentes no mundo a partir de critérios estabelecidos no modelo (por exemplo, a empresa não ter dinheiro no caixa).

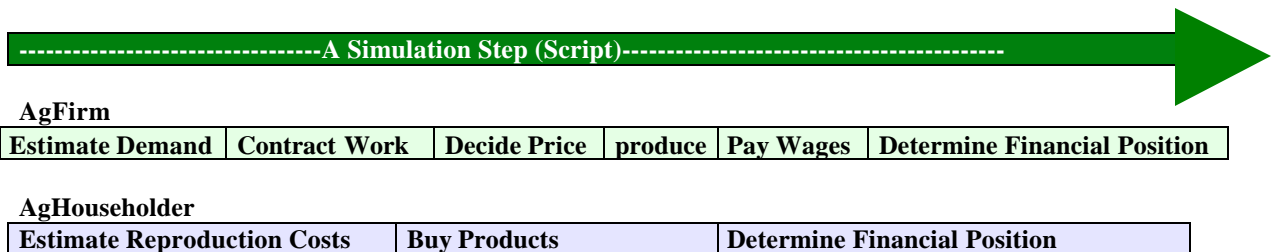


Figura 15 - ClassicalModel - Passo de Simulação (Script)

O número de agentes e as taxas de nascimento dos agentes podem ser alterados na execução das simulações.

As classes implementadas neste modelo são:

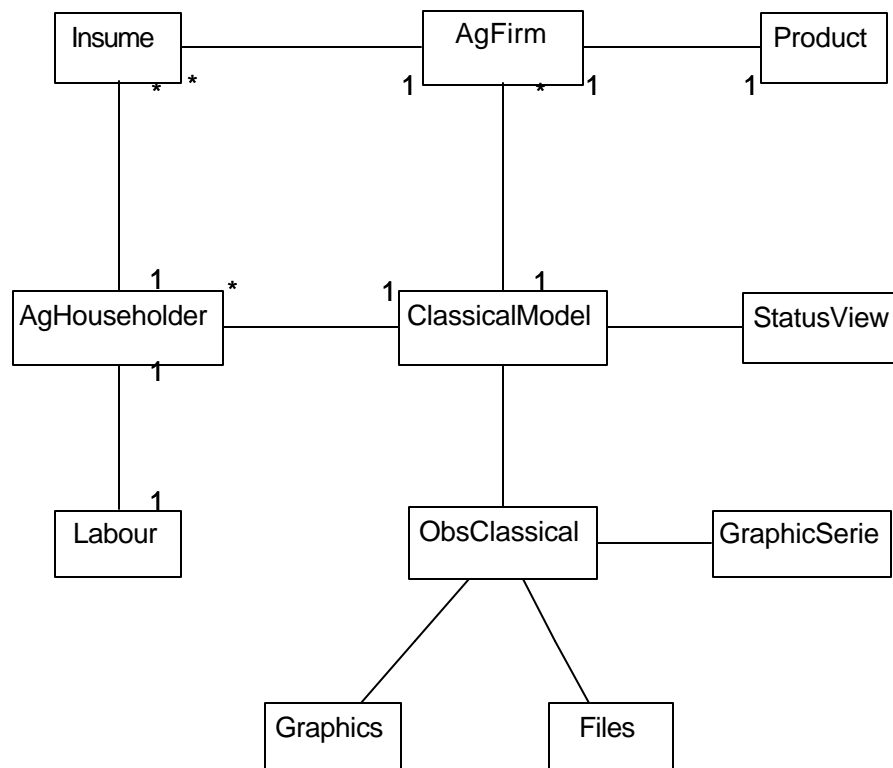


Figura 16 - ClassicalModel: Classes Implementadas



Este modelo ainda pode ser expandido com a implementação de um conjunto maior de classes que o complementem (como as classe `MktLabor` e `MktGoods`) que permitam um processo de escolha dos preços via um algoritmo genético como o implementado no ASPEN (Basu, et. al. 1996). É possível também generalizar este modelo incluindo novos tipos de agentes (como Banco Central, Banco e Governo) o que possibilitaria a implementação do modelo completo keynesiano, por exemplo.

## **8.5 Comparação com Outros Modelos**

### 8.5.1 Comparação com o modelo de Davidsson

O modelo de agente implementado difere do modelo de Davidsson (1996) em três aspectos fundamentais:

O primeiro aspecto é que a suposição de racionalidade limitada é implementada no modelo de forma plena, i.e. não é necessário supor que o agente esteja em um ambiente simplificado ou que tenha um conhecimento completo do mundo. Pelo contrário, a modelagem de agentes econômicos artificiais com comportamentos mais próximos dos agentes econômicos reais deve pressupor um conhecimento incompleto e/ou impreciso do mundo. O teste ideal para agentes com este pressuposto é exatamente o seu uso com os dados observados do mundo real.

Um segundo aspecto é o uso de um algoritmo genético como mecanismo de aprendizado, sendo o algoritmo genético um tipo de algoritmo *anytime* (em qualquer instante, é possível obter uma resposta válida), parece ser mais adequado utilizá-lo como mecanismo de aprendizado em aplicações do mundo real.

O terceiro aspecto é o uso de uma função utilidade como mecanismo para avaliação do grau de satisfação do agente em relação ao mundo. O uso deste tipo de função parece estar mais em concordância com o a modelagem tradicional dos agentes econômicos. Como a função utilidade é implementada como um componente do agente (i.e. uma classe independente com um protocolo padrão) a sua definição é suficientemente livre para o uso de diversas formulações teóricas para estas funções.

### 8.5.2 Comparação com o Swarm

O *framework* implementado incorpora, assim como o Swarm, a idéia da execução a eventos discretos implementada na classe `Schedule`, a separação entre execução e observação e a possibilidade de incorporação de novo código (novos

componentes implementados em Smalltalk ou dll's). A portabilidade do *framework* implementado, porém, é maior que o Swarm, visto que a sua implementação em VisualWorks e a próxima portagem para Squeak Smalltalk permite a execução nas plataformas de sistema operacional mais importantes.

Estão em desenvolvimento, na versão Squeak uma implementação do KQML que pode ser usado como linguagem de comunicação para os agentes econômicos e a execução distribuída dos modelos. O KQML vai permitir a implementação de protocolos padrão para os agentes desenvolvidos no *framework* e a eventual incorporação de agentes desenvolvidos em outras linguagens aos modelos. A execução distribuída possibilitará o uso de diversas máquinas ligadas em rede. Isto é uma característica importante a ser incorporada ao software, visto que os componentes como algoritmos genéticos e redes neurais demandam muito recurso computacional que geralmente não está disponível em quantidade suficiente em máquinas isoladas. O uso da rede, aliado à portabilidade do software, pode resolver o problema da demanda computacional para as simulações utilizando eficazmente os recursos existentes.

### 8.5.3 Comparação com o SDML

O SDML é o *framework* para o desenvolvimento de simulações com a melhor interface entre os analisados. Esta interface, e o uso de uma linguagem declarativa para as simulações são os elementos mais importantes a serem destacados na ferramenta. A definição de uma linguagem e de uma interface sobre o Smalltalk, porém, impõe uma restrição séria à incorporação de componentes de software ao *framework*, deixando o desenvolvimento destes componentes restrito à linguagem de implementação dos modelos (SDML). Neste sentido, o *framework* desenvolvido aqui apresenta uma completa integração da ferramenta com a sua linguagem de implementação (um princípio herdado do Mundo dos Atores). Os modelos de simulação implementados são desenvolvidos em código Smalltalk sem a necessidade de uma *linguagem de implementação* do comportamento dos atores, como no SDML. O que permite uma liberdade muito maior na ampliação das características do modelo (implementação distribuída, KQML, incorporação de *legacy code*, por exemplo).

### 8.5.4 Quadro Resumo da Comparação entre os *Frameworks*

Apresentamos a seguir um quadro resumo comparativo dos *frameworks* analisados e do implementado neste trabalho:

<b>Característica</b>	<i>Framework</i>	<b>JAFMAS</b>	<b>SWARM</b>	<b>SDML</b>	<b>Mundo Econômico</b>
Tratamento de Eventos Discretos		não	sim	sim	sim
Agentes Heterogêneos		sim	sim	sim	sim
Diretivas de Comunicação		sim	não	não	em implantação
Integração da Linguagem com o <i>Framework</i>		sim	sim	não	sim
Independência de S.O.		sim	não	Relativa <sup>28</sup>	sim
Execução Distribuída		sim	relativa <sup>29</sup>	não	em implantação
Interface Gráfica para Desenvolvimento		não	não	sim	não
Incorporação de Código já Desenvolvido		sim	sim	não	sim
Incorporação de Novas Características		sim	sim	não	sim
Linguagem de Desenvolvimento		Java	ObjectiveC	Smalltalk	Smalltalk
Linguagem de Implementação dos Modelos		Java	ObjectiveC	SDML	Smalltalk

**Tabela 3 - Quadro comparativo dos frameworks**

<sup>28</sup> O SDML pode ser implementado em todos os sistemas operacionais para os quais há uma versão do VisualWorks.

<sup>29</sup> A implementação distribuída pode ser conseguida através da incorporação de código na programação dos agentes que suporte este tipo de abordagem (p. ex. algoritmos genéticos que executem de forma distribuída).

## 9 Conclusões e Recomendações

A racionalidade limitada pode ser considerada como uma noção adequada para a implementação de modelos de agentes artificiais para simulação computacional. O Modelo de agente proposto em Rivero, Storb & Wazlawick (1998) e discutido no capítulo 7 deste trabalho consegue mapear as principais suposições de modelos de racionalidade limitada para um modelo passível de implementação computacional.

A noção de agente antecipatório pode ser usada como a noção de expectativa de modelos de agente com racionalidade limitada. Isto permite uma aproximação dos modelos de racionalidade limitada e de agentes antecipatórios e, portanto, a construção de modelos computacionais de agente antecipatório com racionalidade limitada.

O modelo do agente implementado neste trabalho pode ser considerado como uma melhor representação para modelos de agente econômico com racionalidade limitada, do que os modelos analisados, isto se deve basicamente a três aspectos do modelo: a inclusão da função utilidade como um componente do modelo de agente antecipatório; a inclusão do conceito de situação como uma trajetória do mundo categorizada na memória do agente e a inclusão de um mecanismo adaptativo para descoberta de novas categorias e padrões de ação. Estes componentes diferenciam o modelo implementado dos modelos analisados.

O *framework* implementado neste trabalho incorpora as principais características dos *frameworks* existentes possibilitando assim implementações de modelos econômicos e a experimentação computacional de simulações econômicas utilizando agentes.

As principais características que diferenciam o *framework* implementado neste trabalho dos analisados são: estrutura aberta da ferramenta permitindo a sua expansão (implementação de novas características, uso de componentes de software já desenvolvidos, etc.).

A modelagem de sistemas econômicos utilizando uma abordagem de agentes permite uma maior liberdade na construção dos modelos, (pode-se relaxar as restrições sobre a consistência mútua das percepções dos agentes, por exemplo). Isto impõe, porém, uma maior complexidade na descrição do comportamento dos agentes e na checagem da coordenação destes comportamentos. Esta complexidade pode ser melhor tratada caso seja

possível estabelecer algum mecanismo formal para a descrição dos comportamentos individuais dos agentes e da coordenação entre eles. Uma abordagem que pode permitir isto é o uso de redes de petri como mecanismo de descrição. Uma primeira aproximação desta abordagem foi feita por Chauan(1997), porém, uma definição completa para o seu uso ainda é um problema em aberto.

### 9.1 Mundo dos Agentes

A idéia básica desta nova implementação é utilizar as classes do mundo dos atores para a construção de um núcleo para o desenvolvimento de sistemas multiagentes (*Agents World*). O Squeak Smalltalk foi escolhido pela sua portabilidade (virtualmente para qualquer plataforma existente no mercado) e pelo fato de o código do Squeak ser completamente aberto (inclusive a máquina virtual) o que permite uma flexibilidade muito maior implementação dos métodos.

A nova implementação (*AgentsWorld*) terá como características principais:

- a) execução distribuída dos agentes;
- b) comunicação entre os agentes via linguagem de comunicação de agentes (KQML);
- c) visualização independente da execução;
- d) modelos de execução a eventos discretos e paralelo.

A partir do *AgentsWorld* deve ser implementado o novo *framework* para simulação multiagentes. Como as classes específicas da estrutura de simulação (como *Schedule*, *Observer*, *GraphicSerie*, etc) devem permanecer com o mesmo protocolo, uma boa parte do código já implementado no *framework* de simulação econômica poderá ser aproveitada.

Uma necessidade observada durante a construção do *framework* é de uma ambiente gráfico para o desenvolvimento das aplicações multiagentes e dos próprios agentes. Este ambiente facilitaria o desenvolvimento das aplicações permitindo ao desenvolvedor concentrar-se nos problemas associados ao modelo sem perder muito tempo com os detalhes de implementação.

Um elemento que poderia ser incluído nos agentes é algum tipo de componente declarativo para a descrição do comportamento dos agentes. Este componente poderia ser uma estrutura que implementasse restrições às variáveis ou para a execução dos métodos.

## 9.2 *Simulação Multiagentes*

A ampliação das características da ferramenta de simulação multiagentes é um processo que não se encerra no trabalho da dissertação. As classes básicas estão implementadas e é possível construir modelos econômicos com elas, porém, para que a ferramenta possa ser usada por economistas sem treino com linguagens de programação, é necessária a implementação de componentes que permitam o uso de modelos semi-prontos e a interação com o ambiente a partir de uma interface gráfica. Para isto é necessária a implementação de classes com os principais modelos de agentes utilizados pelos economistas e de uma ferramenta para a construção de cenários econômicos dentro do *framework*. Esta ferramenta de cenários permitiria uma maior flexibilidade no teste dos modelos implementados.

Uma outra tarefa que pode ser vislumbrada é o desenvolvimento de simulações para problemas econômicos do mercado financeiro e da economia brasileira. Para simulações do mercado financeiro é necessária a implementação de um modelo completo do mercado de ações e o seu teste com dados reais de longo prazo de bolsa de valores. Para a implementação de um modelo de microssimulação para a economia brasileira é preciso desenvolver as classes que representem governo, bancos e diversos tipos de empresas (bens de capital, serviços, informais, etc.), mapear a distribuição das participações das empresas por setor econômico bem como as relações interindustriais e finalmente implementar os processos de estabelecimento de preços de bens e serviços nos mercados. Um bom ponto de partida para este trabalho pode ser o modelo ASPEN (Basu, et. al. 1996).

## 10 Bibliografia

- [1] Arthur, W. B. et. al. (1996) Asset Pricing Under Endogenous Expectations in an Artificial Stock Market, *SFI Working Paper* 96-12-093.
- [2] Arthur, W. B., Darlauf S. N. & Lane, D. A. (eds.) (1997) *The Economy as an Evolving Complex System II*. Reading, MA, Addison-Wesley. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity.
- [3] Barbuceanu M. & Fox M. S. (1996) The Architecture of an Agent Building Shell. In *Intelligent Agents II – Agent Theories, Architectures and Languages*. Proceedings IJCAI'95 workshop, pp. Montreal, Springer, pp. 235-250.
- [4] Basu, N. et. al. (1996) *ASPEN: A Microsimulation Model of the Economy*. Sandia Report SAND96-2459, Sandia National Laboratories, october.
- [5] Billingsley, P. (1965) *Ergodic Theory and Information*. New York, NY, John Wiley & Sons.
- [6] Burkhart, R. (1997) Schedules of Activity in the SWARM Simulation System. *OOPSLA '97 – Workshop on OO Behavioral Semantics*. <http://www.santafe.edu/projects/swarm>. Dez-1998.
- [7] Carrol, P.(1994) *Big Blues: A Derrocada da IBM*. Rio de Janeiro, Ediouro.
- [8] Carvalho, F. C. (1989) Fundamentos da Escola Pós-Keynesiana. In *Ensaio sobre economia Política Moderna: Teoria e História do Pensamento Econômico*. São Paulo, Marco Zero.
- [9] Castelfranchi, C. (1996) To Be or Not to Be an Agent. *Proceedings of the Third international Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages*, Springer-Verlag.
- [10] Chauan, D. (1997) *A Java-Based Framework for Multiagent Systems Development and Implementation*. ECES Department, University of Cincinnati, (Phd thesis).
- [11] Chick, V. (1993) *Macroeconomia após Keynes: um reexame da Teoria Geral*. Rio de Janeiro, Forense Universitária.
- [12] Cockayne W. A. & Zyda M.(1997) *Mobile Agents: Explanations and Examples*, BBC Books.
- [13] Davidson, P. (1991) Is Probability Theory Relevant for Uncertainty? A Post Keynesian Perspective. *Journal of Economic Perspectives*, v. 5, n. 1, winter.
- [14] Davidsson, P. (1996) *Autonomous Agents and the Concept of Concepts*, Lund, Sw, Department of Computer Science, Lund University, (Ph.D. Thesis)
- [15] Dennet, 1987. *The Intentional Stance*. MIT Press. Cambridge, MA.
- [16] Dosi, G. (1982) Technological Paradigms and Technological Trajectories: A Suggested Interpretation of the Determinants and Directions of Technical Changes, *Research Policy*.
- [17] Durfee, E. H., Lesser, V. R.. & Corkill, D.D, (1989). Trends in Cooperative Distributed Problem Solving. *IEEE Transactions in Knowledge Data Engineering*, v. 11, n. 1.
- [18] Ekdahl, B. Approximation of Anticipatory Systems. in 4<sup>th</sup>. *International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis - ISAS'98*. (Proceedings) v. 2. Orlando-FL, july, 12-16, 1998.
- [19] Ekdahl, B. Astor, E. Davidsson P. (1994) A Framework for Autonomous Agents Based on the concept of Anticipatory Systems. In R. Trappl, ed. *Cybernetics and Systems '94*, pp. 1427-1434, World Scientific.
- [20] Englemore, R & Morgan, T. (1988) *Blackboard Systems*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- [21] Franklin, S. & Graesser, A. (1996) Is it an Agent or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents. *Proceedings of the Third international Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages*, Springer-Verlag
- [22] Goldberg, D. E. (1989) *Genetic Algorithms: in Search Optimization and Machine Learning*, Reading, MA, Addison-Wesley.
- [23] Haykin, S. (1994) *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. IEEE Computer Society Press, New York.

- [24] Heilmann, K. et. al. (1995) Intelligent Agents: A Technology and Business Application Analysis. *BA248D: Telecommunications and Distributed Processing*, <http://haas.berkeley.edu/~heilmann/agents/>, 29-09-1997
- [25] Holland, J. H. & Miller J. H. (1991) Artificial Adaptive Agents in Economic Theory, *American Economic Review*, May, pp. 365-370
- [26] Holland, J. H. (1988) The Global Economy as an Adaptive Process. in *The Economy as an Evolving Complex System II*. pp. 117-124, Redwood, CA, Addison-Wesley. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Anderson, P. J. Arrow, K. J. & Pines, D. (eds.).
- [27] Holland, J. H. et. al. (1996) *Induction: Process of Inference, Learning, and Discovery*. Cambridge, MA, MIT, 5<sup>th</sup> ed..
- [28] Huberman, B, A, & Clearwater, E. A. A (1995) Multi-Agent System for Controlling Building Environments, in *Proc. of the International Conference on Multiagent Systems (ICMAS-95)*, pp. 171-176.
- [29] Huberman, B. & Hogg, T. (1995) Distributed Computation as an Economic System, *Journal of Economic Perspectives*, V. 9, n. 1, Winter, pp. 141-152.
- [30] Jennings N. R. (1996) Coordination Techniques for Distributed Artificial Intelligence. In *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*. New York, John Wiley & Sons. GMP O'Hare & N. R. Jennings (eds.)
- [31] Keynes, J. M. (1921/1973) *A Treatise on Probability*. London, Macmillan, (Collected Writings of JMK, v. VIII)
- [32] Keynes, J. M. (1936/1985) *A Teoria Geral do Emprego do Juro e da Moeda*. 2. ed. São Paulo, Nova Cultural, (Os Economistas)
- [33] Knight, F. H. (1972) *Risco Incerteza e Lucro*. Rio de Janeiro, Expressão e Cultura.
- [34] Kohler, T. A. & Carr, E. (1997) Archaeological Applications of GIS. *Proceedings of Colloquium II, UISPP XIIIth Congress*, Forli, Italy, September 1996. Ian Johnson & MacLaren North (eds)
- [35] Kydland F. E. & Prescott, E. C. (1996) The computational Experiment: An Econometric Tool, *Journal of Economic Perspectives*, V. 10, n. 1, Winter, pp. 69-85
- [36] Langton, C. Minar, N. & Buckhart, R. (1996)
- [37] Leijonhufvud, A. (1993) Towards a Not-Too-Rational Macroeconomics, *Southern Economic Journal*, june.
- [38] Mariani, A. C. (1998a) *Introdução à Programação Orientada a Objetos: O Mundo dos Atores*. <http://www.inf.ufsc.br/poo/atores>, 30.11.98.
- [39] Mariani, A. C. (1998b) *O Mundo dos Atores: uma perspectiva de introdução à programação orientada a objetos*, Fortaleza, SBIE 98.
- [40] Marshall, A. (1985) *Princípios de Economia*. São Paulo, Abril Cultural.
- [41] McCain, R. A. (1987) Fuzzy Confidence Intervals in a Theory of Economic Rationality. *Fuzzy Sets and Systems*, n. 23, pp.205-218, North-Holland.
- [42] Merelo, J. J. (1999a) *Breeder user's and programmer's Manual*. <http://www.santafe.edu/~jmerelo/Breeder-manual>, 08-01-1999.
- [43] Merelo, J. J. (1999b) *NeuroLib user's and programmer's Manual*. <http://www.santafe.edu/~jmerelo/neurolib>, 18-12-1998.
- [44] Minar, N., et. al. (1996) *The Swarm Simulation System: A Toolkit for Building Multi-agent Simulations*. Santa Fe Institute, <http://www.santafe.edu/projects/swarm/overview/overview.html>, 18-12-1998.
- [45] Minsky, H. P. (1996) Uncertainty and the Institutional Structure of Capitalist Economics. *Jerome Levy Economics Institute Working Paper*, april.
- [46] Moss, S. & Edmonds, B (1998) Modelling Economic Learning as Modelling, *Systems and Cybernetics*, n. 29, pp.5-37, in <http://www.cpm.mmu.ac.uk/cpmrep03.html>, 16-06-1998.
- [47] Moss, S. (1996) SDML: What It Is and Why It's Like That, *Centre for Policy Modelling Discussion Papers*, <http://www.cpm.mmu.ac.uk/cpmreps.html>, 16-06-1998.



- [48] Moss, S. et al. (1997) SDML: A Multi-Agent Language for Organizational Modelling, *Centre for Policy Modelling Discussion Papers*, <http://www.cpm.mmu.ac.uk/cpmreps.html>, 16-06-1998
- [49] Nelson, R. & Winter, S. (1982) *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Cambridge: the Belknap Press.
- [50] Newell A. e Simon, H. A. (1972) *Human Problem Solving*. Englewood Cliffs – N.J., Prentice-Hall.
- [51] Paredes A. L. & Martinez, R. O. (1998) The Social Dimension of Economics and Multiagent Systems, *Workshop on Social Situated Intelligence at SAB'98*, August, 1998, Zürich, pp. 73-79, B. Edmonds & K Dautenhahn (eds).
- [52] Possas, M. L.(1995) A Cheia do *Mainstream*: Comentário Sobre os Rumos da Ciência Econômica. *Texto para Discussão 372*. Rio de Janeiro, IEI/UFRJ, março.
- [53] Possas, M. S. (1995) Notas acerca da racionalidade econômica, *Economia e Sociedade*, Campinas (5):181-87, dez.
- [54] Rivero, S. L. M. Storb, B. H.& Wazlawick, R. S. (1998) Economic Theory, Anticipatory Systems and Artificial Adaptive Agents. 4<sup>th</sup>. *International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis - ISAS'98*. (Proceedings) v. 2, pp. 64-69. Orlando-FL, july, 12-16, 1998. Publicado também em BEJE - Brazilian Electronic Journal of Economics, v.2 n.2.
- [55] Rosen, R. (1985), *Anticipatory Systems: Philosophical, Mathematical and Methodological Foundations*. Pergamon Press.
- [56] Russel, S. & Norvig, P. (1995) *Artificial Intelligence: A modern Approach*. Upper Shadle River, NJ. Prentice-Hall.
- [57] Santa Fe Institute (1999) *The Swarm Simulation System*, <http://www.santafe.edu/projects/swarm/>, 6-01-1999.
- [58] Sargent, T.(1993) *Bounded Rationality in macroeconomics*, New York, Oxford University Press.
- [59] Searle, J. (1969) *Speech Acts: An Essay in the Philosophy of Language*, Cambridge, Eng.: Cambridge University Press.
- [60] Shackle, G.L.S. (1955) *Uncertainty in Economics and Other Reflections*. Cambridge, Cambridge University Press.
- [61] Shackle, G.L.S. (1991) *Origens da Economia Contemporânea: Invenção e Tradição no Pensamento Econômico (1926-1939)*, São Paulo, Hucitec.
- [62] Simon, H. A. (1981) *The Sciences of the Artificial*, Cambridge, MIT, 2<sup>nd</sup> ed.
- [63] Simonsen, M. H. & Cysne R. P. (1989) *Macroeconomia*, Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico.
- [64] Simonsen, M. H. (1989) *Teoria Microeconômica: Teoria do Consumidor, Teoria da Produção*, v. 1, Rio de Janeiro, Fundação Getúlio Vargas, 10<sup>a</sup> ed..
- [65] Simonsen, M. H. (1994) *Ensaio Analítico*, Rio de Janeiro, FGV
- [66] Stefansson, B. (1998) *Tutorial material for Swarm users*, <http://www.santafe.edu/projects/swarm/>, 07-01-1999.
- [67] Sumpter D. J. T & Broomhead D. S. (1997) Investigating the Organization of Insect Societies using Multi-Agent Models. <http://www.ma.umist.ac.uk/dsumpter/beesim/index.html>, 6-01-1999.
- [68] The Agent Society (1998) *The Agent Society Home Page*. <http://www.agent.org/>, 18-12-1998.
- [69] Vercelli, A. (1992) Por uma Macroeconomia não Reducionista: Uma Perspectiva de Longo Prazo, *Economia e Sociedade*, n. 1, ago.
- [70] Waldspurger C. A. et al (1992) Spawn: A Distributed Computational Economy, *IEEE Trans. on Software Engineering*, v.18, n. 2, feb, pp.103-117.
- [71] Wong, E. (1971) *Stochastic Processes in Information and Dynamical Systems*. New York, McGraw-Hill.
- [72] Wooldridge, M. (1996) Agents as a Rorschach Test: A Response to Franklin and Graesser. *Proceedings of the Third international Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages*, Springer-Verlag.

- [73] Wooldridge M. & Jennings N.(1995). Agent Theories, Architectures and Languages: a Survey. In Wooldridge e Jennings eds. *Intelligent Agents*, Springer-Verlag, pp. 11-22.
- [74] Ygge, F. (1998) *Market-Oriented Programming and its Application to Power Load Management*, Lund. (Tese de Doutorado).

## 11 Anexo - Artigo

# Economic Theory, Anticipatory Systems and Artificial Adaptive Agents<sup>30</sup>

Sérgio Luiz de Medeiros Rivero

rivero@eps.ufsc.br

Graduate Program in Production Engineering , Federal University of Santa Catarina, Brazil  
Department of Economics, Federal University of Rondônia, Brazil

Bernd Heinrich Storb

bernd@inf.ufsc.br

Holder of a Scholarship of CNPq, Federal University of Santa Catarina, Brazil

Raul Sidnei Wazlawick

raul@inf.ufsc.br

Department of Computer Science and Statistics, Federal University of Santa Catarina, Brazil

## *ABSTRACT*

In this paper we propose an artificial intelligence approach to simulation in economics based on a multiagent system. The multiagent approach is based on the seminal work of Holland & Miller [21], in which the authors propose that the economic system may be viewed as a complex dynamic adaptive system with a large number of different kinds of agents and that these agents can be simulated using classifier systems. In the model developed in this article the agents take its decisions based on the anticipation of the future state of the world. The concept of anticipation is developed from the work of Davidsson [4] [2]. These agents are heterogeneous, autonomous, adaptive and anticipatory. This model is compared with the one developed by Arthur et al. [1]. In this paper are developed similarity measures between situations, actions, and changes in the world. These measures are useful for a computationally simulated economic agent to compare previous situations, actions and results, and decide which action could lead to a situation with the best utility or satisfaction degree.

**Keywords:** Multiagent Systems, Economics, Simulation, Classifier Systems, Anticipatory Systems.

---

<sup>30</sup> This article is a modified version of a work presented in the 4<sup>th</sup> Conference on Information Systems, Analysis and Synthesis - ISAS'98, held at Orlando, FL, in July 12-16, 1998 and first published in its proceedings at pp. 64-69.

# 1. INTRODUCTION

Economic systems can be considered as evolving complex systems where economic agents rationally perform actions in order to reach a better degree of satisfaction. In this way, the agents organize themselves and make decisions about producing, investing and consuming. Those decisions are taken in a context of uncertainty, and they are based on the beliefs (or expectations) that the agents have about possible future states of the environment.

Economic agents live in a complex non-stationary world. Decision problems in this kind of world are hard to solve. Therefore, consistent models for the economic agents' behavior have to consider two aspects: the uncertainty related to the environment and the limitations of the agents' rationality. Thus we will assume Simon's perspective of limited rationality. *"Theories of bounded rationality, ... are theories of decision making and choice that assume that the decision maker wish to attain goals, and uses his or her mind as well as possible to that end; but theories that take into account in describing the decision process the actual capacities of the human mind"* [13]. Our artificial economic agents have limited memory capacity to retain all its observations of the past and all its rules that allow to form expectations about the future; furthermore, they will evaluate all the time of their artificial life (this means, the whole time of simulation).

The expected future (or possible future) influences the agent's decision about his acts in order to achieve a goal (profits, for example). The expected future could be one of the factors that the agent takes into account to select the decision that leads him closer to his goal. The errors made by the agent (decisions that take the agent more distant from his goal) influence the agent's behavior. The agent tries to minimize the difference between the results of his actions and the fixed goals.

The objective of this paper is to discuss the application of artificial intelligence techniques in economic systems theory and modeling. For this, we apply the concept of anticipatory agent [14] to an economic system simulation model based on a multi-agent approach, presented for the first time by Holland and Miller [21].

Before stating our model, we discuss the relationship between computational simulation and economic theory, and we present the concepts of causal system and anticipatory system. Finally, we discuss the main differences between our model and the model of Arthur et. al. [1].

## 2. COMPUTATIONAL SIMULATION AND ECONOMIC THEORY

Historically, economic theorists have tried to find the determinants of the economic development process. Here, development can be understood as a process of structure changing of an economic system. Structure, in a restrictive sense, is the set of relations built by the agents for economic production. Therefore, economic agents are the building-blocks of an economic system. This is a characterization of an economic system that imposes a model with many components (agents) interacting dynamically. This means that economic systems are complex and dynamic systems. Furthermore, it is even more complex because the behavior of each agent is a complex behavior, and the community of agents works in a non-trivial way. We can also say that, not only the structure of the economic system emerges from the individuals' behavior, but that the agents' behavior is influenced by the structure.

For example, the introduction of a new competitor in an oligopolyc market would change the strategy of concurrent companies. Another example of interaction between strategy and structure is the market shift produced by technical innovations. A typical case is the transformation that occurred in the hardware and software industry (and market) imposed by the advent of microcomputer.

This complexity raises a question: how to insert a bit more of reality in our economic models without losing relevance? A possible answer to that question is computational simulation.

Computational simulation based on approaches may give more flexibility and explanation power to the hypothesis about agents dynamical behavior. A question derived from that statement is: what kind of simulation is possible for the economic system characterized above?

A method for solving this problem is the formulation (via econometrics) and solution (via numeric simulation) of differential non-linear equation models. This is the most used contemporary approach for computational simulation of complex economic systems. But these models have a few problems: they are hard to solve; technological progress and shifting of agents strategies generally imply in changes in the equations coefficients; the behavior of the variables cannot ever be adjusted by a probability distribution, because crucial events (investment decisions, for example) are not suitable for repetition [12] and finally the agent's strategy does not depend only on past and present states of the system, but on the agent's expectations about the future behavior of the system.

Alternative computational systems may be a good solution to define analytical/computational models with less complexity. One promising approach is the use of the concept of Artificial Adaptive Agents (AAA) stated by Holland and Miller [21].

That is, the advance of the scientific analytical methods was never a linear process. Simulation techniques, like AAA, can contribute as new tools for analyzing the complex dynamics of an economic system. These techniques may produce relevant results for improving the knowledge about the system and the analytical methods themselves. Otherwise, the existing theoretical results are the necessary starting point for the elaboration of simulations.

The notion of economic agent has an obvious parallel with the concept of agent taken from artificial intelligence. Three aspects of the artificial intelligence may contribute to the elaboration and definition of these simulation agent models:

- a) The economy can be seen as a network where each node (agent) takes decisions in order to allocate its resources without complete knowledge of the system. Those decisions are taken in a decentralized and concurrent way [9]. The strategies of each agent depends on his goals, expectations and the interaction with other agents.

- b) An adaptive behavior is a desirable characteristic of the agents that can be modeled. Many techniques may be used for the implementation of this adaptive process e.g. Classifier Systems, Genetic Algorithms, Neural Networks and other mechanisms of reinforcement learning.
- c) The use of fuzzy inference rules may be crucial to approximate the computational model to the real behavior of the agents. This kind of inference is more necessary when the agent works under uncertainty conditions. In those conditions the agents cannot forecast the future behavior of the system, but they can formulate a set of possibilities about the future behavior of the significant variables. Each of these possibilities has associated a confidence degree.

The use of classifier systems to simulate the agents' behavior in an artificial stock market was presented in a working paper published by the Santa Fe Institute [1]. The use of confidence degrees to the forecasting of future states of the world is a theme stated by Keynes in his General Theory [8]: *"The state of long-term expectation, upon which our decisions are based, does not solely depend, therefore, on the most probable forecast we can make. It also depends on the confidence with which we make this forecast – on how highly we rate the likelihood of our best forecast turning out quite wrong. If we expect large changes but are very uncertain as to what precise form these change will take, then our confidence will be weak"*.

### 3. CAUSAL SYSTEMS AND ANTICIPATORY SYSTEMS

There is an idea inherited from the behavior of the mechanical systems of physics that imposes a high restriction degree to the analysis of the dynamical behavior of a system. This idea is that the dynamical behavior of a system is completely determined by its past. This kind of system is called a *causal system*. Formally this means that,

$$w_{t+1} = f(w_1, w_2, \dots, w_t) \quad (1)$$

where,  $w_s$ ,  $0 \leq s \leq t+1$ , is the state of the system at time  $s$ ; and  $f$  represents the functional dependence between the present state and the past.

The structure of these systems varies essentially with time, but, does not formalize the influence of the possible future on the present behavior of the system. Even if the system has stochastic components, the knowledge about the probability distributions of these components provides knowledge about the dynamical behavior of the system [11].

When economic agents are considered, it can be perceived that the expectation about the future is relevant for the determination of the agents' actions. This is an idea clearly stated in economic literature since Keynes [8], [1], [9], [2]. That is, we can consider economic agents as anticipatory agents.

The notion of anticipatory agents was defined by Rosen in [1] as "*... a system containing a predictive model of itself and/or of its environment, which allows it to change state at an instant in accord with the model's predictions pertaining to a latter instant*". That is, anticipatory agents will act according to the past states of the system and according to the desirable and possible future states. Formally,

$$w_{t+1} = f(w_1, w_2, \dots, w_t, \hat{w}_{t+1}^t, \dots, \hat{w}_{t+k(t)}^t) \quad (2)$$

where  $\hat{w}_s^t$ ,  $t+1 \leq s \leq t+k(t)$ , is a prediction of  $w_s$  done at time  $t$ , and  $k(t)$  is the size of the forecasting interval at time  $t$ .

This formulation allows the agents dynamic behavior to be modeled in a more realistic form, gaining more explanatory power than a mechanistic conception. However, there is the problem of analytic solution determinations.

Here, the approach of artificial intelligence can provide a tool for the formulation and test of these kind of models without exhaustive study of its mathematical properties in a first moment. We may advance making experiments which consider the agent's behavior in a more realistic form, without needing to solve the complex equations derived from that formulation.

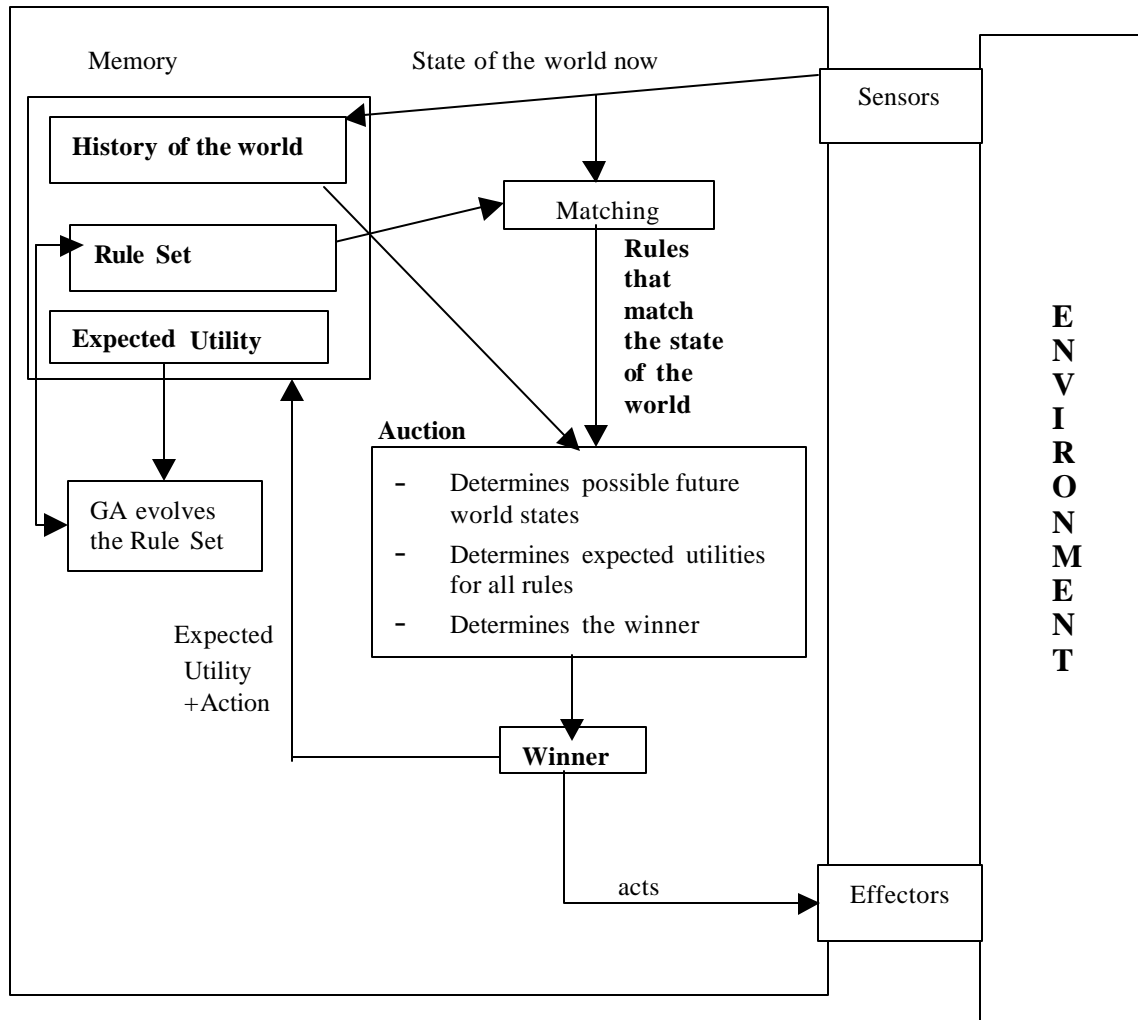
These AAA models are a complement to the analytical models, and do not intend to replace them. The study of the characteristics presented by anticipatory and adaptive, computationally formulated systems, may enhance the knowledge about its properties in a way that leads to more appropriated analytic models [21].



## 4. THE ANTICIPATORY AGENTS MODEL

The economic system model based on anticipatory agents has elements of the works of Holland and Miller [21] and Davidsson [14]. This model has the following characteristics:

- a) It has a large set of different kinds of agents (consumers, companies, government, central bank), consumers and companies with many instances. Instances of the same kind of agent may exhibit slightly different behaviors.



**Figure 1 – main architecture of the anticipatory economic agent**

- b) The agent's strategies are continuously tested and changed depending on the results of the interaction among the agents and the market. In other words, the agents adapt their behavior to the permanently changing conditions of the economic system.
- c) The global dynamical behavior of an economic system results from the interaction of all instances of the various kinds of agents in the market, i. e. this aggregate behavior emerges from individual behaviors.
- d) The agent's behavior is influenced by the beliefs it has about the future behavior of the system. This is based on some kind of anticipation about the system's way of working.

That means, our model is formulated as a multi-agent system with heterogeneous (a), adaptive (b), autonomous (c) and anticipatory (d) agents. We can say that a parallel, dynamic, evolving, multi-agent simulation is closely related to the structure exhibited by a market

economy. The decision about resource allocation in a market economy is taken by each agent. It does not exist a walrasian auctioneer or a central planner [9] to decide costs and solve the optimal allocation of productive resources. More than that, the decisions about production and investments are taken by the agents according to their expectations about the future demand. Those expectations are based on hypothesis about the future behavior of the system.

The figure 1 shows a superficial structure of our agent model. Where:

- 1) **History of the world** is a collection of pairs that joins states of the world and actions taken in these states.
- 2) **Rule Set** is a collection of triples of conditions, action and strength (in the form of classifiers [22] [27]).
- 3) **Expected Utility** is a value that expresses the expectation of the agent's happiness after the following action.
- 4) **Genetic Algorithm** is the reinforcement learning mechanism that evolves the rule set. The fitness of the classifiers (their strength) is evaluated by comparing the current utility and the expected utility.
- 5) **Matching** is the process that select the rules that have its conditions satisfied by the state of the world now.
- 6) **Auction** is the process that choose the winning rule.
- 7) The **winner** acts via effectors and actualizes in memory expected utility and history of the world.

#### 4.1. Auction

We denote by  $w_t$  the state of the world at time  $t$ . In this model  $w_s$  is a vector of  $p$  environment variables -  $w_s = (ev_{s,1}, ev_{s,2}, \dots, ev_{s,p})$ , where each  $ev_{s,i}$ ,  $1 \leq i \leq p$  has values in a subset of real numbers.

*Situations* are series of states of the world, that is, the situation ( $S$ ) of size  $l$  at time  $s$  is  $S = (S_1, S_2, \dots, S_l) = (w_{s-l+1}, w_{s-l+2}, \dots, w_{s-1}, w_s)$ .

Actions taken by agents may change the state of the world. *Changes* occurring between time  $s$  and  $s+1$  may be measured by  $r_s = w_{s+1} - w_s$ .

We suppose that there is a set of simple *primitive actions*  $\{^s a_1, ^s a_2, \dots, ^s a_q\}$ . Each action is a simple operation that an effector may execute. A *composed action* is defined as a series  $A$  of simple actions.

At this stage we assume that the effects of a composed action is independent of the order of the execution of the composing simple actions. Then, a composed action may be represented by a vector  $v^a \in \mathbf{N}^q$  (where  $q$  is the size of the universe of simple actions), indicating how many times each simple action is executed to form the composed action.

In the following  $\|x\|_n$  means the Euclidean norms in  $\mathbf{R}^n$ , that is:

$$\|x\|_n = \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Similarities of results may be defined as:

$$Sim(r, r') = \exp(-\|r - r'\|_p) \quad (4)$$

where  $r$  and  $r'$  are changes of states.

Similarities of actions may be defined as:

$$Sim(a, a') = \exp\left(-\|v^a - v^{a'}\|_q\right) \quad (5)$$

where  $a$  and  $a'$  are actions.

Similarities of situations of size  $l$  may be defined as:

$$Sim_l(S, S') = \exp\left(-\|S_1 - S'_1\|_p - \left(\sum_{i=2}^l (\|S_i - S_{i-1}\|_p - \|S'_i - S'_{i-1}\|_p)^2\right)^{\frac{1}{2}}\right) \quad (6)$$

where  $S$  and  $S'$  are situations.

The expectation is that similar actions in similar situations will lead to similar results.  $\hat{R}$  represents a set of expected results for a pair  $(S, a)$  at present time conditioned by a triple  $(S', a', r')$  of situation, action and changes in the world states that was historically observed by the agent. Formally,

$$\begin{aligned} \hat{R}((S, a)|(S', a', r')) = \\ \left\{ \hat{r} \mid Sim(r', \hat{r}) \geq Sim_l(S, S') \times Sim(a, a') \right\} = \\ \left\{ \hat{r} \mid \exp(-\|r' - \hat{r}\|_p) \geq C \times Sim_l(S, S') \times Sim(a, a') \right\} = \\ \left\{ \hat{r} \mid \|r' - \hat{r}\|_p \leq -\log(C \times Sim_l(S, S') \times Sim(a, a')) \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

where  $C$  is a constant that may be adjusted. The confidence in those expectations is determined by the similarities and the size of situations in consideration may be defined as:

$$conf(\hat{R}(S, a | (S', a', r'))) = \min\left(1.0 - \frac{1.0}{l}; Sim_l(S, S'); Sim(a, a')\right) \quad (8)$$

where 1.0 indicate the highest confidence.

Let

$$C_{sim} = -\log(C \times Sim_l(S, S') \times Sim(a, a')), \quad (9)$$

and  $u$  be a utility function for a specific agent, then we can define expected utilities ( $\hat{u}$ ) of the action  $a$  in the situation  $S$  at time  $t$  for a triple  $(S', a', r')$  of situation, action and changes in history, by:

a) the median case:

$$\hat{u}_{median}((S, a)|(S', a', r')) = \int_{\|r'-s\| \leq C_{sim}} u(w_t + s) ds \quad (10)$$

b) the optimistic case:

$$\hat{u}_{optim}((S, a)|(S', a', r')) = \max \left\{ u(w_t + s) \mid \|r' - s\|_l \leq C_{sim} \right\} \quad (11)$$

c) the pessimistic case:

$$\hat{u}_{pessim}((S, a)|(S', a', r')) = \min \left\{ u(w_t + s) \mid \|r' - s\|_p \leq C_{sim} \right\} \quad (12)$$

d) considering an factor of happiness:

$$\hat{u}_{hap}((S, a)|(S', a', r')) = hap \hat{u}_{optim}((S, a)|(S', a', r')) + (1 - hap) \hat{u}_{pessim}((S, a)|(S', a', r')) \quad (13)$$

where  $hap$  represents a value of happiness between 0 and 1.

The auction is done by the following steps:

- a) Determining possible future states of the world for each rule that matches the environment state. This will be done by comparing parts of the trajectory of the world, actions taken and changes of the world state by agent's actions. That is determination of

$$w_t + \hat{R}((S, a) | (S', a', r')) \quad (14)$$

for actions  $a$  that are parts of the set of matching rules and considering only action for that exist a pair  $(S', a')$  and a present situation  $S$  with confidence near to 1.

- b) Determining the expected utilities for each action considering the possible future world states and the recent trajectory of the agent's happiness, that is, the determination of the expected utilities for all expected results in (a) utilizing one of the expected utility functions defined above.
- c) Comparing expected utilities. The winner is the rule (action) with the highest expectation.

## 4.2. Evolution of Rules

The mechanism used to make the evolution of the rules is a classifier system [22] [27]. A classifier system is a "machine learning system that learns syntactically simple string rules (called classifiers) to guide its performance in a arbitrary environment." [5]. A classifier system have three main components.

- a) Rule and message system;
- b) Apportionment of credit system;
- c) Genetic algorithm.

The choice of this kind of system is based on its suitability to the definition of the anticipatory model.

### Rule and message system

The structure of a classifier is a triple,  $(c, a, f)$ , that joins a condition  $c$  (a state of the world or a situation), an action  $a$  (that is a simple or composed action), and a strength  $f$ .

We use a ternary alphabet  $(0, 1, \#)$  to represent the conditions and actions of the classifier. The symbol '#' has the meaning of 'don't care'. For the similarity determination of conditions (situations) by (6) and actions by (5) we consider that all elements of the alphabet have distance 0 to #. For example,  $\|(1, \#, 0) - (0, 1, \#)\|_3 = (1 + 0 + 0)^{1/2} = 1$ . For more details see [5] and [10].

### Apportionment of credit system

The classifiers strength at time  $t$ ,  $(f_t)$ , is adjusted in the following way:

- a) All rules have to pay a *Life Tax* ( $tax_{life}$ ) at each iteration. That means  $f_{t+1} = (1 - tax_{life})f_t$ , where  $tax_{life}$ ,  $0 < tax_{life} < 1$ , is a value near 0.
- b) All rules that match the present situation, that is the rules that are going to the auction, have furthermore to pay a *Bid Tax* ( $tax_{bid}$ ). That is, the rules that participate in the auction have its strength adjusted by  $f_{t+1} = (1 - tax_{life} - tax_{bid})f_t$ , where  $tax_{bid}$ ,  $0 < tax_{bid} < 1$ , is a value near 0.
- c) The winner of the auction at time  $t$  has the strength computed using the difference between the expected utility,  $\hat{u}_{t+1}$ , at time  $t$  for action  $a$  and the real utility,  $u_{t+1}$ , observed by the agent at time  $t + 1$ , that is  $f_{t+1} = (1 - tax_{life} - tax_{bid})f_t + u_{t+1} - \hat{u}_{t+1}$ .

## Genetic Algorithm

The evolution of the rules is actually done by the genetic algorithm (GA). The execution of the GA occurs at certain number of iterations stochastically determined, called an *epoch*. In each epoch only a small part of the rule set is selected for evolution, where the rules with the lower strength are the rules with greater selection probability. The rules of these small subset are substituted by new rules determined through crossover and mutation.

The rules for the crossover are also determined by a probabilistic selection, but here, rules with the higher strength are the rules with greater selection probability. Two rules,  $(c_1, a_1, f_1)$  and  $(c_2, a_2, f_2)$ , the parents, selected for the crossover may create two new rules, the child's, in the following two different ways

- to produce new actions for existing situations. In this case, the child's are  $(c_1, ({}^1a_1, {}^2a_2), (f_1+f_2)/2)$  and  $(c_2, ({}^1a_2, {}^2a_1), (f_1+f_2)/2)$ , where  $a_1=({}^1a_1, {}^2a_1)$  and  $a_2=({}^1a_2, {}^2a_2)$  and the cut position,  $p = \text{length}({}^1a_1) = \text{length}({}^1a_2)$ , is determined randomly; (Here,  $\text{length}(v)$  of a vector  $v$  is the number of positions of the vector  $v$ .)
- to produce new possible situations for existing actions. To do this, we first determine a cut position randomly, a number between 1 and the minimum of  $\text{length}(c_1)$  and  $\text{length}(c_2)$ , because the length of the conditions (situations) is not fixed. Thus, the child's are  $(({}^1c_2, {}^2c_1), a_1, (f_1+f_2)/2)$  and  $(({}^1c_1, {}^2c_2), a_2, (f_1+f_2)/2)$ , where  $c_1=({}^1c_1, {}^2c_1)$  and  $c_2=({}^1c_2, {}^2c_2)$  and the cut position is  $p = \text{length}({}^2c_1) = \text{length}({}^2c_2)$ .

The mutation process in the GA corresponds to random modification of some rules, randomly selected.

In this way, we are following Richards [10] approach, that uses the Michigan approach with steady state genetic algorithm (SSGA). When none of the classifier conditions match the environment state, a special type of mutation operator is used. This operator (the triggered cover detector operator – TCDO) generates a random action for the present environment state.

## 5. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

The characterization of an economic system as a complex, dynamic, evolutionary system, will lead us to some suppositions that make this system a little bit more close to the real economic system. This system will not tend to some equilibrium, but, in fact, it stays *far from a global optimum or attractor*" [21]. The analytic solution of a system that exhibits these features is extremely difficult to obtain.

Finally, complexity and uncertainty are closely related to great part of economic problems. An analytical solution of these problems may be hard or even impossible to obtain. We think that an artificial adaptive agent approach can provide more freedom for testing hypothesis and give a powerful tool to construct scenarios closely related to reality.

The main difference between the proposed agent architecture and the model of Arthur et. al. [1] are: (a) the calculation of expected utility determination is taken by considering world history and the evolution of the utility; (b) the expected utility is used for the determination of the winner and for the evolution of the rule set by the genetic algorithm.

The immediate task is to build a computational application to validate the model with empirical data.

## 6. ACKNOWLEDGEMENTS

This work was partially funded by the Brazilian Agency CNPq – project PROTEM-NALAMAS and by CAPES – PICD program. We thank also to the *LSC agents group* where these ideas were originally discussed and the two referees for their suggestions.

## 12 REFERENCES

- [1] Arthur, W. B, et. al. Asset Pricing Under Endogenous Expectations in an Artificial Stock Market, SFI Working Paper 96-12-093.
- [2] Arthur, W. B., Complexity in Economic and Financial Markets, Complexity, v.1, n.1, April, 1995.
- [3] Davidsson, P. Autonomous Agents and the Concept of Concepts, Lund, Sw, Department of Computer Science, Lund University, 1996 (Ph.D. Thesis)
- [4] Ekdahl, B. Astor, E. Davidsson, P. A Framework for Autonomous Agents Based on the concept of Anticipatory Systems. In R. Trappl, ed. Cybernetics and Systems '94, pp. 1427-1434, World Scientific, 1994.
- [5] Goldberg, D. E. Genetic Algorithms: in Search Optimization and Machine Learning, Reading, MA, Addison-Wesley, 1989.
- [6] Holland, J. H. & Miller J. H. Artificial Adaptive Agents in Economic Theory, American Economic Review, May 1991, pp. 365-370
- [7] Holland, J. H. et. al. Induction: Process of Inference, Learning, and Discovery. Cambridge, MA, MIT, 5<sup>th</sup> ed., 1996.
- [8] Keynes, J. M. The General Theory of Employment Interest and Money. Cambridge, Macmillan, 1936. 14<sup>th</sup> edition, 1973 (The Collected Writings of JMK, v. VII)
- [9] Leijonhufvud, A. Towards a Not-Too-Rational Macroeconomics, Southern Economic Journal, june,1993.
- [10] Richards, Robert A.; Zeroth-order Shape Optimization Utilizing a Learning Classifier System Ph.D. Dissertation, Mechanical Engineering Department, Stanford University, 1995.
- [11] Samuelson, P.A. Foundations of Economic Analysis, Cambridge, MA. Harvard University Press, 1975 – 5. ed.
- [12] Shackle, G. L. S. Origens da economia contemporânea: Invenção e tradição no pensamento econômico (1926-1939). São Paulo, HUCITEC, 1991.
- [13] Simon, H. Models of Bounded Rationality: Empirically Grounded Reason (vol. 3), Cambridge – MA, MIT Press, 1997.