

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA  
MESTRADO EM ECONOMIA DO DESENVOLVIMENTO

GUILHERME DE OLIVEIRA

**A AUTO-ORGANIZAÇÃO DO PROGRESSO TÉCNICO E DAS MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS NUM MODELO SIMPLES DE EVOLUÇÃO**

Porto Alegre,  
2012

GUILHERME DE OLIVEIRA

**A AUTO-ORGANIZAÇÃO DO PROGRESSO TÉCNICO E DAS MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS NUM MODELO SIMPLES DE EVOLUÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito  
para a obtenção do grau de Mestre pelo  
Programa de Pós-Graduação em  
Economia da Pontifícia Universidade  
Católica do Rio Grande do Sul

Orientadora: Prof. Dr. Izete Pengo Bagolin  
Co-orientador: Prof. Dr. José Roberto Iglesias

Porto Alegre,  
2012

---

O48a Oliveira, Guilherme de

A auto-organização do progresso técnico e das mudanças climáticas num modelo simples de evolução / Guilherme de Oliveira. – Porto Alegre, 2012.  
118 f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Economia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2012.

Orientadora: Prof. Dr. Izete Pengo Bagolin

1. Inovações tecnológicas. 2. Mudanças climáticas.  
3. Desenvolvimento econômico. I. Bagolin, Izete Pengo.  
II. Título.

CDD 330.1

---

Catálogo elaborado por Karina Ramos CRB 14/1056

**GUILHERME DE OLIVEIRA**

“A auto-organização do progresso técnico e das mudanças climáticas num modelo simples de evolução”

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Economia do Desenvolvimento, pelo Programa de Pós-Graduação em Economia, da Faculdade de Administração, Contabilidade e Economia, da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Aprovado em 26 de março de 2012.

**BANCA EXAMINADORA:**



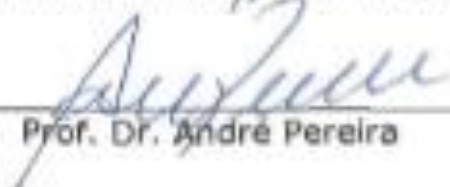
Prof.ª Dr.ª Izete Pengo Bagolin  
Presidente da Sessão e  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Economia



Prof. Dr. José Roberto Iglesias  
Co-orientador



Prof. Dr. Adalmir Antônio Marquetti



Prof. Dr. André Pereira

Porto Alegre  
2012

## DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho a minha mãe, que mesmo no período em que estava doente continuou me dando todo carinho e suporte necessário para a conclusão de mais essa etapa de minha vida acadêmica.*

## AGRADECIMENTOS

Um trabalho como esse, cujo objetivo é iniciar uma trajetória acadêmica na área de Crescimento e Sistemas Complexos, além de me atormentar pela sua realização desde os tempos da minha graduação, recebeu influências e contribuições de muitas pessoas, para as quais, pretendo (tentar) ser justo em agradecer.

As influências básicas desse trabalho surgiram de duas disciplinas que cursei no mestrado: Macroeconomia II (crescimento heterodoxo) com o prof. Adalmir, e Econofísica com o prof. Roberto. Portanto o Capítulo 2 tem muito do prof. Roberto e o 3 do prof. Adalmir. Mas destaco ainda as influências no capítulo 3 do prof. André, da prof. Izete e do prof. Thelmo. A todos esses meu muito obrigado.

Agradeço a cada um dos professores do PPGE, em especial: Paulo Jacinto, pela amizade, Cadu pela ajuda nos primeiros passos em MATLAB, Gustavo por sempre ouvir minhas mesmas críticas (e piadas) à teoria do equilíbrio geral, e ao mundo keynesiano, sem perder a paciência. E ao Adalmir por toda amizade e carisma ao longo desses dois anos que muito influenciaram minha trajetória, e com certeza continuará a influenciar.

Aos meus orientadores: prof. Izete pela amizade, atenção e carinho incondicional a mim e ao nosso trabalho. Ao prof. Roberto por aceitar me orientar, mesmo da UFRGS, e pela amizade, paciência e dedicação, inclusive aos finais de semana quando preciso, comigo e com nosso trabalho. Com vocês aprendi muito mais do que economia ou econofísica, aprendi: humildade, respeito e profissionalismo.

Ao meu eterno prof. de Economia, André, por me incentivar constantemente a cursar o mestrado, me apresentar Porto Alegre me acolhendo em sua casa, sempre vindo me visitar para aliviar aquele sentimento de solidão longe de casa. Sem você eu não teria conseguido. Meu muito obrigado.

Aos meus colegas de mestrado: Tuk, Diego, Lauren, Diego, Neuler, Flaviane, Mário, Christiano, Ronaldo, Vivi, Alexandre, Izabelita, Laura, pelos estudos juntos, e pela intensa motivação para a realização desse trabalho.

Muitas vezes eu só consigo por em ordem meu pensamento falando. Para minha alegria Deus colocou em minha vida algumas pessoas que ouvem minhas maluquices, obrigado Tuk, Diego e Christiano.

Agradeço a Janaina do PPGE por sempre responder as minhas dúvidas fervorosas com relação aos procedimentos burocráticos do curso. Agradeço também, aos bibliotecários ad PUC, sobretudo ao Wagner por me aturar durante 1 ano e meio todos os dias as 8:00 “enchendo o saco” para abrir a porta da sala de estudos.

A minha família pelo constante apoio mais uma vez. As minhas tias pelo apoio incondicional a minha mãe.

À Lice por todo o carinho, dedicação e compreensão depositadas em mim durante a escrita dessa dissertação. Sem você eu também não teria conseguido.

Aos meus colegas e alunos da Unochapecó pelo constante apoio a realização do presente trabalho.

Aos amigos Jackson, Mateus, Lucas, Diego, Cassiano pela amizade.

***“A história é importante, mas é preciso evoluir”.***

Autoria: Tradicionalista Gaúcho Desconhecido



## RESUMO

O presente estudo analisa a relação entre o progresso tecnológico e as mudanças climáticas no plano microeconômico que apresenta consequências globais. Para tanto, utiliza-se o modelo de Bak-Sneppen, um modelo desenvolvido por Bak e Sneppen (1993) e que trata da evolução biológica. O modelo especifica um número  $N$  de agentes dispostos num ecossistema, cada um com uma variável *fitness* que determina sua capacidade de adaptação relativa a esse meio. Ademais, existem regras comportamentais que são repetidas  $t$  vezes no tempo: 1) o agente com menor *fitness* é selecionado para mutação; e 2) mutações também ocorrem nos agentes vizinhos ao de menor *fitness*. Nessa investigação adaptou-se o modelo de Bak-Sneppen para a economia, supondo um número  $N$  de firmas que apresentam duas variáveis *fitness*, um que representa a mudança técnica e outro o seu cuidado com o meio ambiente. Para sustentar teoricamente a mudança técnica recorreu-se a Teoria do Progresso Técnico Induzido, e no as mudanças climáticas a Teoria do Desenvolvimento Sustentável em seu aspecto complexo. A partir das simulações computacionais destacaram-se três cenários que descrevem as relações complexas entre progresso técnico e mudanças climáticas: o cenário que se chamou de mais provável, por incorporar bem o debate é aquele em que as firmas objetivam maximizar sua técnica e algumas delas podem adotar tecnologias limpas e outras não, o que faz com que ambos os sistemas se auto-organizem num nível crítico aproximadamente igual a 0,4 de *fitness*. O cenário desfavorável é aquele em que a correlação entre a mudança técnica e o meio ambiente é negativa, assim melhorias técnicas são poluidoras e toda firma que deseja diminuir suas externalidades ambientais tem que reduzir tecnologia. Nesse cenário, em ambos os sistemas não houve evolução e seu limiar fica próximo a 0. Por fim, o cenário chamado de ideal foi aquele em que a relação entre mudança técnica e mudança climática é positiva, nele supõe-se as firmas adotam apenas tecnologias limpas. Nesse, ambos os sistemas evoluem rapidamente, atingindo o estado estacionário no limiar de 0,6.

**Palavras-Chave:** progresso técnico; mudanças climáticas; história e evolução.

## ABSTRACT

This study examines the relationship between technical change and climate change in the micro level that has global consequences. For this purpose, we use the Bak-Sneppen model of Evolution, a model developed by Bak and Sneppen (1993) and used in biological systems. The model specifies a number  $N$  of agents on an ecosystem, each with a variable that determines the fitness adaptability on this environment. Furthermore, there behavioral rules that are repeated  $t$  times in time: 1) the agent with the lowest fitness is selected for mutation, and 2) mutations also occur in the neighboring agents with lower fitness. In this investigation has adapted to the Bak-Sneppen model for the economy, assuming a number  $N$  of firms that have two fitness variables, one that represents the technical change and another his care for the environment. To support technical change appealed to the Theory of Induced Technical Change, and climate change to the Theory of Sustainable Development in its complex aspect. From computer simulations of the highlights are three scenarios that describe the complex relationships between technical progress and climate change: the scenario has been called the most probable, and to incorporate the debate is one in which firms aim to maximize their technical and some of them can adopt clean technologies and not others, which makes both systems self-organize at a critical level approximately equal to 0.4 fitness. The adverse scenario is one in which the correlation between technical change and the environment is negative, and technical improvements are polluting and every company that wants to decrease their environmental externalities have to reduce technology. In this scenario, both systems and no changes its threshold is close to 0. Finally, the stage was called the ideal one in which the relationship between technical change and climate change is positive, it is assumed only firms adopt clean technologies. In this, both systems are evolving rapidly, reaching steady state at the threshold of 0.6.

**Key-Words:** technical change; climate change; history; and evolution.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Curva de Possibilidades de Inovações .....	39
<b>Figura 2</b> – Fronteira de Possibilidades de Inovação - Kennedy .....	56
<b>Figura 3</b> – Distribuição dos Fitness no Estado Estacionário – Modelo Bak-Sneppen. Espécies=300, t= 40.000. ....	60
<b>Figura 4</b> – Evolução do Fitness Mínimo no Modelo Bak-Sneppen - Espécies=300, t= 40.000 (apenas os primeiros 8000 passos são apresentados) .....	61
<b>Figura 5</b> – Escada do Diabo e a Evolução com Equilíbrio Pontual.....	63
<b>Figura 6</b> – Evolução do Fitness Tecnológico Mínimo das 300 Firmas para Hipótese A. Firmas=300, t=40.000, Limiar=0,6454. ....	82
<b>Figura 7</b> – Imagem Instantânea das Barreiras de Fitness tecnológicos do Modelo no Equilíbrio Pontual (estado estacionário) para a Hipótese A. Firmas=300, t=40.000, Limiar=0,6454 .....	83
<b>Figura 8</b> – Distribuição dos Fitness Tecnológicos e Ecológicos no Estado Final para a Hipótese A. Firmas=300, t=40.000, Limiar=0,6454.....	86
<b>Figura 9</b> – Distribuição dos Fitness Tecnológicos e Ecológicos no Estado Final para a Hipótese B. Firmas=300, t=40.000, Limiar=0,6483 .....	88
<b>Figura 10</b> – Distribuição dos Fitness Tecnológicos e Ecológicos no Estado Final para a Hipótese B. Firmas=300, t=40.000, Limiar=0,6483 .....	90
<b>Figura 11</b> – Evolução do Fitness Tecnológico e Ecológico Mínimo das 300 Firmas para Hipótese A. Firmas=300, t=40.000, Limiar tecnológico: 0,4093 e ecológico: 0,4082. ....	95
<b>Figura 12</b> – Imagem Instantânea das Barreiras de Fitness tecnológico e ecológico do Modelo estado estacionário para a Hipótese A. Firmas=300, t=40.000, Limiar tecnologia (painel a): 0,4093 e ecologia (painel b): 0,4082. ....	96
<b>Figura 13</b> – Distribuição dos Fitness Tecnológicos e Ecológicos no Estado Final para a Hipótese A. Firmas=300, t=40.000, Limiar=tecnologia (no painel a) 0,4093 e ecologia (no painel b) 0,4082. ....	98
<b>Figura 14</b> – Distribuição dos Fitness Tecnológicos e Ecológicos no Estado Final para a Hipótese B. Firmas=300, t=40.000, Limiar tecnologia (no painel a) 0,0096 e ecologia (no painel b) 0,0093. ....	100
<b>Figura 15</b> – Evolução do Fitness Tecnológico e Ecológico Mínimo das 300 Firmas para Hipótese C. Firmas=300, t=40.000, Limiar tecnológico (painel a): 0,6483 e ecológico (painel b): 0,6471.....	102
<b>Figura 16</b> – Imagem Instantânea das Barreiras de Fitness tecnológico e ecológico do Modelo no Equilíbrio Pontual (estado estacionário) para a Hipótese C. Firmas=300, t=40.000, Limiar tecnologia (painel a): 0,6483 e ecologia (painel b): 0,6471. ....	104
<b>Figura 17</b> – Distribuição dos Fitness Tecnológicos e Ecológicos no Estado Final para a Hipótese C. Firmas=300, t=40.000, Limiar tecnologia (painel a) 0,6483 e ecologia (painel b) 0,6471.....	106

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>SISTEMAS COMPLEXOS E CRITICALIDADE AUTO-ORGANIZADA...</b>	<b>17</b>
2.1	Teoria dos Sistemas Complexos .....	18
2.2	Criticalidade Auto-Organizada .....	20
2.3	A Caracterização de um Sistema Criticamente Auto-Organizado.....	21
2.4	O Modelo da Pilha de Areia .....	24
2.5	Auto-Organização das Mudanças Climáticas .....	26
2.6	Economia Política e Auto-Organização: de Smith à Marx, de Marx a nós .....	29
<b>3</b>	<b>PROGRESSO TÉCNICO E MUDANÇAS CLIMÁTICAS: entre as bases teóricas e as evidências empíricas .....</b>	<b>35</b>
	Bases Teóricas do Progresso Técnico Induzido.....	35
3.2	O Modo de Produção Capitalista e Meio Ambiente a Geopolítica das Mudanças Climáticas .....	45
3.2.1	A Geopolítica das Mudanças Climáticas .....	46
3.2.1	Consequências das Mudanças Climáticas para a Vida na Terra .....	49
<b>4</b>	<b>MÉTODOS E TÉCNICAS .....</b>	<b>52</b>
4.1	Microfundamentos da Mudança Técnica Induzida: o marco teórico.....	53
4.2	Equilíbrio Pontual num Modelo Simples de Evolução: a abordagem de Bak- Sneppen: a técnica .....	57
4.3	Adaptando o Modelo Bak-Sneppen a Teoria Econômica e as Mudanças Climáticas .....	65
4.3.1	Representação da Mudança Técnica no modelo Bak-Sneppen: Implicações	65
4.3.2	Mudanças Climáticas no modelo Bak-Sneppen: implicações.....	68
4.4	Simulações Computacionais .....	72
<b>5</b>	<b>RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>109</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>112</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento econômico acelerado e os padrões de grande escala da economia capitalista têm expressivos impactos no meio ambiente, sobretudo, aqueles com consequências negativas para o ecossistema. Justamente por isso, os impactos das mudanças climáticas nos padrões de vida das gerações futuras têm liderado os debates científicos e políticos nas mais diversas correntes de pensamento e esferas de decisão.

Para Capra (2006), a partir desse momento, a inclusão do debate da sustentabilidade na ciência econômica se desenvolveu de forma lenta, muito em função da escassez do ferramental do economista para lidar com a complexidade que envolve a temática ambiental. Contudo, não se pode negar, que mesmo na concepção dos economistas clássicos, a questão ambiental estava presente de alguma forma.

Por exemplo, Malthus acreditava que a escassez de alimentos se tornaria um problema para a população futura, uma vez que essa cresceria a taxas geométricas e a primeira a taxas aritméticas. O próprio Marx em “o Capital” reconhece que as relações de produção ditam o metabolismo entre o homem e a natureza, ou seja, o trabalho, na concepção marxista, “é um processo entre homem e natureza”. No entanto, David Ricardo é um dos economistas mais lembrados quando o assunto é recursos naturais, já que defendia que à medida que as terras menos férteis eram ocupadas os custos tornavam-se mais elevados e em consequência o preço, levando ao chamado estado estacionário, que atuava como fator limitativo do desenvolvimento. Contudo, é preciso compreender que Malthus e o próprio Ricardo não levavam em conta a existência do progresso técnico nas sociedades capitalistas.

O mesmo progresso técnico exerce um papel indispensável no surgimento dos modelos de crescimento econômico, pois em um grande conjunto desses, o progresso técnico explica substancialmente o aumento dos padrões materiais das nações.

Existem algumas tentativas teóricas de descrever o motivo pela qual uma firma adota uma nova tecnologia. Karl Marx notadamente foi o primeiro, destacando que os

capitalistas buscam reduzir custos do trabalho através da substituição de trabalho humano pelo trabalho despendido pelas máquinas. Nessa tradição, Kennedy (1964) foi responsável pela formalização do argumento marxista, abordando em seu modelo a constância nas participações das remunerações totais do capital e trabalho. Posteriormente essa visão foi contrastada por Samuelson (1965), Robert Solow, entre outros economistas de tradição neoclássica<sup>1</sup>.

Apesar da concepção de progresso técnico estar associada a algo benéfico para as sociedades capitalistas, ele produz dois efeitos (*produtos*) um no desenvolvimento econômico e outro no meio ambiente. Assim, quando a firma decide pela mudança técnica ela pode gerar um produto bom: **crescimento**, e um produto ruim: **degradação ecológica**, sobretudo, no que tange as alterações climáticas. Nesses termos, torna-se fundamental compreender como as firmas buscam **evoluir** administrando suas trocas tecnológicas com a adaptação ao meio ambiente.

Nesse sentido, tanto Foley (2003), quanto Capra (2006) alertam para a necessidade de se compreender essas relações de impacto de maneira sistêmica, pois os países, indivíduos ou espécies apresentam comportamento dinâmico e não isolado, o que significa que são interligados e interdependentes. Assim, o impacto das transformações ecossistêmicas é sentido por toda a teia de agentes, que são ligados em si e entre si de **maneira complexa**.

Um modelo que contempla a visão de **complexidade e evolução** é o de Bak-Sneppen em que os agentes evoluem de maneira **auto-organizada** numa trajetória de **equilíbrio pontual** em direção a um **ponto crítico** denominado de **estado estacionário**. O modelo desenvolvido por Per Bak e Kim Sneppen em 1993 exhibe criticalidade auto-organizada, onde as interações entre os agentes não podem ser mais compreendidas apenas pela observação individual, mas pelas interações entre eles.

Bak e Sneppen (1993) definem uma variável chamada de *fitness* que representa a capacidade de adaptação dos agentes ao ecossistema em que estão inseridos. Em cada momento do tempo, o agente com menor *fitness* é escolhido para a mutação (que

---

<sup>1</sup> A natureza do crescimento econômico (e do progresso técnico) dominou o interesse dos economistas até o final da década de 1970, perdendo um pouco de atenção nos anos seguintes. No entanto, ao final da década de 1980 voltou a vigorar entre os temas mais publicados nas revistas científicas. Nesses termos, as explicações da mudança técnica são variadas e impossíveis de ser contempladas todas na íntegra. Mais recentemente, as explicações shumpeterianas evolucionárias, cujos precursores foram Nelson e Winter (1990) tem reservado grande atenção dos pesquisadores.

representa uma troca de valor de *fitness* para mais ou para menos) Essa mutação também induz uma adaptação dos agentes vizinhos que interagem de maneira retro-alimentativa com ele. Esse processo é reproduzido inúmeras vezes criando um número muito grande de interações e adaptações entre os indivíduos que evoluem em direção ao estado estacionário. Tais indivíduos tendem a exibir configurações padronizadas e operar longe de equilíbrios estáveis, o que os configura como criticamente auto-organizados.

Acredita-se que as relações tecnológicas e ecológicas caracterizam-se como complexas e evolucionárias, dado o grande número de agentes heterogêneos que interagem escolhendo técnicas, reduzindo (ou aumentando) suas emissões de gases efeito estufa, contaminação de mananciais, etc. Nesse contexto, de que maneira o modelo de evolução de Bak-Sneppen pode contribuir para descrever as possíveis relações complexas entre progresso técnico e as mudanças climáticas?

Diante do exposto, o objetivo geral do presente trabalho é verificar de que maneira o modelo de evolução de Bak-Sneppen pode contribuir para descrever as possíveis relações complexas entre progresso técnico e mudanças climáticas.

Como objetivos específicos têm-se: 1) Investigar na literatura a natureza dos sistemas complexos, da criticalidade auto-organizada e como esses fenômenos podem contribuir para uma nova descrição dos fatos econômicos e ambientais; 2) Resgatar os microfundamentos do progresso técnico, a epistemologia e algumas evidências empíricas das mudanças climáticas; 3) Verificar se um modelo simples de evolução do tipo Bak-Sneppen pode contribuir para descrever as relações entre progresso técnico e mudanças climáticas.

Para atender os objetivos e o problema de pesquisa, a presente dissertação, além dessa introdução, está estruturada da seguinte maneira: o Capítulo 2 trabalha a noção de sistemas complexos, criticalidade auto-organizada e a maneira pela qual se pode identificar tais sistemas. Ao final busca-se tratar o sistema econômico e o padrão de mudanças climáticas a partir de uma dinâmica de auto-organização.

O Capítulo 3 trabalha os fundamentos da teoria do progresso técnico induzido, refletindo a tentativa de Kennedy (1964) de formalizar o argumento poupador de trabalho *a La Marx*, além de apontar as críticas da formulação neoclássica a essa

abordagem. Ademais, trabalha-se a geopolítica das emissões de gases efeito estufa e algumas consequências empíricas das mudanças no ecossistema terrestre.

No Capítulo 4 se apresentam os métodos e as técnicas da presente pesquisa, apresentando o modelo Bak-Sneppen seus fundamentos e regras. Mais: se apresenta o modelo construído baseado em firmas heterogêneas que evoluíam ao longo do tempo relacionando sua capacidade de adaptação tecnológica e ambiental. Em virtude da adaptação da biologia para economia, busca-se adequar os conceitos evolucionários do modelo aos conceitos da ciência econômica e da literatura que trabalha a adaptação frente às mudanças climáticas. No Capítulo 5, discutem-se os principais resultados obtidos. Em seguida apresentam-se as considerações finais e as referências.



## 2 SISTEMAS COMPLEXOS E CRITICALIDADE AUTO-ORGANIZADA

Tratar do tema: *A Auto-Organização do Progresso Técnico e das Mudanças Climáticas Num Modelo Simples de Evolução*, certamente não é uma tarefa fácil para os pesquisadores das ciências sociais, sobretudo, para os economistas, que são treinados a pensar o sistema econômico como uma máquina<sup>2</sup>, cuja totalidade pode ser compreendida pelo estudo individual de suas partes.

A principal dificuldade reside na compreensão de muitos conceitos que atualmente vêm sendo contemplados pelas ciências naturais, como os conceitos de complexidade, auto-organização, caos, equilíbrio pontual, dentre muitos outros oriundos da física e biologia. Justamente por isso, aqui se compartilha a ideia de Prado (2009) de que “qualquer um que adentre nesse campo do conhecimento enfrenta imediatamente a perplexidade de passar a estudar algo que parece estar em estado de confusão”.

Nesse sentido, o objetivo central do presente capítulo é fazer uma breve revisão de alguns desses conceitos, conceitos esses, que são ramificações de uma nova forma de organização do pensamento científico, a Teoria dos Sistemas Complexos. Tais definições serão uteis para acompanhar claramente a linha conceitual que se pretende seguir no trabalho.

Primeiramente, definem-se sistemas complexos, e citam-se as principais dificuldades em se trabalhar com o tema. Em seguida, aborda-se a identificação do conceito de Criticalidade Auto-Organizada e sua caracterização através de um exemplo, o modelo da pilha de areia.

A seguir, trabalha-se com exemplos de auto-organização nos dois sistemas centrais da presente investigação, o sistema ambiental e o sistema econômico. No sistema ambiental identificam-se os autores que passaram a tratar as mudanças climáticas como um fenômeno complexo, e suas contribuições para a problemática.

---

<sup>2</sup> É um equívoco pensar que a ciência econômica sempre promoverá esse tipo de pensamento. Em seus primórdios, ainda chamada de Economia Política, pensadores como Adam Smith, David Ricardo, Thomas Malthus e seu principal crítico, Karl Marx, procuravam entender o sistema econômico em que viviam sem cair na armadilha do formalismo matemático exacerbado e das premissas simplificadoras da realidade. Incluíam em seus tratos aspectos morais, ideológicos, políticos e econômicos. O mecanicismo foi introduzido na economia a partir do surgimento da escola marginalista, liderada por nomes como: Jevons, Walras, Cournot, além de Alfred Marshall, que passaram a relatar a economia através de modelos matemáticos, necessitando assim de premissas simplificadoras, como as do Modelo de Equilíbrio Geral Walrasiano. Os adeptos da escola marginalista chamavam “sua economia” de “ciência pura”, porque (supostamente) não consideram em seus modelos aspectos morais e ideológicos.

O capítulo é finalizado com a abordagem dada pelos economistas clássicos para os eventos econômicos que exibem características de auto-organização e emergência. A tese aqui é de que mesmo sem um rigor matemático, tais economistas consideravam o sistema econômico como um organismo operando num estado crítico auto-organizado, onde o comportamento dos agentes é uma condição *sine qua non* para seu entendimento.

## 2.1 Teoria dos Sistemas Complexos

Comparada a outros métodos de buscar a verdade científica a chamada Teoria dos Sistemas Complexos é relativamente nova, tendo suas discussões iniciadas em 1945 com o consagrado trabalho de Bertalanffy em a *Teoria Geral dos Sistemas*. Basicamente, essa teoria surge a partir do reconhecimento das limitações dos procedimentos analíticos da investigação científica clássica, oriundos dos métodos reducionistas de Newton e Descartes.

Nesse sentido, a Teoria dos Sistemas Complexos representa um esforço ambicioso para analisar o funcionamento de sistemas organizados fora do equilíbrio, compostos por um número muito grande de indivíduos (FOLEY, 2003). A conjuntura da teoria é de certa forma, polêmica, pois diz que tais sistemas têm diversas características importantes em comum, que transcendem as suas diferenças aparentes quanto à escala e suas possíveis leis comportamentais (FOLEY, 2003).

Bak (1996) define um sistema que apresenta grande variabilidade como **complexo**. A variabilidade pode existir em diferentes níveis de escala, com novos detalhes aparecendo em cada etapa. Foley (2003) complementa a visão de Bak, adicionando algumas características em comum de tais sistemas: os seus componentes podem se configurar por meio de um número astronomicamente grande de formas (eles **são complexos**); experimentam mudanças constantes em resposta a estímulos ambientais e aos seus próprios processos de desenvolvimento (eles **são adaptáveis**); tendem a atingir configurações padronizadas estáveis e reconhecíveis (**são auto-organizados**); e operam longe dos estados estáveis, mantendo endogenamente processos de auto-organização (**são sistemas operando fora do equilíbrio**).

De início é preciso compreender que a partir de uma teoria complexa não é possível fazer previsão (no sentido mecanicista do termo). O mais interessante, segundo Capra (2006), é compreender os padrões revelados por tais modelos.

De fato, qualquer teoria da complexidade deve necessariamente parecer insuficiente. Bak (1996) responde a essa afirmação, salientando que dado a característica de variabilidade dos fenômenos, eles não podem ser condensados em um número pequeno de equações em um modelo, como por exemplo, as leis fundamentais da física. No máximo, a teoria poderia explicar o porquê da variabilidade, ou porquê determinado padrão ocorre, não o que acontecerá com determinado sistema.

Nesse ponto, Bak (1996) compartilha das idéias de Kauffman (1991), de que qualquer teoria dos sistemas complexos deve ser resumida. Por exemplo, uma teoria da vida, em princípio, deveria ser capaz de descrever todos os possíveis cenários para a evolução. Mais: deveria ser capaz de descrever a vida em Marte, caso ela ocorresse. No entanto, essa é uma etapa extremamente precária, segundo Per Bak. Qualquer modelo geral que se construa não pode fazer referência específica às espécies atuais. O autor completa dizendo que os cientistas devem se libertar de ver as coisas do jeito que elas são. À medida que se segue o formalismo convencional, de se concentrar nos detalhes de um fenômeno, se está perdendo uma perspectiva.

Um modelo complexo precisa ser estatístico, e portanto não consegue produzir detalhes específicos sobre determinado comportamento. No entanto, essa característica abstrata e estatística, de natureza probabilística pode incomodar os economistas, acostumados com a visão mecânica e de detalhamento dos fenômenos isolados.

Foley (2003) compartilha dessa ideia, argumentando que os métodos empregados pela teoria dos sistemas complexos são altamente empíricos e indutivos, tendendo a optar por modelos simplistas e abstratos, mas envolvendo um grande número de iterações. Embora tais modelos tenham leis simples, são não lineares, e entender sua dinâmica é muito difícil sem o auxílio da simulação computacional, pois podem responder de diferentes formas qualitativas a estímulos de diferentes escalas.

Há muitas armadilhas para os pesquisadores que ingressam nesse campo. Foley (2003) destaca que a maioria delas nasce da dificuldade de se verificar as características gerais dos resultados específicos em modelos particulares, além do ceticismo dos demais pesquisadores quanto à impossibilidade de previsão. De fato, os cientistas da ciência da complexidade não conseguiram superar o problema da imprevisão (BAK, 1996).

Um conceito comumente confundido na teoria dos sistemas complexos são os chamados sistemas caóticos. Os sistemas caóticos representaram uma revolução no modo de entender o comportamento de simples sistemas dinâmicos. Geralmente, eventos com poucos graus de liberdade apresentam comportamento caótico, sendo que sua dinâmica futura permanecesse imprevisível não importando suas condições iniciais, nem mesmo se todas as equações que descrevem seus movimentos fossem conhecidas (BAK,1996).

Outra característica peculiar de sistemas caóticos é a inexistência de memória, o que impossibilita sua evolução. Nesse sentido, o estado complexo está na fronteira entre o comportamento periódico previsível e a dinâmica caótica imprevisível.

Os sistemas complexos se manifestam na natureza refletindo a tendência de grandes sistemas com muitos componentes se relacionando num estado chamado de *crítico*, fora do equilíbrio, onde poucas variações podem conduzir a eventos conhecidos como *avalanches*, que são perturbações relacionais de todos os tamanhos. Este estado é estabelecido devido às dinâmicas de interações entre os agentes do sistema, assim o estado crítico é auto-organizado. Segundo Bak(1996) a *criticalidade auto organizada* é o único mecanismo conhecido que gera a complexidade.

## **2.2 Criticalidade Auto-Organizada**

O termo Criticalidade Auto-Organizada, do inglês Self-Organized Criticality, refere-se a tendência de um sistema dinâmico organizar-se num estado estacionário, sem a necessidade de impulso de qualquer parâmetro externo. Quando se alcança essa estacionaridade, fala-se que tais sistemas atingiram um estado crítico auto-organizado, cujas características são: a existência de períodos com baixa atividade, correlação espacial e temporal refletidas nas distribuições que seguem leis de potência, além de grandes instabilidades no sistema denominadas de *avalanches*. Assim, longos períodos de constância são seguidos por rápidas e bruscas mudanças dinâmicas, o que se convencionou chamar de *equilíbrio pontual* (JENSEN, 1998).

Não existe uma definição formal (matemática) de criticalidade auto-organizada, nem mesmo as condições necessárias para que seu comportamento seja observado.

Segundo Bak et al. (1987) para que um sistema evolua para um estado crítico auto-organizado, as forças externas devem ser muito mais fracas que as internas. No estado crítico, isso significa que catástrofes podem ocorrer sem nenhum mecanismo exógeno de causalidade, tais como meteoros. A evolução nesses sistemas ocorre através dos grandes eventos, positivos e negativos, ao invés de ser um caminho suave.

Da falta de definição formal emergem um problema que diz respeito à incapacidade de explicar os componentes individuais do sistema. Ora, o que se propõe a explicar essa teoria, já que não consegue explicar o comportamento dos eventos detalhadamente? Como, precisamente, ela pode confrontar suas premissas com a realidade? Bak (1996) salienta que sem essas respostas, seus pressupostos não podem ser considerados científicos.

Felizmente, existe um grande número de fenômenos das ciências individuais que parecem seguir o mesmo padrão, independentemente da escala ou das características individuais que os governam. Tais fenômenos já não são mais compreendidos unicamente pelos instrumentais mecânicos de tais ciências. Esses fenômenos podem ser a ocorrência de catástrofes, os fractais, e as leis de Zipf. Um legítimo teste segundo Bak (1996), para a teoria da complexidade é explicar tais fenômenos e por que eles são universais, ou seja, ocorrem em todos os lugares.

### **2.3 A Caracterização de um Sistema Criticamente Auto-Organizado**

Segundo Bak et al. (1987) a natureza do fenômeno complexo é descrita pela resposta do sistema a variações externas. Para um sistema crítico, uma perturbação aplicada em diferentes posições, ou na mesma posição em diferentes momentos, pode gerar respostas totalmente diferentes, inclusive de diferentes tamanhos.

Dado seu componente natural, sistemas criticamente auto-organizados podem exibir comportamento catastrófico, onde uma parte do sistema pode afetar várias outras através de um efeito dominó, um exemplo de evento catastrófico são os terremotos, e a famosa lei de Gutenberg-Richter. Tal lei diz que a relação intensidade e número de terremotos é negativa, num padrão simples, por exemplo, 1000 terremotos de magnitude 4 (na escala Richter), 100 terremotos na escala 5, 10 de magnitude 6 e assim por diante.

Essa lei mostra que grandes terremotos não seguem uma regra especial, eles seguem a mesma lei dos pequenos. Assim, se o desejo é explicar o comportamento dos grandes terremotos, é necessário compreender o comportamento de todas as magnitudes de terremotos, pequenos ou grandes, através de uma teoria geral.

Na Economia, um padrão empírico similar a lei de Gutenberg-Richter foi observado por Mandelbrot (1963) para a variação nos preços do algodão e outras commodities. Mandelbrot (1963) coletou informações mês a mês durante vários anos, identificando que tais séries seguem um padrão simples conhecido como Distribuição de Levy. O autor contou quantas vezes as variações foram entre 10 e 20 por cento, quantas vezes foram entre 5 e 10 por cento, e assim por diante. O autor encontrou a mesma relação negativa entre a intensidade da variação e a quantidade de meses que ela ocorreu.

O fato de grandes eventos seguirem uma simples lei, a mesma que para pequenos eventos, não pode ser exagerada, apesar de poderem conter conseqüências devastadoras. É justamente o fato de muitos eventos na natureza seguirem essa simples lei que motiva os pesquisadores a buscarem por uma teoria da complexidade (BAK, 1996).

Em 1949 no renomado livro chamado *Human Behavior and the Principle of Least Effort*, Georde Kingsley Zipf fez um número impressionante de testes de regularidades simples em sistemas de origem humana. Um exemplo é a estimacão feita por Zipf para o tamanho das cidades maior que um número dado de habitantes. Zipf distribuiu no eixo vertical o tamanho das cidades, e no eixo horizontal número de cidades, ambos em escala logarítmica. O que ele encontrou foi que havia um par de cidades com mais de oito milhões de habitantes, dez com mais de um milhão, e cem com mais de duzentos mil habitantes. O ajuste resultou em uma linha aproximadamente reta em escala logaritma, e assim, sucessivamente o fez para vários outros sistemas, encontrando a mesma linha reta em vários desses (BAK, 1996).

A regularidade expressada por essa linha reta, negativamente inclinada, no gráfico de escala logaritma do ranking contra a frequência, e com uma inclinação perto de um, é referida como Lei de Zipf (FUJIWARA; AOYAMA; SOUMA, 2006). Bak (1996) salienta que é a Lei de Zipf trata, no exemplo das cidades, de um ranking de um determinado número de habitantes, não o porquê que as cidades têm esse tamanho

específico. As várias leis são expressas como funções de distribuição para medir quantidades.

Nesse contexto, o que pode significar algo em linha reta num gráfico com escala logarítmica? Matematicamente, tais linhas retas são chamadas de “Leis de Potência”, pois mostram que uma quantidade  $N$  pode ser expressa como potência de outra quantidade  $s$ , conforme Bak (1996) define na Equação 1:

$$N(s) = s^{-\tau} \quad (1)$$

Tomando o logaritmo dos dois lados, se obtém:

$$\log N(s) = -\tau \log s \quad (2)$$

A Equação 2 mostra que o logaritmo de  $N$  grafado contra o logaritmo de  $s$  é uma linha reta. O expoente  $\tau$  é a inclinação da reta. A característica de não variância de escala dos sistemas complexos pode ser visualizada pelo simples fato de que uma linha reta é a mesma em cada ponto. Não existem recursos que façam que alguma escala em determinado ponto se destaque.

Bak (1996) afirma que o problema de se explicar as características estatísticas observadas em sistemas complexos pode ser descrito matematicamente como o problema de se explicar as leis de potências inerentes, ou em outras palavras, explicar o valor do expoente.

Nesse sentido, sistemas em equilíbrio não apresentam Leis de Potência, ou características catastróficas, apenas sistemas fora de equilíbrio apresentam tais características. Essa visão de não equilíbrio é relativamente nova, pois no passado recente se assumia que grandes sistemas estavam em equilíbrio estável. Um exemplo é uma das principais teorias econômicas, a Teoria do Equilíbrio Geral, que assume mercados perfeitos, agentes racionais, tratando os agentes dentro de equilíbrios estáveis de Nash, onde nenhum indivíduo pode melhorar sua situação mudando de estratégia (VARIAN, 1992).

No estado de equilíbrio pequenas variações causariam pequenas perturbações causando leves variações. Contudo, isso é justamente o contrário que prega a teoria dos sistemas complexos. Os paleontólogos Gould (1989) e Eldridge (1977) alertaram para o aparente equilíbrio como sendo apenas um período de tranquilidade ou calma entre

explosões de volatilidade dos agentes envolvidos num sistema, no caso deles, um sistema biológico. Os dois corroboram com a idéia de que a taxa de evolução das espécies (agentes), em mudança de tamanho, ocorrem durante surtos de intensas atividades, o que se convencionou chamar de **equilíbrio pontual**.

O conceito de equilíbrio pontual pode estar no coração da dinâmica dos sistemas complexos (BAK, 1996). Nenhum dos fenômenos acima citados pode ser compreendido por uma figura que demonstra equilíbrio. Por outro lado, não existem teorias para grandes sistemas em desequilíbrio.

Sistemas Criticamente Organizados evoluem para estados complexos sem a interferência de agentes de fora do sistema. O modelo da pilha da areia é um exemplo de criticalidade auto-organizada, exibindo comportamento de equilíbrio pontual, onde períodos de calma são interrompidos por deslizamentos de areia. Tais deslizamentos são ocasionados pelo efeito dominó de um grão ao outro, assim, todos os grãos individuais se relacionam uns com os outros. Se esse modelo é correto para dados reais, devemos aceitar a instabilidade e as catástrofes como inevitáveis na biologia, história e economia (BAK et. al. 1987).

## **2.4 O Modelo da Pilha de Areia**

Bak et al. (1987) construíram um modelo para captar o impacto de pequenas variações no sistema como um todo. Para isso utilizaram um protótipo denominado modelo da Pilha de Areia. Este trabalho mostrou que um modelo que obedece regras simples e locais, pode se organizar em um estado estacionário, que evolui em termos de explosões intensas e não através de um caminho suave com pequenas variações. Tal modelo exhibe um comportamento de estado crítico, onde períodos de calma são interrompidos por períodos de grandes avalanches. Essas avalanches ocorrem num efeito típico de dominó (BAK et al. 1987).

Considere o experimento em que grãos de areia são despejados numa mesa. No início a pilha é plana, e os grãos individualmente estão relativamente perto de onde foram depositados. Com a sucessão do experimento, a pilha começa a ficar íngreme e



haverá um ou alguns deslizamentos de areia, mas de forma mais local, sem afetar os demais. Não há comunicação global, apenas comunicação individual entre os muitos grãos.

Com o passar do tempo, os deslizamentos de areia tornam-se maiores, porque a inclinação da pilha atingiu um ponto onde não pode ser mais ultrapassada. Este é o estado estacionário, pois a inclinação e a quantidade média de areia são constantes no tempo. Para existir este estado, deve haver comunicação entre todo o sistema. Haverá alguns deslizamentos que podem envolver todos ou a maior parte da pilha. Nesse ponto, o sistema está no seu estado crítico auto-organizado, onde suas dinâmicas passam a ser globais (BAK, 1996).

De fato, qualquer sistema dinâmico, em princípio, é capaz de se auto-organizar, e quanto mais complexo for o sistema, mais interessantes são as suas conclusões (HEYLIGHEN; GERSHENSON, 2003). Pode-se definir organização como uma estrutura com função. A definição de sistemas complexos já congrega a noção de estrutura, pois o que se tem são elementos distintos (diferenciação) e uma conexão (integração). Função significa que a estrutura é utilizada para se conseguir algum propósito. O mecanismo básico de auto-organização evoluirá para sistemas dinâmicos que possuem um atrator da dinâmica, ou seja, uma configuração estável em que os eventos não podem mais sair. Pode-se dizer que os elementos adaptam-se entre si, e limitam suas interações para aqueles que suportam essa interação coletiva. (HEYLIGHEN; GERSHENSON, 2003).

Logo, a “função” dessa configuração é sobreviver, além do comportamento do sistema poder ser compreendido a partir dela. Por exemplo, uma empresa, mais cedo ou mais tarde, evolui sua própria cultura que consiste de uma série de regras não escritas e preferências que condicionam o comportamento dos empregados. Enquanto que, "oficialmente", o propósito de todas as regras pode ser o de maximizar a produtividade da empresa, na realidade, a função dessa cultura será, basicamente, para se manter. Enquanto a auto-manutenção implica um nível mínimo de produtividade para que a empresa não ir à falência, as tentativas de aumentar ainda mais a carga de trabalho pode gerar resistência, porque eles põem em perigo a cultura social em si (HEYLIGHEN; GERSHENSON, 2003).

A partir da década de 1990 do século XX, cientistas identificaram exemplos de Criticalidade Auto-Organizada no sistema econômico, tais como: a dinâmica da bolsa de valores, a organização das firmas, trocas entre agentes econômicos sob incerteza, dentre outros fenômenos sociais. Um exemplo detalhado pode ser obtido em Bak et al. (1993) que analisou a interação entre produtores, fornecedores de insumos e clientes de maneira complexa.

No entanto, não é necessário migrar da economia para a física para ter uma descrição da complexidade dos fenômenos do sistema capitalista, pois essa descrição já era encontrada nos Economistas Clássicos: Adam Smith, David Ricardo e Thomas Malthus, além do seu principal crítico Karl Marx, mas foi abandonada com o surgimento da Escola Marginalista liderada por Jevons, Cournot e Marshal.

Outras ciências acadêmicas vêm identificando características dos sistemas complexos - além da auto-organização - em seus eventos. Notoriamente, os que reservam maior atenção são os estudos das mudanças climáticas, que desde a década de 1970 seus promotores buscam identificar a complexidade inerente a tais sistemas.

Diante do exposto, nos próximos tópicos aborda-se como a criticalidade auto-organizada e os sistemas complexos são considerados no sistema econômico através do pensamento clássico, e no sistema ambiental através das alterações climáticas do planeta, boa parte devido às ações antrópicas.

## **2.5 Auto-Organização das Mudanças Climáticas**

Os fenômenos que envolvem as mudanças climáticas levaram alguns autores como Leff (2001), Moran (2000) e Sachs (2004), a construir reflexões epistemológicas do que é o saber ambiental. Essas reflexões foram muito pertinentes para a consideração de um novo conceito que refletem a complexidade das relações socioeconômicas, físicas e bióticas.

Em *The Turning Point*, Capra (1982) populariza a discussão de que a visão mecanicista da ciência de Descartes e Newton, não é mais suficiente para compreender a complexidade dos fenômenos do mundo real. O autor recorre à recente Visão Sistêmica da Vida, que reflete a necessidade de se encarar os problemas em sua

totalidade, sem isolar os fatos (ou recorrer ao ambiente micro) para entender os padrões ou as leis fundamentais que os governam.

Leff (2001) compartilha essa ideia de que a visão mecanicista não oferece respostas satisfatórias quando o interesse dos pesquisadores é compreender como se pode enfrentar a problemática ambiental. Essa confluência entre idéias fica clara quando Leff (2001) define ambiente, como sendo uma “visão das relações complexas e sinérgicas gerada pela articulação dos processos de ordem física, biológica, termodinâmica, econômica, política e cultura”. Ou seja, o ambiente é o local onde ocorrem os processos entre esses elementos complexos.

Essa ideia de processo é pertinente para a evolução do pensamento complexo, pois além da necessidade de se compreender o todo, e não suas partes. São as interações entre os elementos que definem o todo e não simplesmente a união de seus componentes micro (CAPRA, 2006). Nesse sentido, em *O Método*, Edgar Morin, tenta construir um referencial teórico acerca de como deveria ser operacionalizada uma investigação a partir da visão sistêmica do mundo, e mais: de como deveria ser efetivado o processo de educação ao se considerar aspectos como a degradação ambiental. Em síntese, o autor recai sobre a necessidade de uma compreensão mais humanista do sistema e do modo de produção da sociedade.

Leff (2001b) constrói um debate de progresso, crescimento e consumo a partir de uma ótica holística, mas, sobretudo, ambiental. O autor resgata o aspecto negativo da Revolução Industrial, que deixou de lado o papel da Terra como provedora de riqueza, culminou em um processo de divisão severa de classes (capitalistas e trabalhadores), além da pressão exercida pela produção em larga escala. De um modo geral, esse processo acelerado durante a Revolução Industrial é uma interação entre energia, mão de obra e matéria prima, que geram produtos para consumo e resíduos que necessitam ser descartados. Leff (2001) afirma que diante dessas transformações é necessário propor uma transformação da realidade social, que mude os atuais conceitos de produção e educação.

Georgescu-Roegen (1999), em seu livro clássico *The Entropy Law and the Economic Process*, se utiliza das Leis da Termodinâmica para compreender como os processos do modo de produção capitalista se relacionam com os bióticos e físicos. Segundo ele, a entropia do universo físico aumenta constantemente, porque existe uma contínua degradação qualitativa e irrevogável ordenada no caos. A natureza entrópica

do processo econômico, que degrada os recursos naturais e polui o ambiente, constitui um perigo presente.

É interessante como Georgescu-Roegen (1999) raciocina a questão das transformações ecossistêmicas no mundo, reconhecendo que a natureza está “entropicamente” acabando naturalmente, mas que o progresso econômico está acelerando esse processo. A questão central que o autor quer passar é a de que o ser humano precisa aprender a operar em meio aos processos complexos do ambiente, sabendo racionar os recursos escassos que desperdiçou tão prodigamente até então.

Sachs (2004), embora não utilizando os mesmos conceitos termodinâmicos, concorda com a ideia de Georgescu-Roegen, salientando que principalmente devido ao aumento da atividade econômica durante a década de 1960 e mais tarde 1970, a emissão de poluentes aumentou muito, além da aceleração da extinção de muitas espécies. E segundo o mesmo, o homem tem um papel de destaque no crescimento marginal dessa degradação, que acelera a média rumo a uma catástrofe futura.

Mas por que as mudanças climáticas são entendidas como um sistema complexo? Basicamente, se poderia responder tal questionamento, por uma única ótica, a de que os sistemas vivos precisam ser compreendidos a partir da visualização de todos os seus aspectos, e não de suas partes isoladas. No entanto, se poderia recorrer a Georgescu-Roegen (1999) que reconhece isso, mas aprofunda e conceitua a complexidade pela inclusão das leis da termodinâmica na abordagem.

De maneira geral, se poderia entender essa relação de complexidade através da metáfora de uma grande teia, onde todos os elementos estão conectados, e se um move a teia todos são afetados de alguma forma, quanto mais próximo do movimento inicial mais forte é o impacto, no entanto, em sucessivos “passos” a mensuração desse impacto perde a precisão, sendo mais compreensível entender seus padrões, ao invés de previsão. Essa explicação aproxima-se da noção de Auto-Organização dos elementos de um sistema. Essa noção de complexidade é crescente na análise epistemológica em busca de uma teoria ambiental.

Um dos elos da grande teia, ou sistema, que mais afetam o meio ambiente é o sistema econômico, que para os economistas clássicos é compreendido como um organismo complexo.

## 2.6 Economia Política e Auto-Organização: de Smith à Marx, de Marx a nós

O tema central para os economistas clássicos foi que as ações individuais têm conseqüências sociais inesperadas, sendo a vida econômica, no geral, organizada e coerente no sentido de que o individuo desconhece seu controle sobre ela (FOLEY, 2003). Tais economistas, a partir dessa concepção, revelam o caráter complexo, adaptativo e não equilibrado do sistema econômico capitalista.

No entanto, é um equívoco pensar que eles tinham a noção de complexidade desenvolvida recentemente. O que se quer dizer, é que seu pensamento, em nenhum momento via o sistema econômico como uma máquina movida por leis totalmente deterministas, e sim, como um “organismo” complexo, que só poderia ser compreendido quando se levasse em conta todos os aspectos de sua dinâmica.

Segundo Foley (2003) um dos exemplos mais poderosos dessa busca clássica é descrito em Adam Smith, *Riqueza das Nações*, quando o mesmo observa que cada proprietário do estoque (de capital) buscará maximizar sua taxa de lucro potencial investindo numa linha de produção que julga ser mais promissora. Segundo Smith (1982) o capital será mobilizado de linhas de produção com baixo lucro para linhas que proporcionem uma elevada taxa de lucro. A intenção dos capitalistas realocando o capital dessa maneira é maximizar sua própria taxa de lucro, mas o efeito de suas ações equaliza as taxas de lucros esperadas entre diferentes linhas de produção. Essa equalização de taxas de lucro, que não é interesse particular do capitalista individual, é também uma condição de maximização no agregado das contas nacionais, ou seja, da riqueza das nações (FOLEY, 2003).

Smith (1982) e os economistas clássicos que o sucederam, não acreditavam que essa equalização se dava em cada momento de tempo. O movimento dos capitais de uma linha de produção para outra, está sujeita a perturbações de conjuntura da economia, que sempre evita o alcance do estado de equalização das taxas de lucro (no seu sentido estático). Os clássicos esperavam ver flutuações nos preços e nas taxas de lucro como resultado do processo competitivo entre as firmas, ao invés da realização de um estado de “equilíbrio” em que os preços se estabeleceriam a níveis que propiciassem a equalização das taxas de lucro.

Segundo Foley (2003), o conceito de estado de equilíbrio (que se refere ao equilíbrio de longo prazo) ocupa um natural e importante espaço na análise da economia real. Para o autor a dinâmica competitiva, mesmo não sendo estável no seu sentido matemático, em que as taxas de lucro são movidas para um equilíbrio estável, evita que os preços e as taxas de lucro se distanciem dos seus valores de equilíbrio. Essa dinâmica é contemplada pelo argumento clássico de que os preços de mercado tendem a gravitar em torno dos preços naturais em que as taxas de lucro seriam equalizadas.

Esse raciocínio contrasta fortemente a visão neoclássica dos economistas que tem a tendência de identificar valores observados de preços em seus níveis de equilíbrio em modelos lineares abstratos<sup>3</sup>. Essa visão neoclássica requer um grau impraticável de previsão e coordenação das ações individuais para a realização do estado de equilíbrio retratado em seus modelos. Infelizmente, sistemas em equilíbrio estável não exibem comportamento complexo e auto-organizado (BAK, 1996), justamente por isso, os economistas neoclássicos permanecem calados (ou de maneira ainda mais categórica: **cegos**) perante a evolucionária, auto-organizada e adaptativa noção do sistema econômico.

No entanto, a visão clássica é consistente com a visão de mundo dos sistemas complexos, pois não insiste que cada indivíduo, em cada momento do tempo, deve estar em equilíbrio, formando um equilíbrio maior do sistema como um todo (PRADO, 2009). De fato, é o próprio desequilíbrio individual das famílias e das firmas na dinâmica competitiva, que “causa” a gravitação ao longo do preço natural.

A visão de Prado (2009) é condizente com a crença de que a gravitação clássica “é resultado da auto-organização do sistema econômico competitivo”, levantada por Foley (2003). No entanto, essa competição precisa ser “perfeita” a fim de trazer a tendência de auto-organização. O autor afirma ainda, que a auto-organização do sistema é robusta, pois não depende da ação de nenhum detalhe particular para a evolução como sistema, e se reanima, mesmo que um de seus mecanismos básicos seja “frustrado”.

Em outras palavras, a equalização das taxas de lucro no nível macro é um exemplo de sistema complexo porque não é necessário que cada capitalista mova seu estoque de capital para linhas de produção mais lucrativas, ou seja, maximize. Embora essa seja sua

---

<sup>3</sup> Para um exemplo consultar os manuais de microeconomia como Varian (1992) e Mas-Colell (1997).

intenção como indivíduo, o capitalista incorre em erros, às vezes se movendo para linhas de produção não tão lucrativas, pois seu conhecimento não é perfeito. É justamente o erro de uns e o acerto de outros (desequilíbrio) que leva a equalização das taxas de lucro no nível de contas nacionais.

A Riqueza das Nações, possui outros exemplos da auto-organização dos sistema econômico, sendo um dos argumentos mais fortes o ciclo virtuoso de crescimento da economia, onde a divisão do trabalho leva a um aumento da produtividade do trabalho, que aumenta o excedente, aumentando a acumulação contribuindo assim, para o aumento dos mercados (desenvolvimento do sistema), que ocorre continuamente (e não de maneira estática)<sup>4</sup>.

Os sucessores imediatos de Adam Smith, Thomas Malthus e David Ricardo, embora caracterizem suas descobertas como contrárias a Smith em muitos aspectos, compartilhavam a mesma preocupação com as consequências não intencionais das ações humanas.

A visão de Malthus (1798), por exemplo, pode ser acoplada a noção moderna dos sistemas complexos porque se centra em um mecanismo estável retroalimentado. Se a mortalidade caísse a um nível abaixo do equilíbrio, a taxa de natalidade aumentaria a população. No entanto, o aumento populacional se deparava com os *retornos decrescentes* oriundos da escassez de terras e de outros recursos naturais, logo, o padrão de vida cairia, aumentando a incidência de mortalidade devido à má nutrição ou epidemias.

Embora a teoria de Malthus tenha sido considerada inapropriada para entender o atual processo de desenvolvimento capitalista que se sucedeu ao longo de trezentos anos (FOLEY, 2003), é interessante notar que ela compartilha as mesmas características de auto-organização do sistema competitivo de Smith. As famílias não têm nenhuma noção de que suas decisões de fertilidade formarão um “equilíbrio demográfico”, e mesmo, elas não formam nenhum tipo de equilíbrio, segundo a tese de Malthus. O que ocorre então no sistema Malthusiano, é que as limitações de terra e de recursos naturais impõem-se de modo generalizado (em todo o sistema), conduzindo desordenadamente as decisões individuais em torno de um “equilíbrio demográfico” (gravitacional, assim como em Smith).

---

<sup>4</sup> Outros exemplos podem ser consultados em Foley (2003) e Prado (2009).

David Ricardo (1982) estendeu e reelaborou a noção Malthusiana de equilíbrio demográfico para sua concepção de *estado estacionário*, em que a pressão dos insumos capital e trabalho sobre terras limitadas forçariam o retorno do capital, da taxa de lucro, próximo a zero, parando o ciclo de acumulação de Smith. Ou seja, Ricardo (1992) tem a mesma visão de *rendimentos decrescentes* de Malthus, mas devido a pouca produtividade das terras mais distantes, ou o aluguel mais caro das terras próximas aos centros urbanos (ou mesmo do aumento dos custos de transporte, mais tarde formalizado por Von Thünen). Para Foley (2003) essa equalização Ricardiana dos lucros é a mesma noção de equalização Smithiana, ou seja, o mesmo mecanismo gravitacional complexo.

De fato, os capitalistas individuais não visualizam que os aumentos nos aluguéis e salários, que comprime as taxas de lucro é conectada com sua dinâmica de acumulação. No entanto, a taxa de acumulação não tem que cair necessariamente no estado estacionário. O argumento de Ricardo (1982) é forte porque mostra como qualquer padrão de acumulação irá comportar-se na dinâmica do estado estacionário por si só, dado apenas o fenômeno generalizado dos rendimentos decrescentes associados com a limitação de terras ou recursos naturais (FOLEY, 2003).

Nesse ponto, alguns capitalistas obtêm lucros e acumulam, enquanto outros estão tendo prejuízo e perdendo estoque de capital. Assim o estado estacionário Ricardiano não reflete um equilíbrio estável microeconômico em que cada agente individual maximiza, mas sim um sistema complexo auto-organizado e adaptativo.

Karl Marx adotou a Economia Política Clássica de Smith, Malthus e Ricardo como base para sua crítica ((re)construtiva) da teoria das economias capitalistas. Marx (1985) adotou o modo de argumentação dos economistas políticos de que a descoberta de regularidades macroeconômicas não dependiam do estudo detalhado do comportamento dos indivíduos. De acordo com Dumménil (2011), outra característica fundamental (e digna de admiração) do pensamento de Marx é a capacidade de tirar conclusões analíticas sobre o curso e os padrões do desenvolvimento da economia capitalista sem limitar-se a modelos com premissas simplificadoras e implausíveis. Ademais, Marx não tinha nenhuma pretensão em prever o comportamento de indivíduos (FOLEY, 2003).

Marx (1985) agregou a política econômica uma linguagem dialética, que residia no pensamento filosófico de base Hegeliana, fruto particular de suas leituras na juventude



(HUNT, 1986). Nesse contexto, Foley (2003) e Prado (2009) compartilham da idéia de que a dialética marxista pode ser útil para encontrar uma linguagem precisa para discutir fenômenos em sistemas complexos e auto-organizados.

Um exemplo de utilização da dialética poderia ser o argumento marxista de obtenção de lucro, em que a perseguição dos indivíduos por lucros maiores em mercados competitivos, através da inovação tecnológica, pode levar a uma tendência declinante das taxas de lucro no sistema como um todo. Essa noção marxista é muito próxima da noção de comportamento complexo de Kauffman (1995), que argumenta que os sistemas complexos são “determinados” pela propensão e tendência de suas “partes constituintes” (individuais), mas o comportamento agregado do sistema como um todo está longe de um simples reflexo dessas tendências no nível macroscópico.

Marx (1985) freqüentemente se refere a Ricardo em sua reformulação da economia política, ressaltando a nitidez e poder analítico do mesmo. No entanto, Marx é muito mais um Smithiano do que um Ricardiano, no sentido de que usa a visão de Smith de que a essência do sistema capitalista, como forma de organização social, é a habilidade de superar os *retornos decrescentes* através da divisão do trabalho e dos avanços tecnológicos que tornam essa divisão possível.

De fato, Marx (1985) organiza um capítulo onde discute a mudança técnica em economias capitalistas num elaborado esquema de contabilização (baseado na discussão da Maquinaria da obra de Ricardo). Nesse capítulo, Marx discute que os capitalistas individuais possuem ganhos advindos da troca tecnológica. No entanto, é importante compreender que argumentação marxista da mudança técnica não se resume a um conjunto de hipóteses individuais do curso da mudança técnica na economia, mas sim, como um processo histórico que reflete uma tendência do sistema capitalista a se auto-organizar como motor de mudança técnica, quaisquer que sejam as escolhas tecnológicas que poderiam ter ocorrido historicamente (FOLEY, 2003). Ou seja, Marx, assim como Smith, via o caráter essencial da acumulação de capital como um processo auto-alimentado, aberto e evolucionário.

Marx (1985) também via o capitalismo organizado num sistema de exploração do trabalho, daí surge o *insight* marxista de que os custos do trabalho elevados criam os incentivos e a habilidade para os capitalistas desenvolverem e aplicarem essas

tecnologias, num esforço de reduzir custos. Isso organiza o sistema capitalismo em torno da mudança técnica (ou seja, o motor do sistema).

De maneira mais detalhada: cada capitalista tem uma forte motivação para encontrar mudanças técnicas redutoras de custo, pois a empresa que explora primeiro com êxito essa mudança atinge lucros supernormais, como resultado de um monopólio temporário sobre essa inovação. Dumménil e Foley (1995) também analisam a possibilidade do capitalista explorar uma maior fatia do mercado.

Ao longo do tempo, os competidores irão copiar a inovação, e as vantagens do capitalista pioneiro irão diminuir. A teoria de Marx sobre a mudança técnica induzida é basicamente evolutiva: o capitalista avalia o custo dessas alternativas aos preços em vigor, os salários e as expectativas formadas em relação à taxa de lucro. Somente as tecnologias que prometem reduzir custos ou aumentar os lucros aos preços em vigor e os salários, serão candidatas viáveis para a adoção. O critério principal é uma taxa de lucro maior.

No entanto, Marx se dá conta, que essa escolha individual de curto prazo, apesar de representar uma redução de custos, e conseqüente aumento de lucro acima da média (dado a possibilidade de preços mais baixos favorecendo o aumento da demanda), no médio prazo é copiada pelos demais capitalistas (competidores) do mercado, que reduzem seus custos e preços de produção ao nível do primeiro. Isso impacta no agregado, como uma redução da taxa de lucro de todos os capitalistas. Marx chamou esse comportamento de *Tendência Declinante das Taxas de Lucro*.

Todo esse insight de Marx é teoricamente acoplado a chamada Teoria do Progresso Técnico Induzido, discutida pioneiramente por autores como Kennedy (1964), Samuelson (1965) Drandakis e Phelps (1966), Shah e Desai (1981), dentre outros. Recentemente, economistas como Dumménil e Levy (1995) e (2009) resgataram essa discussão, ao considerar juntamente com a hipótese marxista de inovação um conjunto estocástico de técnicas disponíveis na economia.

### **3 PROGRESSO TÉCNICO E MUDANÇAS CLIMÁTICAS: entre as bases teóricas e as evidências empíricas**

Apresentadas inicialmente, as noções de complexidade e de criticalidade auto-organizada, da abordagem complexa dos sistemas ambientais e econômicos, o objetivo do presente capítulo é revisar as bases teóricas do progresso técnico e as evidências empíricas de que a parte das transformações ecossistêmicas (causadas pelas mudanças climáticas) ocorrem devido as ações no sistema econômico, onde o progresso tecnológico desempenha um papel fundamental.

Como foi sugerido no Capítulo 2, a mudança técnica de tradição marxista pode ser um exemplo de auto-organização do sistema econômico. Nesse sentido, uma teoria que acoplou parte dos *insights* de Marx é a chamada Teoria do Progresso Técnico Induzido. Justamente por isso, investigam-se as bases dessa teoria, esclarecendo a forma com que o capitalista toma a decisão de mudança técnica<sup>5</sup>.

Em seguida, revisa-se a discussão dos impactos do crescimento econômico, e nesse em primeira instância a ação do progresso tecnológico, sobre as mudanças climáticas, tratando esse assunto como geopolítico. Não obstante isso, se revisam ainda, as consequências das alterações climáticas, antrópicas ou não para a vida no planeta Terra.

#### **Bases Teóricas do Progresso Técnico Induzido**

A economia capitalista contemporânea tem experimentado constantes aumentos na produtividade do trabalho ao longo do tempo, e uma quantia aproximadamente proporcional entre os ganhos oriundos da renda do trabalho e do capital. E de certa forma, tais variáveis acima descritas são preocupações centrais do debate político econômico nos países, pois uma pequena variação em qualquer uma delas é alvo de intensos debates.

---

<sup>5</sup> De fato, existem muitas abordagens para a mudança técnica, optou-se por revisar a do progresso técnico induzido, pois se acredita que ela incorpore melhor as dinâmicas de auto-organização contidas em Marx.

Os economistas clássicos divergiam quanto à tendência da produtividade do trabalho e da participação dos salários na renda nacional ao longo do tempo. David Ricardo e Thomas Malthus certamente ficariam surpresos com o capitalismo contemporâneo, pois acreditavam fortemente nos rendimentos decrescentes oriundos da pressão nos recursos naturais, e justamente por isso, tinham uma visão negativa quanto à produtividade do trabalho e o desenvolvimento capitalista, em virtude do preço dos alugues, infertilidade e pressão salarial.

Karl Marx, no entanto, visualizou corretamente a tendência do sistema a evoluir tecnologicamente seu modo de produção, com constantes pressões para técnicas intensivas em capital e poupadoras de trabalho, devido ao aumento da participação dos salários nos custos (ou nas palavras do próprio Marx (1985): “substituindo trabalho vivo por morto”).

Embora divergentes, os três pensadores tinham algo em comum, a inquietação do porquê a produtividade do trabalho e o salário real aumentariam na mesma proporção, **mantendo a participação dos salários na renda nacional relativamente constante**. Curiosamente, Adam Smith (1982) foi o que ficou menos surpreso com a continuidade do aumento da produtividade do trabalho paralela ao aumento do salário real (uma vez que Smith vivenciou pouco o desenvolvimento capitalista (FOLEY, 2003)). Adam Smith acreditava que a divisão do trabalho predominaria por um longo período de tempo. Embora Smith não tenha uma teoria para os salários, ele evoca constantemente a questão dos salários crescentes em uma sociedade onde a acumulação é predominante, aumentando a população e o produto.

Salve a contribuição desses pensadores, a moderna política econômica desenvolveu explicações para a participação dos salários na renda nacional manter-se constante, de certa forma, explicações bem intuitivas. Se as taxas de crescimento da produtividade do trabalho e do capital dependem das participações relativas do custo de capital e de trabalho sobre os custos totais, existe um link pertinente entre a distribuição da riqueza com o crescimento das produtividades na economia (DUMMÉNIL; LEVY, 2009).

Esse link age como um termômetro social para estabilizar a participação dos salários na renda nacional ao nível em que aumentos induzidos na produtividade do capital sejam próximos a zero, que é uma condição necessária para uma relação estável

entre acumulação e crescimento da força de trabalho (FOLEY, 2003). É bastante intuitivo o fato de que se aumentam os salários reais, a produtividade do trabalho tem que aumentar na mesma proporção para manter a participação dos salários na renda constante (os capitalistas precisam agora de menos trabalhadores para produzir).

Não gratuitamente, é que essa teoria tem importantes implicações. Ela sugere que a participação dos salários na renda nacional é independente das forças do capitalismo que levam a acumulação e o crescimento da força de trabalho, sendo determinadas inteiramente por fatores relacionados ao viés da mudança técnica (intensiva em capital e poupadora de trabalho) (FOLEY, 2003).

Enquanto essa explicação tem um poder imenso de explicação, ela deixa questões por resolver que são a base da Teoria do Progresso Técnico Induzido. A distinção clássica entre insumo de trabalho, capital e terra para a produção, repousa sobre suas condições diferentes de reprodução, ou seja, em seus diferentes mecanismos de oferta. Por outro lado, a Teoria do Progresso Técnico Induzido, repousa nas pressões dos capitalistas individuais para reduzir custos totais. O capitalista não tem motivo para distinguir seus custos entre capital, trabalho e terra, desde que eles apareçam como simples elementos do custo. Por que, “devem então as taxas de crescimento da produtividade do trabalho e do capital responder particularmente a suas participações nos custos?” A resposta, segundo Foley (2003), pode estar na generalização das técnicas que aumentam a produtividade de qualquer forma de **trabalho** para **outra forma de trabalho**, desde que todo **trabalho** seja um esforço produtivo dos seres humanos conscientes.

Hicks (1932), em seu clássico livro, *The Theory of Wages*, sugeriu que pode haver um link entre o viés macroeconômico da mudança técnica poupadora de trabalho e a tendência da participação dos salários na renda ser elevada. Hicks (1932) sugere que o progresso técnico seja endógeno (diferente dos então modelos de crescimento). Seu objetivo era explicar os diferentes mecanismos de distribuição entre rendas do trabalho e capital. Não gratuitamente, o progresso técnico induzido desempenha um papel crucial de ajuste no modelo: se acumulação tende a crescer mais rapidamente que a oferta de trabalho, o salário tende a se elevar, o que induz o capitalista a inovar tecnologicamente, buscando técnicas poupadoras de trabalho, chegando-se assim no equilíbrio entre as rendas.

Salter (1960) contestou a visão de Hicks afirmando que o interesse do empresário não é reduzir especificamente custos oriundos do trabalho, mas sim reduzir seus custos totais médios, sejam eles, grande parte de trabalho ou de capital. “Se o custo do trabalho aumenta, qualquer inovação que reduza o custo total médio é bem vinda”. Ainda segundo o autor, não há nenhuma razão para reservar atenção exclusiva sobre a mudança técnica poupadora de trabalho, a menos que o acesso ao conhecimento da tecnologia intensiva em capital seja mais fácil do que a intensiva em trabalho.

Kennedy (1964) resgatou a sugestão de Hicks (1932), para responder a Salter (1960), afirmando que seus argumentos que dão ênfase a rejeição da mudança técnica poupadora de trabalho não explicam alguns fatos históricos importantes: se o objetivo é reduzir custos totais médios independentemente da técnica, o esquema de Salter não explica em nenhum momento porque a participação dos salários e dos lucros na renda nacional permanece constante nas economias capitalistas.

Considere o modelo cujo progresso técnico ocorre no setor de consumo, a taxa de juros é constante, o trabalho é homogêneo, a função de produção é homogênea de primeiro grau e existe competição perfeita. Por simplicidade existe apenas um produto e dois fatores: capital e trabalho.

O custo total do trabalho para produzir uma unidade de produto é  $L$  e o total de capital é  $C$ . A participação dos custos de trabalho no total é dado por  $\lambda = \frac{L}{L+C}$  e a participação do capital no custo total é  $\gamma = \frac{C}{L+C}$ .

Em geral, uma melhoria técnica reduzirá o montante de capital requerido para produzir uma unidade de produto em uma certa proporção ( $p$ ), e o montante de capital em ( $q$ );  $p$  e  $q$  precisam ser menores que 1, mas não há razão para serem estritamente positivos. Uma melhoria por ser poupadora de trabalho - quando o estoque de capital aumenta na produção -, neutra - quando o trabalho e as máquinas crescem à mesma taxa -, ou poupadora de capital - ingresso de maior número de trabalhadores. Tais inovações ocorrem quando  $p$  é maior que, igual ou menor que  $q$ , respectivamente.

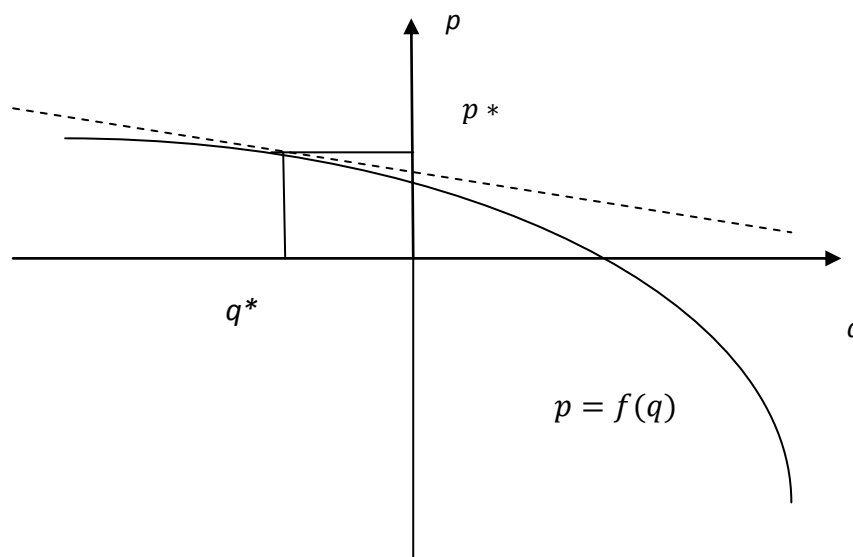
Kennedy (1964) considera razoável supor que o empresário escolherá, ou procurará, por melhorias que reduzam seu custo total por unidade na maior proporção. Com preço dos fatores constantes, a redução proporcional nos custos total ( $r$ ) pode ser escrita:

$$r = \lambda p + \gamma q \quad (3)$$

A Equação 3 sugere que a escolha do empresário da inovação, não será puramente tecnológica, mas influenciada pelos pesos econômicos de cada fator de produção,  $\lambda$  e  $\gamma$ . Em outras palavras, tem-se uma relação funcional onde a redução proporcional dos custos depende do peso de cada fator de produção no custo total e da redução de cada fator no processo produtivo. Se os custos do trabalho são elevados relativamente ao capital ( $\lambda > \gamma$ ) ele procurará, *ceteris paribus*, por inovações poupadoras de trabalho. O inverso é válido se os custos do capital são elevados relativamente ao trabalho ele poupara capital.

A firma individual se depara com uma restrição puramente tecnológica, que se refere à Fronteira de Possibilidades de Inovação de tradição Kaldoriana, sugerida por Kennedy (1964). Segue-se em 4 que a redução do montante de trabalho requerido para produção é função da redução proporcional na quantidade de capital envolvido na produção:

$$p = f(q) \quad (4)$$



**Figura 1 – Curva de Possibilidades de Inovações**

Fonte: Adaptado de Kennedy(1964).

Diante do exposto, tem-se assim um problema de maximização, onde a função objetivo  $r$  enfrenta uma restrição  $p = f(q)$ . A resolução segue o padrão usual,  $\frac{dp}{dq} = -\frac{\gamma}{\lambda}$ .

Ademais, Kennedy (1964) ressalta algumas das características da restrição do capitalista, de que a primeira derivada é negativa. Nesse contexto, melhorias de redução de trabalho e na redução de capital são competitivas, em outras palavras, quanto maior a redução de trabalho necessário para produzir uma unidade, menor será a redução possível de capital.

Não obstante, a derivada de segunda ordem da restrição também é menor que zero, o que sugere que se  $p$  se aproximar de 1 (seu limite superior), aumentos muito grandes de capital seriam necessários. Da mesma forma, se  $q$  se aproxima de 1, aumentos muito grandes de trabalho seriam requeridos. Esse comportamento é visível na Figura 1, onde o eixo vertical representa  $p$  e o horizontal  $q$ . Decorre do apresentado, que quanto maior a parcela dos custos do trabalho nos custos totais, maior será a escolha ou procura das empresas por tecnologias poupadoras de trabalho. Um viés na inovação irá alterar os pesos dos fatores de produção  $\lambda$  e  $\gamma$  no período seguinte.

Quando  $p = q$  os pesos não mudarão no próximo período e o equilíbrio será definido pela primeira derivada,  $\frac{dp}{dq}$ . Este valor pode ser considerado como um indicador fundamental do viés tecnológico nas possibilidades de inovação. Se  $p = q$ , e a primeira derivada é negativa e superior a 1, pode-se dizer que há um viés tecnológico poupador de trabalho, o que resultará num valor maior de equilíbrio de  $\gamma$  do que  $\lambda$ .

Segundo Kennedy (1964) os pesos  $\lambda$  e  $\gamma$  não constam só para representar a participação dos custos de um determinado fator no custo total, mas também para a distribuição das participações desses fatores.

A análise pode ser expandida para levar em conta a situação em que o progresso técnico ocorre no setor de capital, bem como no de consumo. Kennedy (1964) afirma que haverá determinados valores de equilíbrio de longo prazo dos pesos  $\lambda$  e  $\gamma$ , onde qualquer desvio desses valores de equilíbrio irá induzir um viés na inovação tendendo a restaurá-los.

A diferença agora decorre do fato de que a igualdade entre  $p$  e  $q$  vai deixar de poder assegurar a constância nas participações do capital e trabalho na produção de um



período para o outro, desde que a parcela dos custos de capital nos custos totais esteja continuamente reduzindo, por uma queda no custo unitário de produção dos bens de capital devido o próprio progresso tecnológico nesse setor.

Denota-se a queda proporcional no custo unitário de produção de bens de capital por “ $s$ ”, então a condição de equilíbrio nos pesos  $\lambda$  e  $\gamma$  é:

$$p = q + s \quad (3)$$

O valor de equilíbrio dependerá do valor da primeira derivada. Dada a Função de Possibilidades de Inovação o valor de  $-\frac{dp}{dq}$  é provável quando  $p$  é maior que  $q$ , do que quando  $p$  é igual a  $q$ . Para Kennedy (1964) segue-se que o progresso tecnológico no setor de capital resultará num equilíbrio maior para a participação dos salários que no caso do progresso técnico no setor de consumo.

O sistema assume uma solução particular. Nesse caso a queda proporcional do custo total médio de bens de capital ( $s$ ) será igual à queda proporcional no custo unitário de produção ( $r$ ), onde:

$$r = \lambda p + \gamma(q + s) \quad (4)$$

Que seria o mesmo que escrever:

$$r = \lambda p + \gamma(q + r) \quad (5)$$

Dado a condição de equilíbrio de longo prazo nas distribuições das participações na renda, é que  $p$  será igual a  $q+r$ , e desde que  $\lambda + \gamma = 1$ , tem-se que:

$$r = p = q + r \quad (6)$$

De modo que  $q = 0$ . Assim, sempre que esse resultado ocorrer as ações serão de terminadas pela primeira derivada da Fronteira de Possibilidades de Inovação. Assim, o equilíbrio de longo prazo é dado pela característica puramente tecnológica de  $p = f(q)$ .

Samuelson (1965) escreve uma crítica neoclássica as formulações da teoria das inovações induzidas, baseadas na função de produção neoclássica em oposição à fronteira de inovações possíveis de Kennedy (1964). Samuelson afirma que Hicks, assim como Marx antes dele, acaba com uma vaga noção de que a inovação seja viesada

no sentido de poupar trabalho. Salieta que muitos autores, incluindo os historiadores econômicos adotaram essa linha de raciocínio totalmente vaga.

Não obstante a crítica exacerbada contra as ideias de tais autores, o artigo é uma resposta ao trabalho de Kennedy (1964), cujas noções foram apresentadas acima. Samuelson (1965) expõe que embora o autor ache que esta cumprindo com o programa de Hicks, justificando o viés poupador de trabalho das inovações, na verdade ele está deduzindo um estado assintótico de mudança técnica do tipo Hicks neutro, que mostra ser instável caso a elasticidade de substituição entre os fatores for assumida como menor que 1.

Em sua explicação neoclássica Samuelson expõe um teorema provando que o crescimento constante da relação capital/trabalho levará a um equilíbrio de longo prazo que não é relativamente indutor de maior utilização de trabalho ou inovações poupadoras de trabalho, mas apenas exige num grau necessário de utilização para manter essa relação constante.

Na essência Samuelson inicia a discussão da formulação neoclássica da mudança técnica, em que o aumento simultâneo do salário real e da relação capital por trabalhador (que aumenta sua produtividade) só é obtido através da pressuposição de que as firmas otimizam ao longo de uma função de produção dada.

Em resposta ao artigo de Samuelson (1965), Kennedy (1966) escreve algumas notas fazendo algumas considerações: Primeiro Kennedy (1965) aceita as críticas de Samuelson quanto a instabilidade do modelo, quando a elasticidade de substituição entre os fatores de produção é menor que 1.

No entanto, Kennedy esclarece que existe uma diferença fundamental nas duas abordagens, e essa diferença reside na intenção metodológica dos autores. De fato, Kennedy (1964) acredita na Fronteira de Possibilidades de Inovações, no estilo Kaldoriana, para romper completamente com a tradicional Função de Produção Neoclássica. Samuelson (1965) por sua vez, adota a forma de fator-aumentativo da Função de Produção, dando ênfase as suas propriedades matemáticas.

Para Kennedy (1966) as duas abordagens tem suas fraquezas e forças. Ademais, a fraqueza de uma é a força de outra. A fraqueza de Samuelson é a sua ênfase depositada no conceito tênue de Função de Produção. Enquanto a fraqueza de

Kennedy é que ele não fornece a partir da Fronteira de Inovações, uma explicação endógena para as mudanças nos preços dos fatores no curto prazo, e é justamente o que Samuelson faz com proeza.

Ahmad (1966) também reserva críticas ao modelo de Kennedy (1964), argumentando que o autor não pode sustentar sua posição, recorrendo para isso o instrumental neoclássico de isoquantas e isocustos. O autor mostra que muitos pontos na Função de Possibilidades de Inovações, e que são à base de seu argumento de constância nas participações da renda nacional, não são atingíveis pela firma como Kennedy pretende.

Drandakis e Phelps (1966) afirmam que Kennedy (1964) deu um grande passo adiante ao introduzir o conceito de Fronteira de Possibilidades de Inovação, uma vez que os escritores anteriores falham em não prever as famílias de tecnologias novas que os inventores devem produzir e que as firmas podem escolher dada uma tecnologia original.

Os autores apresentam uma reformulação neoclássica com fator-aumentativo das hipóteses levantadas por Kennedy (1964), uma vez que consideram que o autor peca em mostrar a estabilidade da participação dos fatores no equilíbrio, assim como Samuelson já alertará. Mostram que por meio de sua Fronteira de Possibilidades Técnicas acoplada com fator-aumentativo, a taxa máxima de trabalho correspondente a uma dada taxa de capital (DRANDAKIS; PHELPS, 1966).

Atkinson e Stiglitz (1969) contrastam a discussão da abordagem de Kennedy (1964) e a de Samuelson (1965) - Drandakis e Phelps (1966) resgatando os pressupostos neoclássicos da Função de Produção, ao invés de adapta-las de maneira puramente matemática. Os autores argumentam que as abordagens neoclássicas puramente matemáticas são não históricas, mas como o progresso técnico faz parte do mundo real, a história é muito importante.

Não obstante o rico debate científico que ocorreu no final dos anos 1960, na década de 1970, alguns autores procuraram aplicar as ideias de Kennedy (1964) e a resposta neoclássica sob a mesma perspectiva, com as devidas reformulações. Um exemplo foi o trabalho de Chang (1972) que apresenta um modelo de crescimento neoclássico com mudança técnica viesada endógena, mas abordando a versão

neoclássica da Fronteira de Possibilidades Técnicas com uma série de parâmetros da mesma tradição. O autor conclui que o pressuposto de que a Fronteira de Possibilidades Técnicas é estacionária ao longo do tempo e que o progresso técnico não tem custos é bastante irrealista, mecanizando demais o modelo empregado.

De outro ponto de vista Shah e Desai (1981) abordam em um único modelo dois assuntos relacionados: a constante participação dos trabalhadores e dos capitalistas na renda nacional e o viés poupador de trabalho da inovação tecnologicamente, tratados diferentemente nos modelos de Kennedy (1964) e Goodwin (1967). Com essa agregação os autores propõem um modelo em que a mudança técnica é influenciada pelo conflito de classes existente entre os trabalhadores e capitalistas, em que os primeiros exercem uma pressão para que os últimos não imponham inovações intensivas em capital sem negociação.

No final dos anos 1980 a teoria do crescimento endógeno (neoclássica) de Lucas (1988) e (1990) e Romer (1990) tenta fornecer uma nova perspectiva para o crescimento através da tentativa de endogeneizar o progresso técnico. Em síntese, como a função de produção neoclássica, os teóricos dessa vertente neoclássica tentam endogeneizar justamente essas variações, através das externalidades positivas do conhecimento (e do aprender-fazendo) e do acúmulo de capital humano. No entanto, essa teoria não modifica os fundamentos da “velha” abordagem neoclássica, a cada momento do tempo existirá uma função de produção pela qual as firmas otimizaram as quantidades de trabalho e capital no processo produtivo.

Ainda na década de 1980 a atenção também dividiu-se com os modelos de tradição shumpeteriana, em oposição aos argumentos marxistas de inovação viesada. Contudo, Dumménil e Levy (1995), revisitado em 2009, resgataram os argumentos de Kennedy (1964), mas num modelo onde a mudança técnica também depende da distribuição, onde o capitalista irá escolher a técnica para reduzir os custos relativos aos preços correntes. A linha da função de mudança técnica tem uma inclinação negativa dada pela razão entre a participação dos lucros ( $\pi$ ) e a participação dos salários ( $1 - \pi$ ) na renda nacional. Como resultado, a média da distribuição de técnicas viáveis tem uma taxa de variação na produtividade do trabalho aumentando com a participação dos salários na renda nacional.

O poder da hipótese do progresso induzido, que une a distribuição funcional e o viés macroeconômico da mudança técnica, representa um caso prioritário, pelo menos para se saber se essa relação é verdadeira. No entanto, Foley (2003) salienta que a discussão ainda permanece viva, pois os microfundamentos da hipótese de mudança técnica induzida ainda permanecem sem uma boa explicação.

### **3.2 O Modo de Produção Capitalista e Meio Ambiente a Geopolítica das Mudanças Climáticas**

O objetivo desse tópico é revisar o que a literatura multidisciplinar tem investigado a respeito dos impactos do sistema econômico sobre as mudanças climáticas, e como essas poderiam desencadear em transformações ecossistêmicas que mudariam toda a dinâmica da vida na terra. Nesse ponto, não se faz distinção se o método científico é mecanicista ou complexo, apenas se explora como a problemática é abordada na literatura.

Contudo, ao final do capítulo se revisam argumentos de autores quanto à complexidade do tema. Tais autores analisam as dinâmicas do sistema ambiental sob a ótica moderna dos sistemas complexos, alertando da impossibilidade de se compreender o meio ambiente de maneira isolada, ou seja, pela ótica mecanicista.

De início é preciso compreender que a mudança climática não é o único efeito direto que o sistema econômico tem sobre o sistema ambiental, pois eles podem ser inúmeros, contaminação de lençóis freáticos por detritos industriais, contaminação do solo, extinção de animais importantes em cadeias alimentares, mau uso da água, dentre tantos outros impactos (PIMENTEL, et. al. (2005)).

Mas qual a definição de *Mudanças Climática*? Em seu significado mais geral refere-se às **mudanças nas propriedades estatísticas** do sistema climático, quando consideradas **por um longo período de tempo**, independentemente da causa. Nesse sentido, as mudanças rápidas do clima como a *La Niña* não representam um padrão de mudança climática (IPCC, 2007).

O termo é muitas vezes usado para se referir especificamente à mudança climática causada pela a ação antrópica, em oposição ao processo natural de transformação que a terra vivencia desde seus primórdios. Ademais, dado que a mudança climática é um tópico de interesse político ela tem sido considerada, por essa classe, como sinônimo de aquecimento global. Contudo, o aquecimento global está incluso, juntamente com outras partes do sistema ambiental que são afetadas pela emissão de gases efeito estufa, na definição de mudanças climáticas (IPCC, 2007).

Na presente investigação considera-se como mudança climática, toda alteração que se refere à variação do clima em escala global ao longo do tempo. Estas variações podem ser mudanças de temperaturas, precipitação e outros fenômenos climáticos em relação às médias históricas durante um longo período de tempo e que possam transformar o ecossistema global ou os biomas regionais do planeta (IPCC, 2011). Não obstante, pode-se considerar que todo impacto ambiental que não for mitigado conduzirá o planeta para um estado de mudança climática, assim ela pode ser encarada com um *fim*.

### **3.2.1 A Geopolítica das Mudanças Climáticas**

As questões ambientais têm assumido um caráter global e alarmante nos últimos anos, já que nos primórdios (década de 1950), a “preocupação” era apenas com a possível extinção das espécies, e tal preocupação concentrava-se apenas num pequeno grupo mais esclarecido da sociedade. Contudo, o que atualmente passou a preocupar a sociedade é o risco da extinção da própria raça humana.

Para Leff (2001a) as pessoas viam a natureza como um conjunto ilimitado de recursos necessários à sobrevivência, além de um extenso depósito de resíduos oriundos da atividade produtiva da economia. Essa visão utilitarista, na concepção do autor, “coisificou” a natureza, levando-a a ser entendida como um objeto a ser apropriado e utilizado infinitamente. Essa questão é corroborada por Costa (2007) que acrescenta a idéia de que a hipótese de se tratar a natureza como objeto separou o homem da própria natureza.

É interessante compreender que as mudanças climáticas são ditas globais porque seus efeitos causadores, tais como a emissão de gases efeito estufa (GEE), afetam todos os territórios independentemente do local onde eles foram gerados. No entanto, muitos autores, como Veiga (2010), Rogers, Jalal e Boyd (2007), argumentam que as responsabilidades dos países na emissão dos gases efeito estufa são distintas, na medida em que os países ricos teriam maiores responsabilidades dos que os pobres.

Buscando avaliar o peso geopolítico das emissões de GEE economistas tem realizado um esforço empírico para comprovar a famosa Hipótese da Curva de Kuznets Ambiental. Esta hipótese pretende mostrar a relação côncava entre o PIB per capita e a emissão de gases efeito estufa. Basicamente, essa relação é crescente até um ponto de máximo, onde a partir desse se diminuem as emissões de poluentes.

Cialani (2007) estimou um modelo econométrico para testar essa hipótese para as regiões italianas no período de 1860 a 2002. A autora verificou uma curva clássica em formato de “U” invertido, com um ponto de máximo no nível US\$ 26.900,00 de PIB per capita. Outro estudo pertinente, de Carvalho e Almeida (2010) utilizaram econometria espacial para tentar comprovar a hipótese ambiental de Kuznets. Os autores encontraram tanto um formato quadrático, como um formato cúbico, que graficamente seria em forma de “N”, ou seja, as emissões voltariam a crescer para níveis mais elevados de PIB per capita. Outra comprovação interessante por parte dos mesmos autores, é que países que assinaram o protocolo de Quito registram diminuição relativa de emissões de gases efeito estufa.

Cole (2004) investigou a mesma hipótese utilizando dos modelos de painel de dados convencionais, acrescentando o efeito da migração de indústrias no potencial poluidor dos países. O autor verificou a hipótese de Kuznets Ambiental. No entanto, alguns autores como Bradford et. al. (2005), contestam varias especificações econométricas para esses estudos, sobretudo, as estimações em painéis de dados lineares. Como contribuição, os mesmos estimam um painel não linear, levando em consideração a não estacionaridade longitudinal das emissões. Com essa nova especificação os autores encontram um “U” invertido para seis dos quatorze poluentes monitorados no mundo.

Outros autores que questionam as especificações econométricas são Millimet, List e Stengos (2003), estimando regressões pelos métodos paramétricos clássicos e por

métodos semi-paramétricos e não paramétricos. Os autores encontraram significativas diferenças nos resultados em ambos os métodos, no entanto, a estimação não paramétrica demonstrou ser a mais robusta. Outra afirmação pertinente do estudo é que embora existam diferenças entre as especificações, todas confirmam a trajetória crescente de muitos países no mundo.

Marquetti e Pichardo (2011) exploraram essa problemática relacionando os fatos estilizados Kaldorianos com a emissão de gases efeito estufa. Dentre os resultados, verificaram que o aumento da produtividade do trabalho (uma das taxonomias do progresso técnico que é positiva para as nações) se relaciona positivamente com a emissão desses gases, ou seja, com a aceleração do processo de mudança climática.

Outra linha, liderada por pesquisadores multidisciplinares, além de economistas ecológicos, discute a geopolítica das emissões de gases efeito estufa considerando uma nova abordagem, a Teoria do Sistema Mundo. Para esses autores, tais como Galaty (2011), não é necessário testar uma hipótese de que os países que mais emitem poluentes são os mais desenvolvidos. Para a corrente do Sistema Mundo, existem os países centrais que lideram as emissões de poluentes, existem os países em desenvolvimento gravitacionando em torno dos desenvolvidos, e existem os países periféricos ou pobres, num anel mais distante. Ou seja, a teoria prevê uma sobreposição circular de grupos de países.

Para Galaty (2011), ambos os países fora do círculo menor, ou seja, o círculo que concentra os países centrais, querem chegar aos níveis de desenvolvimento, ingressando no círculo central. Assim, as emissões de poluentes aumentariam, não havendo necessidade de uma comprovação econométrica do fato, e sim, uma profunda discussão sociológica transdisciplinar dos impactos dessas estratégias entre países.

Não importa a abordagem em que se considere para análise das mudanças climáticas e de seus impactos na nova dinâmica mundial, o que é pertinente considerar em ambos os estudos é que o sentido das conclusões são sempre os mesmos: é necessário rever os padrões de produção e consumo da economia mundial, ou investir em mudanças técnicas mais limpas, para que as próximas gerações tenham a possibilidade de desfrutar de todos os aspectos positivos da natureza.



### 3.2.1 Consequências das Mudanças Climáticas para a Vida na Terra

Sachs (2005) afirma implícita e explicitamente que mudanças climáticas podem desencadear num efeito devastador para a vida na Terra. Mas qual a real dimensão dessa afirmação? E o mais importante, quais são as reais consequências para as gerações atuais e futuras?

Desde a segunda metade do século XIX pesquisadores têm procurando demonstrar que a concentração de dióxido de carbono na atmosfera provoca o aumento das temperaturas, em virtude da capacidade de bloqueio desse gás sobre a “radiação de onda longa” procedente do planeta, produzindo o que se convencionou chamar de efeito estufa (CONTI, 2005). No entanto, o efeito estufa não fica restrito apenas a esse tipo de gás, sendo causado por outros como: o metano, óxido nitroso, ozônio, dentre outros.

O que é certo, contudo, é o significativo aumento das substâncias citadas acima, devido principalmente as ações antrópicas, tais como a queima de combustíveis fósseis, fruto da industrialização em larga escala, da expansão das áreas urbanas, desmatamento e queimadas de biomas, crescimento da criação de bovinos, dentre inúmeras outras ações humanas (VEIGA, 2010).

Segundo o relatório do IPCC (2010) a temperatura na terra subiu em média 0,8° C no último século. Algumas consequências são frequentemente relatadas em artigos especializados e nos meios de comunicação, o derretimento nos Andes Meridionais, furacões em locais não usuais, verões com temperaturas muito elevadas no hemisfério norte, estiagens severas em regiões habitualmente úmidas, doenças de populações carentes.

Bessat (2003) publicou um artigo, no qual relata que a temperatura média da terra tende a crescer 2,0°C de 1990 a 2100, elevando o nível do mar de 0,5 a 0,8 m até 2100, ocasionando ainda, maior precipitação do inverno nas latitudes mais elevadas, maior incidência de secas e alteração no ciclo natural do carbono.

Acot (2003) tem uma visão mais pessimista ainda, indicando que até 2050 a temperatura na terra tende a se elevar em média 5°C, além do aumento do nível do mar

ser de 1 metro. Ressalta o autor ainda que, mais de 80% da população mundial vive em regiões costeiras, e que suas constatações teriam um impacto preocupante para tais.

No entanto, é um equívoco tremendo atribuir somente à ação antrópica a culpa pelo aumento da temperatura terrestre. Sabe-se, que a terra naturalmente ao longo do tempo, vêm aumentando suas temperaturas médias, como já alertado por (BAK, 1996). Ademais, o fenômeno das mudanças climáticas é muito mais complexo do que uma simples elevação das temperaturas globais, mesmo porque o clima não é definido apenas pela temperatura. O que é pertinente compreender, contudo, é que a elevação das temperaturas desencadeia e se correlaciona fortemente com outros processos.

Um dos efeitos mais investigados das mudanças climáticas é a redução da produtividade na agricultura, dentre eles, Nadal (2010) estimou uma perda de produtividade por hectare mundial que resultaria na queda da lucratividade dos países produtores. No entanto, o autor salienta que as regiões mais pobres, cuja agricultura é de subsistência, sofrerão mais os impactos do que aquelas voltadas para o agronegócio.

Diretamente correlacionada à perda de produtividade agrícola esta a diminuição da oferta de alimentos. Rosenweig e Parry (1994) foram os pioneiros ao investigar essa hipótese, constatando-a. Contudo, afirmam que os países desenvolvidos sofrerão menos com a escassez de alimentos, pois dispõem de mais recursos para a compra. Ademais, identificaram que tal diminuição da oferta, pode aumentar ainda mais as disparidades entre os países ricos e pobres.

Brown, Meeks e Yu (2008) também trataram da oferta de alimentos, ressaltando a possibilidade de redução da mesma, sendo que os países da África seriam os mais afetados, contribuindo negativamente para a qualidade de vida daquela população. Além de outros efeitos investigados no artigo, uma das estimativas mais preponderantes foi a da qualidade da água, sendo que em países africanos mais de 70% da água disponível pode estar contaminada até 2050.

Outro dado relevante segundo o relatório do IPCC (2007) é que 1,2 bilhões de pessoas (um quinto da população mundial) vive em regiões com escassez física de água, enquanto 1,6 bilhões de pessoas (ou um quarto da população mundial) vivem em locais, cujas condições socioeconômicas não permitem o abastecimento de água potável a

partir de rios ou aquíferos. Os países mais pobres, como os do continente africanos são apontados como os que mais sofrem esse tipo de escassez.

Não obstante isso, segundo o mesmo relatório, muitos fatores tem exercido pressão sobre a diminuição da oferta de recursos hídricos, como o crescimento da população nos últimos anos, o aumento das áreas de urbanização que elevam a demanda (medida em densidade demográfica) por água, consumo desenfreado e inconsciente do recurso, além de que as próprias mudanças climáticas irão diminuir a oferta de água doce, em virtude das alterações de seu ciclo.

A Organização Mundial da Saúde estimou em (2002) que as populações mundiais registram 140.000 mortes anualmente, na década de 1990, devido às mudanças climáticas, principalmente ao aquecimento global, ao aumento da precipitação e de desastres ambientais.

No último levantamento de 2004, a Organização Mundial da Saúde estimou que as mortes ocasionadas pelas mudanças climáticas aumentaram para 142.000 (apenas em 2004). Sendo que desses, a grande maioria concentra-se no sudeste da Ásia e no continente africano, acumulando 41,04% e 40,09% respectivamente. Não obstante isso, a distribuição de mortes por sexo é homogênea (51,88% para homens 48,11% para mulheres). Para ambos os sexos o percentual de mortes é maior nas crianças de 0 a 4 anos de idade, 79,05% entre os homens e 91,79% entre as mulheres.

Em face de tantos efeitos, sejam naturais ou oriundos de ações antrópicas, Storm (2009) atribui muito da responsabilidade à ideologia capitalista do egoísmo individual e da busca de lucro desenfreada pelos capitalistas, que força muitas vezes os capitalistas a **inovarem** sem levar em conta se a tecnologia é limpa ou não. O autor se opõe ao argumento de que a desregulamentação dos mercados possa contribuir para o desaquecimento, salientando que só que instituições fortes é que proposições democráticas e justas podem ser levantadas para minimizar o problema.

## 4 MÉTODOS E TÉCNICAS

No presente capítulo será apresentada uma discussão a respeito dos métodos, técnicas e da forma de operacionalização do estudo. Inicialmente discorre-se sobre a noção de Equilíbrio Pontual num modelo simples de evolução desenvolvido por Bak e Sneppen (1993). **Tal modelo representa a base da simulação matemática que é feita nessa pesquisa.**

Discutem-se aqui ainda, as formas como foram realizadas as simulações com a finalidade **de compreender as relações entre a mudança técnica e as adaptações ambientais no nível da firma.** Portanto, o modelo simulado opera no nível microeconômico, mas com consequências globais<sup>6</sup>.

Baseando-se nas discussões de Schelling (1993) sobre a importância do nível micro para compreender a dinâmica do macro, **o modelo é proposto a partir de uma simples alteração nos microfundamentos da decisão de mudança tecnológica numa firma individual, para contemplar a lógica dos sistemas complexos.**

Ademais, ainda nesse capítulo, justifica-se a adoção de uma variável *fitness* para a *adaptação* (ou o cuidado) das firmas com o meio ambiente. Assim, para cada firma é atribuído um *fitness* na simulação, que representa sua capacidade de adaptação ao meio que se encontra.

Portanto, o que se está considerando aqui é que o sistema econômico, pelo qual o progresso técnico ocorre, está inserido num outro sistema maior, o ecossistema. Esses sistemas são entrelaçados por nexos interiores, cujo funcionamento depende de causalidade direta, indireta e/ou pró e retroalimentar.

Para tanto, o trabalho caracteriza-se como sendo de caráter aplicado, que segundo Richardson et al. (1999), parte de teorias ou leis pré-estabelecidas, e tem por objetivo pesquisar, comprovar ou refutar hipóteses sugeridas por modelos teóricos. Quanto à lógica, recorre-se ao método dedutivo. Nessa perspectiva, como se sabe, toda explicação científica consiste em deduzir certos pressupostos que especificam as condições iniciais e as leis de comportamento dos fenômenos (PRADO, 2009).

---

<sup>6</sup> Como o que será detalhado em 4.3 e no Capítulo 5.

Em nível de complexidade adota-se a pesquisa descritiva, cuja finalidade é descrever num elevado grau de detalhamento grande parte das variáveis que interferem o objeto de estudo (Gil, 2002), além de proporcionar o desenvolvimento de uma análise que permitirá a identificação dos diferentes aspectos dos fenômenos, sua ordenação e nível de classificação (OLIVEIRA, 2002). Nesse sentido, a abordagem apropriada é a quantitativa, que é caracterizada por Richardson et al. (1999), pela quantificação tanto na forma de coleta das informações, quanto pelas técnicas matemáticas empregadas, nesse caso particular.

Em relação às técnicas adotadas, inicialmente, parte-se de uma pesquisa bibliográfica, cujo objetivo eminente, na concepção de Oliveira (2002) é garimpar as diferentes formas que a investigação científica demonstra ou (de forma ainda mais categórica) tenta explicar determinada problemática. Nessa primeira etapa revisaram-se conceitos e teorias, presentes nas ciências sociais, particularmente na ciência econômica, nos seguintes ramos: Crescimento econômico, nesse âmbito a teoria do Progresso Técnico Induzido; e Economia da Complexidade, cujo delineamento parte do estudo dos modelos de *Criticalidade Auto-Organizada*; além das técnicas quantitativas aplicadas a ciência econômica, em particular: regressão não paramétrica e o modelo de Bak-Sneppen, adaptado, na presente investigação, da biologia para a economia.

Para atender o que se propõe o capítulo está organizado da seguinte maneira: primeiro apresenta-se o referencial teórico da Mudança Técnica Induzida com as devidas adaptações; em seguida revisa-se o modelo Bak-Sneppen puramente biológico; posteriormente apresentam-se as formas de operacionalização do estudo, sobretudo, a maneira como foram realizadas as simulações matemáticas. Por fim, adaptamos as regras do modelo para a teoria econômica da mudança técnica e para a literatura das mudanças climáticas.

#### **4.1 Microfundamentos da Mudança Técnica Induzida: o marco teórico**

A teoria do Progresso Técnico Induzido é um forte exemplo de que a auto-organização dos sistemas complexos pode se manifestar concretamente na perspectiva histórica do desenvolvimento. A teoria explica regularidades observadas nos sistemas

econômico (tipos de progresso técnico e distribuição) sem explicar o comportamento específico da invocação tecnológica, ou os detalhes particulares do método de produção que emerge ao longo desse padrão. Em outras palavras, a teoria ocupa-se de explicar os processos da mudança técnica e não o tipo específico de tecnologia adotada.

Aliado a isso, o próprio pensamento de Marx sobre a não consciência individual de que o viés tecnológico resultaria em uma redução no lucro agregado, que representa a base do progresso técnico induzido, é sem dúvida alguma, um exemplo claro de auto-organização sistêmica.

Nesse particular, o presente trabalho concentra-se na visão do processo histórico do progresso técnico como evolução do sistema econômico. A cada momento do tempo, os capitalistas devem tomar a decisão de inovação tecnológica, se aumentam sua capacidade técnica (evoluem) ou não. Justamente por isso, o progresso técnico do sistema econômico é um processo histórico, não sendo visto isoladamente, mas a partir de toda a tecnologia disponível na economia e na interação entre os agentes.

A evolução da produtividade do capital e do trabalho sobre as relações sociais do capitalismo na hipótese da pesquisa envolve incentivos às inovações, além dos custos atrelados a elas. A inovação é que cria o impulso para a evolução, que não se dá de modo isolado, devido ao *catching-up* entre os países líderes em inovação e os seguidores.

Kennedy (1964) contribui significativamente para a discussão do progresso técnico na ciência econômica, através de uma justificativa teórica para a mudança técnica poupadora de trabalho devido a elevada participação dos salários na contabilidade da firma, que num sentido mais amplo, é o próprio argumento de Marx.

Nesse sentido, a presente investigação busca readaptar o modelo conceitual de Kennedy (1964) para contemplar a noção de complexidade, inerente ao processo de mudança tecnológica do capitalista individual. Para tanto, se flexibilizará o problema de maximização estrito apresentado nas Equações 1 e 2.

Embora a proposta de Kennedy (1964) seja uma construção microeconômica reducionista, adota-se aqui uma perspectiva microeconômica sistêmica, referenciada pelo pensamento de Thomas Schelling. Para Schelling (1993) os dois modos de pensar a microeconomia são distintos: no primeiro modo os agentes são entendidos como

unidades maximizadoras em face de suas escolhas, dotados de racionalidade perfeita; no segundo caso os agentes são praticamente unidades sem visão que vivenciam um processo de constituição para a tomada de decisão, dotadas de uma racionalidade limitada. Prado (2005) complementa dizendo que no primeiro caso “os todos econômicos” são sempre como resultados gerados por somas simples das suas interações. No segundo, no entanto, eles são compreendidos como sistemas já que “as interações que os constituem em processos, os próprios agentes como tais”.

Ora, de maneira alguma esses conceitos soam novos na ciência econômica, pois era justamente isso que Marx reconhecia em sua explicação sobre mudança técnica e na concepção de tendência declinantes das taxas de lucro, contida no volume I de *O Capital*. Marx não reconhecia a existência de uma consciência individual, mas a complexa ação de uma consciência coletiva, justamente por isso o capitalista toma a decisão de inovação tecnológica no nível micro, mas no nível macro o lucro agregado tenderia a diminuir.

Na presente investigação entende-se que quando Kennedy (1964) menciona seu problema de maximização da redução proporcional nos custos sobre a restrição da Fronteira de Possibilidades de Inovação,

Maximizar:

$$r = \lambda p + \gamma q \quad (7)$$

Sujeito a:

$$p = f(q)$$

**não significa dizer que todo capitalista move seus fatores de produção em direção estrita a técnicas poupadoras de trabalhos no mesmo período de tempo.**

Não é necessário que cada capitalista aumente seu estoque de capital para economizar trabalho, ou seja, maximize. Embora essa seja sua intenção como indivíduo, **o capitalista incorre em erros**, às vezes adotando (e se movendo em direção a) técnicas de produção não tão lucrativas, **pois seu conhecimento não é perfeito**. É justamente o erro de uns e o acerto de outros (desequilíbrio) que leva a equalização das participações na distribuição global.

O que o problema de maximização informa é que a probabilidade do capitalista adotar uma tecnologia poupadora de trabalho, em que a produtividade do trabalho aumenta (situada no quadrante II da Figura III) é maior das demais, em virtude das características puramente tecnológicas da Fronteira de Possibilidades de Inovações.

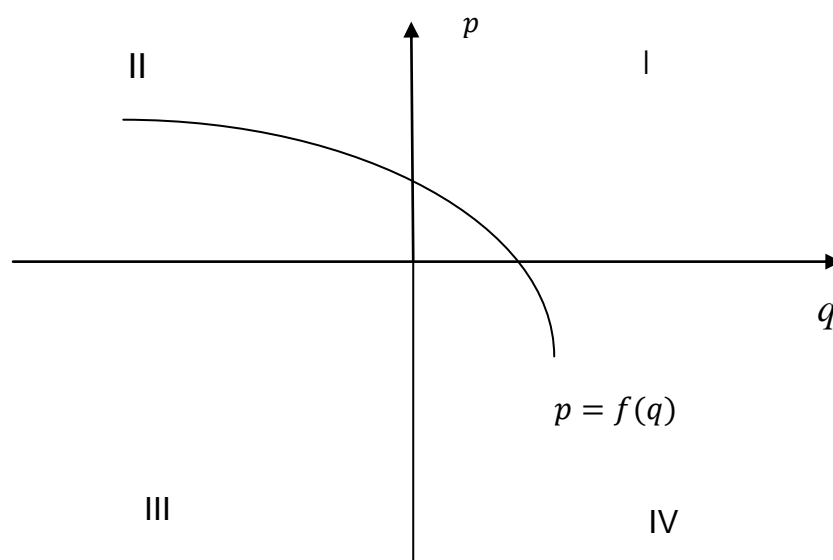


Figura 2 – **Fronteira de Possibilidades de Inovação - Kennedy**

Fonte: Kennedy (1964)

Dada essa maior probabilidade, no nível macroeconômico do sistema, espera-se que o comportamento da mudança técnica seja em direção a uma maior produtividade do trabalho (embora, não é em todo o tempo que o progresso técnico assuma essa característica). Assim, o progresso técnico é o mecanismo que o sistema utiliza para romper uma barreira técnica.

A criticalidade auto-organizada é representada pela decisão individual da firma em constante interação com as demais, num processo de cópia tecnológica no sentido marxista clássico.

Nesse contexto, o sistema pode ser encarado como o sistema econômico da relação de capital. Trata-se de organismo caracterizado por um princípio de desenvolvimento infinito, evolução, por possuir um funcionamento global que escapa



do controle das firmas individuais, as quais por si mesmas são entendidas como suportes ou funções das próprias relações de produção. A evolução ocorre segundo “automatismos” que pode vir a sabotar a ação reflexiva das firmas individuais, dado o resultado coletivo (Prado, 2005).

#### **4.2 Equilíbrio Pontual num Modelo Simples de Evolução: a abordagem de Bak-Sneppen: a técnica**

Em 1987 Bak, Tang e Wiesenfeld construíram um protótipo simples de um modelo de criticalidade auto-organizada, o modelo da pilha de areia. Os cálculos do modelo mostraram como o sistema, que obedecia a leis locais simples, podia organizar-se autonomamente em um estado de equilíbrio que evolui em passos graduais, com explosões intermitentes, ao invés de passos suaves.

Posteriormente, em 1993, Bak e Sneppen adaptaram o modelo da pilha de areia para tentar descrever o processo de evolução darwiniana. Darwin propôs uma formulação concisa para evolução da vida na terra, além de dar a ela uma completa descrição. A teoria da evolução de Darwin concentra-se na evolução em menor escala, ou seja, na microevolução (Kaufman, 2005). E isso se apresenta como uma dificuldade, segundo Bak (1996), pois não se conhecem as consequências dessa teoria para a evolução em maior escala, a macroevolução, sendo difícil de confrontar, e possivelmente falsear, a teoria pela observação dos resquícios fósseis.

Bak (1996) salienta que fora na época de Darwin que Charles Lyell formulou a filosofia do gradualismo, na qual tudo poderia ser explicado em termos dos processos que são observados ao seu redor, funcionando sempre com a mesma taxa ao longo do tempo. Assim, um comportamento de pequena escala pode ser estendido e facilmente acumulado para produzir eventos de grande escala, não é necessária nenhuma descrição de comportamento adicional e todas as magnitudes podem ser explicadas por extrapolação.

Tanto em Kaufman (1995) como em Bak (1996) fica suficientemente claro que Darwin aceitou o gradualismo de Lyell completamente, acreditando que nesse

mecanismo, as mutações aleatórias seguidas de proliferação e seleção natural se ajustariam para uma boa evolução gradual.

De fato, muitos biólogos que estudam a evolução acreditam nessa hipótese, contudo, Niles Eldridge, questiona essa visão, afirmando que a teoria de Darwin está incompleta, pois não explica as extinções que ocorreram por catástrofes, como a dos dinossauros, por exemplo, (BAK, 1996). Compartilhando dessa visão, Gould (1989) afirma que só com uma abordagem narrativa histórica completa é possível para estudar a evolução.

É nesse particular que o trabalho de Bak e Sneppen (1993) se insere: para explorar, por modelagem matemática adequada, as consequências da teoria de Darwin. Basicamente, a intenção dos autores foi verificar se a teoria da criticalidade auto-organizada é aplicável a esse caso, enquanto as avalanches do modelo pudessem representar o link entre a visão de Darwin de evolução contínua e as pontualidades dos sítios representando mudanças quantitativas e qualitativas.

Assim, Bak e Sneppen (1993) introduzem um modelo no qual a população total de uma espécie é representada por uma variável *fitness* (adaptação). O *fitness* representa no modelo, a capacidade de adaptação daquela espécie ao meio no processo evolutivo, sendo determinado de maneira aleatória e apresentado arbitrariamente num único valor que varia de 0 a 1: quanto mais próximo de 1 maior a capacidade de adaptação daquela referida espécie, enquanto o inverso é válido.

Ademais, cada espécie interage com seus dois primeiros vizinhos, num sentido de cadeia alimentar, podendo segundo Bak e Sneppen (1993) ter seu predador à esquerda e sua presa a direita. No início da simulação matemática, cada sítio  $x$  recebe aleatoriamente um número  $B(x) \in [0, 1]$  de *fitness*. Cada espécie terá, portanto, que superar sua barreira de *fitness* a fim de evoluir. Os demais passos do modelo obedecem a basicamente duas regras de comportamento.

A **primeira regra** afirma que *a espécie de menor fitness deve ser encontrada e seu valor mudado aleatoriamente*. A explicação é intuitiva para mudar a espécie de menor *fitness*: Quando uma espécie tem um *fitness* total baixo, existem muitas maneiras dela poder melhorar a sua adaptação, pois quase toda mudança é benéfica. Se se pensa o *fitness* como uma barreira que deve ser superada, para uma espécie de baixo

*fitness*, existem inúmeras barreiras baixas. Com o aumento da aptidão, no entanto, não existem tantas maneiras para melhorar; as barreiras se tornam mais exigentes e é cada vez mais difícil melhorar sua aptidão. Uma espécie de *fitness* alto "é relativamente estável, sendo a maioria das suas alterações prejudiciais" (BAK, 1996).

A **segunda regra** ocorre no mesmo momento de tempo que a primeira, *onde também devem ser alterados aleatoriamente os fitness das duas espécies situadas imediatamente à direita e à esquerda da espécie de menor fitness*. A compreensão dessa segunda regra pode se dar pela lógica da presa-predador, ou entendida como dois organismos competindo pelo mesmo alimento, devido ao fato das espécies não existirem em completo isolamento.

Mas por que o *fitness* deve ser mudado aleatoriamente e não simplesmente crescer já que se pretende demonstrar evolução? Bak (1996) responde a essa pergunta afirmando que em um processo evolutivo algumas espécies podem sair ganhando e outras perdendo, dependendo do sentido da mutação da primeira espécie. Assim, como todas as mutações são imprevisíveis a mudança do valor de *fitness* permanece aleatória.

Observando a dinâmica das simulações computacionais do modelo Bak-Sneppen, inicialmente cada espécie recebe seu valor de *fitness* representado por um diagrama de dispersão uniforme. Percebe-se que, embora haja oscilações para baixo e para cima o valor médio de  $B(x)$  tem uma trajetória crescente, até que ele não cresce mais. Neste caso, todas as espécies têm valores de *fitness* acima de certo **limiar**.

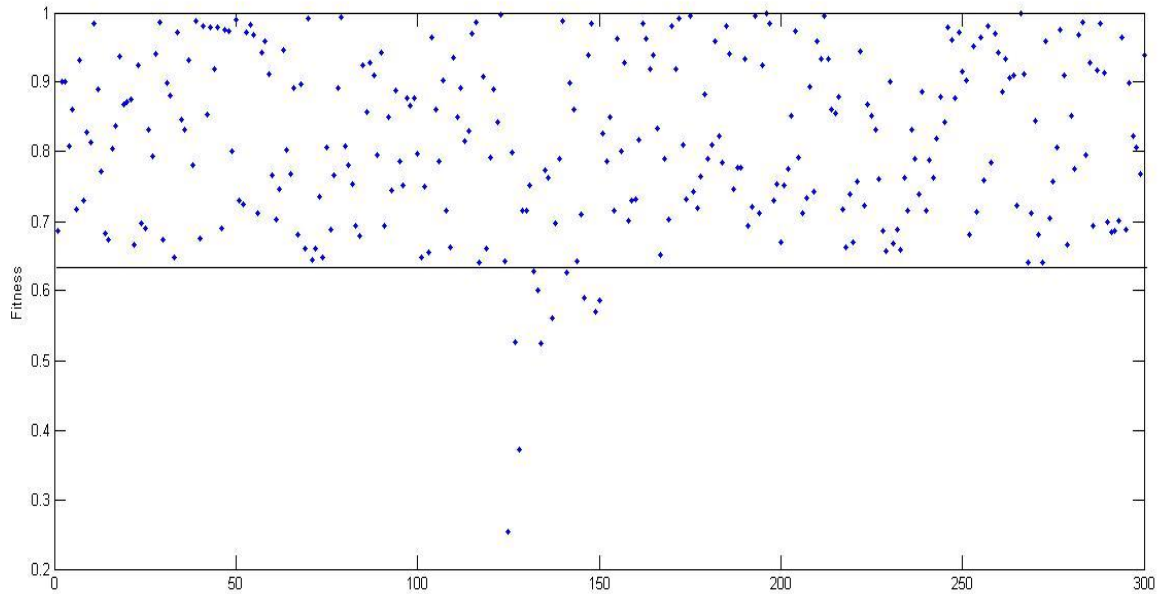
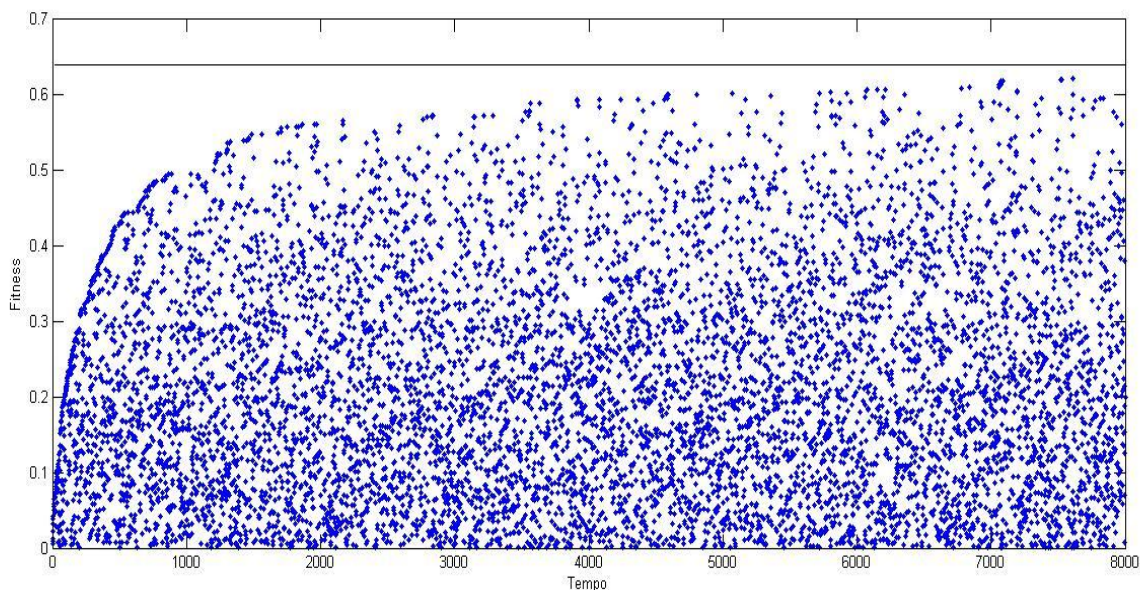


Figura 3 – Distribuição dos Fitness no Estado Estacionário – Modelo Bak-Sneppen. Espécies=300,  $t= 40.000$ .

Fonte: Elaborado pelo autor a partir da versão original de Bak-Sneppen, (2012).

A Figura 3 ilustra uma distribuição de *fitness* num momento do tempo, quando o sistema já atingiu o estado estacionário. O *fitness* limiar é o mais alto nível que a espécie de menor *fitness* alcançou em  $t$  passos ao longo da simulação. É representado por uma linha horizontal que se eleva com o tempo, e apesar de rajadas de queda de atividade abaixo desta linha, a linha só vai para cima, nunca para baixo. Ademais, é o mais elevado estado estacionário crítico do sistema que se auto-organizou até determinado ponto na simulação (BAK, 1996).

É importante notar que a linha limiar só pode se elevar se o menor *fitness* de todo o ecossistema atravessar a linha, situando-se acima da mesma. Quando o *fitness* limiar é baixo, isso é fácil de acontecer, mas como a aptidão limite sobe, torna-se mais difícil para todos os *fitness*, situarem-se acima do limiar, ao mesmo tempo. Não obstante isso, o valor desse limiar **crítico** chega a um valor relativamente alto, um pouco maior que 0,66. Essa evolução do *fitness* é apresentada na Figura 4 para a simulação da versão original de Bak-Sneppen (1993).



**Figura 4 – Evolução do Fitness Mínimo no Modelo Bak-Sneppen - Espécies=300, t= 40.000 (apenas os primeiros 8000 passos são apresentados)**

Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor a partir da versão original de Bak-Sneppem (2012).

Percebe-se da Figura 4, que a evolução se dá rapidamente em direção ao estado estacionário, pois as possibilidades de evolução são maiores, no entanto, uma vez atingido esse estágio, essas possibilidades se tornam menores.

A partir da compreensão do *fitness* limiar se pode compreender o significado de *avalanche*. Uma avalanche é uma “cascata” de mudanças de *fitness* abaixo do limiar (na simulação, representadas por pontos que entram e saem por debaixo do limiar), muito embora, esse comportamento também resulte em mudanças acima da linha, em muitos casos. A duração da avalanche é o número de mutações abaixo do limiar, terminando quando a espécie de menor aptidão cruza a linha, posicionando-se acima.

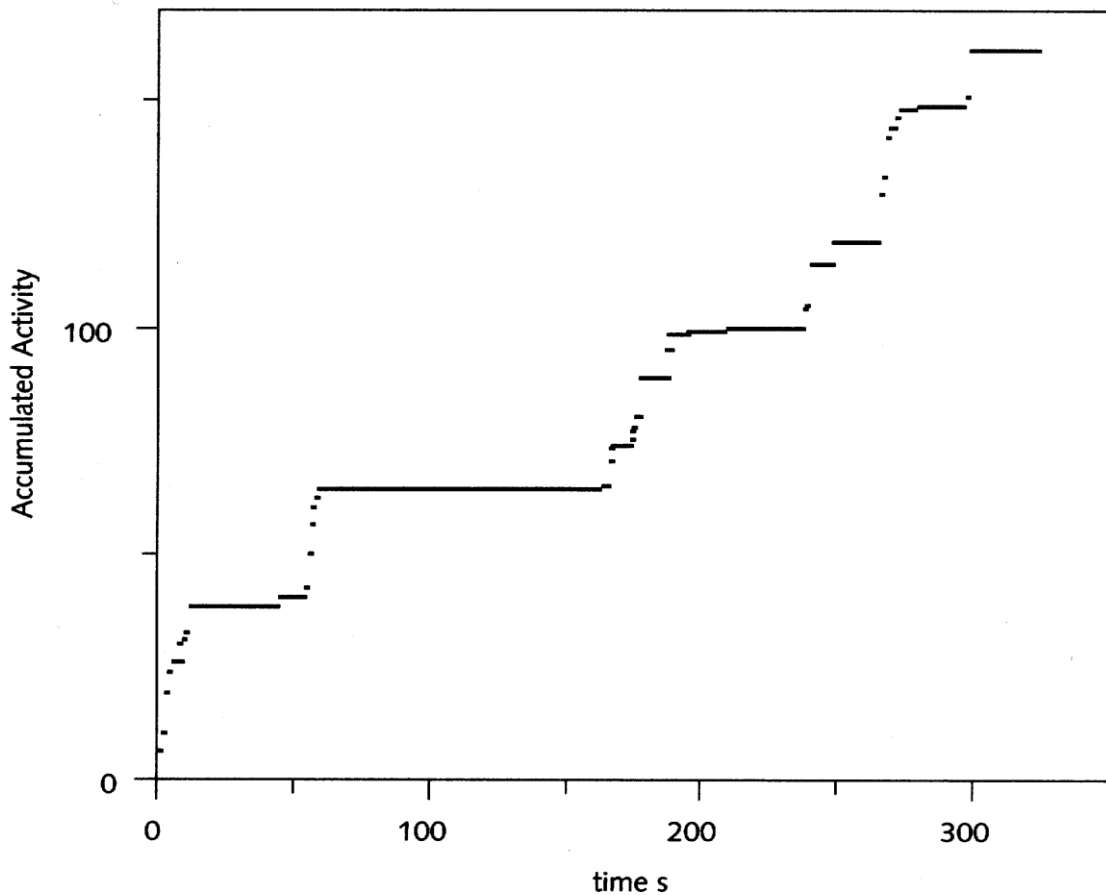
As simulações do modelo feitas por Bak e Sneppen (1993) e Bak (1996), confirmam que não há contradição com a teoria de Darwin, exceto pelo fato do modelo Bak-Sneppen apresentar *equilíbrio pontuado*. O equilíbrio pontuado surge a partir das discussões de Gould e Eldridge (1977) que se contrapunham ao gradualismo de Lyell.

Para os autores, o conceito ilustra a criticalidade de um sistema complexo. Os sistemas podem ter memória do passado e passar por longos períodos de calma, onde as mudanças são pequenas e locais, permitindo assim que eles preservem o que eles

tenham aprendido ao longo do tempo. É o chamado equilíbrio pontual ou pontuado. A evolução entre esses estados de equilíbrio acontece por avalanches de grande atividade global.

No modelo Bak-Sneppen o equilíbrio pontuado é exibido pela chamada *escada do Diabo*, mostrada na Figura 5. Ela mostra a atividade acumulada de uma espécie passando por uma série de mudanças evolutivas. As linhas horizontais representam períodos de tempo em que há pouca variação (ou nenhuma variação), os chamados períodos de *stasis*, ou estáticos. Saltos verticais representam mutações pontuais.

Outra característica reservada ao modelo é a evolução do tipo *Red Queen*. Essa postula que as espécies não sofrem uma mudança evolutiva isoladamente, mas são motivadas pelas mudanças nas espécies que interagem com ela (BAK, 1996). Por exemplo, uma espécie de presa corre mais rápido para evitar ser devorada pelo seu predador, isso estimula que o predador evolua para correr mais rápido, o que por sua vez faz com que a presa evolua para correr mais rápido, e assim por diante.



**Figura 5 – Escada do Diabo e a Evolução com Equilíbrio Pontual**

Fonte: Bak-Sneppen (1993)

A evolução do tipo *Red Queen* ocorre quando as espécies imediatamente à esquerda e a direita também mudam seu *fitness* devido à mutação na espécie de menor valor, pois quando mais próximo da mudança maior será o impacto.

Kauffman e Johnson (1991) propõem que nem o *fitness* de uma espécie, nem seu habitat é fixo. Esta ideia é muito próxima da evolução do tipo *Red Queen*, e é chamada de *Dancing Fitness Landscapes*. O *fitness* de um organismo está sempre relacionado com o outro em que ele interage, assim, se um organismo altera seu *fitness*, os outros organismos que com ele interagem também mudarão, sem fazer um devido esforço para isso. De fato, eles representam um sistema que responde por *feedbacks* negativos e positivos. (BAK, 1996).

Kauffman e Johnson (1991) querem passar a ideia de que a vida é uma *dança* onde você não pode apenas atingir um *fitness* ótimo e “estacionar” lá, mas deve

“dançar” continuamente para manter seu *fitness* maximizado em um habitat sob constante mudança, devido à mudança das outras espécies.

Segundo Bak e Sneppen (1993) o comportamento de *Dancing Fitness* ocorre em dois momentos no modelo Bak-Sneppen. Primeiro no início da simulação, quando o aumento da linha de *fitness* limiar ocorre devido ao comportamento evolutivo do tipo *Red Queen*. A segunda ocorrência é durante as avalanches quando o *fitness* limiar está próximo de 0,66. Espécies não envolvidas nas avalanches não mudam seu *fitness*, mas se uma avalanche ocorre próxima a sua região então o comportamento *Red Queen* estará operando para aumentar a média de *fitness* da avalanche das espécies, aumentando o limiar.

No experimento da pilha de areia, Bak et al. (1987) aplicam a idéia de que um sistema aberto é capaz de se auto-organizar evoluindo para o estado crítico, sob o comportamento de avalanche. Não é gratuitamente que Bak e Sneppen (1993) resgatam essa noção, adaptando-a a sistemas evolucionários.

Pela agregação das espécies num ecossistema sob relacionamento do tipo *Red Queen*, uma mudança em uma espécie torna-se análoga ao movimento de deixar cair um grão de areia sob a pilha de areia. Mudando o *fitness* de uma espécie desestabiliza as duas imediatamente próximas, o que por sua vez muda o *fitness* das demais espécies adjacentes, e assim por diante.

É natural pensar que, para atingir pontos críticos, seja necessário alguma intervenção externa. Porém, às vezes essa criticalidade é atingida autonomamente pela natureza, fenômeno denominado criticalidade auto-organizada. A criticalidade auto-organizada parece surgir quando as partes de um sistema afastam-se lentamente do estado de equilíbrio, e as ações de cada parte individual são ditadas pelas interações com as demais partes do sistema (BAK, 1996). Bak e Sneppen (1993) observaram que a auto-organização (evolução) crítica apresenta distribuição em lei de potência, que reflete seu estado crítico, ou sua própria característica de sistema complexo.

O que o modelo de Bak e Sneppen (1993) ilustra é que, mesmo processos aleatórios podem resultar na auto-organização num estado crítico, um comportamento que mostra padrões semelhantes aos do mundo natural, pois nenhuma das alterações



observadas no sistema é projetada para aumentar o limiar crítico, mas sim, as simples regras de comportamento levam o sistema sozinho para esse estado.

### **4.3 Adaptando o Modelo Bak-Sneppen a Teoria Econômica e as Mudanças Climáticas**

Como o modelo Bak-Sneppen foi desenvolvido por físicos para tratar da evolução biológica, é preciso cautela para fazer analogias com a economia (e sua dinâmica real), e uma crítica importante poderia nascer da tentativa de acoplar a terminologia da economia com a terminologia do modelo. Fazer conexões terminológicas é pertinente para a presente investigação, pois se quer fazer comparações, mas isso deve ser feito com cautela.

Justamente por isso, o presente tópico aborda as implicações das regras e ações do modelo Bak-Sneppen tanto na teoria econômica quanto na literatura que trata das mudanças climáticas.

#### **4.3.1 Representação da Mudança Técnica no modelo Bak-Sneppen: Implicações**

Na presente investigação a mudança técnica será abordada no contexto do modelo Bak-Sneppen para evidenciar seu comportamento complexo e sua dinâmica evolutiva no tempo. Segue-se que a mudança técnica das firmas, através de suas várias formas (neutras ou viesadas) é encarada como uma **mutação** no sistema. Tais mutações podem ser benéficas, quando elevam o lucro (ou sua produtividade do trabalho), ou não, quando as firmas enfrentam períodos de intenso prejuízo (ou períodos sucessivos em que a produtividade do trabalho diminui).

Em vez de se trabalhar com o termo *espécies*, trabalha-se com o conceito de firmas que sofrem mutações, buscando ultrapassar suas barreiras de *fitness*, avançando assim tecnologicamente. Trabalhando com isso, busca-se aproximar a noção de Schelling (1993), de que “o todo” caracteriza-se por sua complexidade, ou seja, é formado por elementos heterogêneos que se interligam heterogeneamente. Isso não quer

dizer que se considera uma simples agregação do comportamento individual, é mais que isso: o comportamento individual gera efeitos coletivos novos.

Com relação ao funcionamento da regra I, de que a que com menor *fitness* deve ser encontrada e ter seu valor aleatoriamente modificado, seu argumento é facilmente adaptável à linguagem econômica: quando se pensa o *fitness* como uma barreira de progresso técnico que deve ser ultrapassada pela firma; existem inúmeras barreiras mais altas, que na ciência econômica são representadas pelas firmas líderes de tecnologia. No entanto, com o aumento do *fitness* existem maneiras cada vez mais difíceis de melhorar a aptidão tecnológica, que envolvem muitos gastos em pesquisa e desenvolvimento. As firmas com menor *fitness* têm um conjunto de possibilidades de inovação maior, já disponíveis e utilizados pelas firmas mais aptas, que poderiam adotar.

Com relação à regra II, se o *fitness* tecnológico da firma muda, suas vizinhas a direita e a esquerda também sofrem processos de mutação. Contudo essa vizinhança não necessita ser física, mas pode ser setorial, ou vizinhança no sentido de relações comerciais de uma cadeia de produção. Por isso, em um modelo simples, se representam estas interações de forma esquemática, como mudanças dos vizinhos à direita e esquerda da firma com mínimo *fitness* tecnológico em uma rede lineal.

Por vezes, usamos no modelo o termo *mutação* ou *extinção*. Por exemplo, quando a espécie de menor *fitness* muda seu valor, ela é dita como *extinta* e imediatamente é substituída por outra espécie com um valor de *fitness* diferente. Também, quando as espécies à direita e a esquerda recebem novos valores de *fitness*, considera-se que estas passaram por um processo de *mutação*. Mas, de fato, as alterações de *fitness* podem ser interpretadas tanto com uma extinção ou uma mutação, tanto para espécies, quanto para as firmas.

Não obstante isso, as avalanches ocorrem para desestabilizar o sistema causando uma rápida reviravolta nas firmas, que por evolução do tipo *Red Queen*, aumentam suas barreiras de progresso técnico acima do limiar de *fitness* para estabelecer um novo sistema estável durante um período de *stasis*.

Nesse contexto de avalanches, poder-se-ia pensar que o modelo não respeita as características históricas da firma líder (com *fitness* elevado), dado que essas podem ser

envolvidas em uma troca aleatória de aptidão, em virtude da proximidade com firmas menos aptas.

Essas características históricas são os ganhos oriundos do aprendizado com o tempo, o que é chamado na economia de *path-dependence*. Por exemplo, uma nova técnica não é apenas melhor que uma velha técnica, mas de certa forma, o novo é uma evolução a partir do velho (NELSON; WINTER, 1990).

Entende-se aqui que o *path-dependence* não deve ser considerado como um processo que mantém determinadas firmas na liderança tecnológica quase que exclusivamente ao longo do tempo. Muito embora, tenham uma relação já evidenciada pela história econômica, tal relação não é exata. Em outras palavras, o *path-dependence* é uma **condição necessária**, mas **não suficiente** para a liderança tecnológica num mercado concorrencial.

O modelo empregado aqui reflete, em certos momentos, o *path-dependence* quando se pensa o mesmo sob a concepção **gradual** de ciclo histórico da tecnologia. Na indústria aeronáutica, por exemplo, a atividade de P&D pode ser representada por um preenchimento gradual dos detalhes da ideia de um esboço de projeto geral já estabelecido, no qual o andamento do trabalho é norteado por um grande conjunto de testes e estudos. Em estágios mais avançados, os pesquisadores testam protótipos de um equipamento realmente novo, surgem problemas que são contornados (ou não) aliados ao desenvolvimento de muitos subprojetos que servem para dar suporte ao protótipo principal. Desenvolvido, o equipamento novo de hoje representa um novo ponto de partida para um novo conjunto de esforços para o desenvolvimento do equipamento de amanhã (NELSON; WINTER, 1990).

Nesse exemplo, o resultado das buscas de hoje constitui tanto uma nova tecnologia bem sucedida, como um novo ponto de partida para o desenvolvimento tecnológico do amanhã. Essa característica é refletida nos momentos de evolução gradual observadas no conceito de Equilíbrio Pontual do modelo de evolução adotada na presente investigação. Mais: os saltos que ocorrem na trajetória do equilíbrio pontual, oriundos do padrão de criticalidade auto-organizada dos agentes, **refletem a história de muitas tecnologias que são caracterizadas por invenções ocasionais** (diferentes e completamente novas) seguidas por uma onda de invenções menores de aprimoramento, em alguns momentos do tempo.

Nesse contexto, quando se pensa a evolução das firmas através da noção de equilíbrio pontual podem ocorrer, em alguns momentos do tempo, mutações com as firmas líderes, tanto aumentando sua capacidade quanto diminuindo (fazendo até mesmo, que elas saiam do mercado). Evidentemente, a probabilidade de que as mutações envolvam firmas líderes é baixa, mas existe essa possibilidade.

Essa perspectiva não é considerada nos modelos *ditos* “evolucionários” de tradição Shumpeteriana derivados de Nelson e Winter (1990), e no modelo marxiano de mudança técnica *a la* Marx de Dumménil e Levy (1994) e (2011). Na presente investigação se considera que quando se quer analisar evolução a questão do tempo contemporâneo está longe de ser a única perspectiva, deve-se ver mais além, desde os primórdios do sistema capitalista, por exemplo. Isso implica em “deixar de ver as coisas como estamos acostumados a ver” (BAK, 1996).

#### **4.3.2 Mudanças Climáticas no modelo Bak-Sneppen: implicações**

Não pode haver espaço para dúvida de que as diferentes realidades sociais, econômicas e na disponibilidade de recursos naturais afetam a capacidade de adaptação dos países frente às mudanças climáticas que ocorrem no planeta Terra. Ademais, dado que o meio ambiente é um sistema complexo, qualquer alteração ou medida deve ser tomada no contexto do “todo”, pois todos serão afetados (CAPRA, 2006).

Compreende-se aqui que as mudanças climáticas transformaram o ecossistema terrestre, bem como os biomas regionais do planeta. Nesse contexto, a adaptação das firmas frente a essas transformações é importante, tanto para avaliação de impacto (estimativos do que provavelmente venha acontecer) como para o desenvolvimento de políticas públicas (para aconselhar ou descrever *adaptações*).

Nesse tópico busca-se descrever, sistematizar e classificar as taxonomias das adaptações as transformações ecossistêmicas, seguindo Smit et al. (2004) e buscando responder três perguntas básicas: (1) adaptar-se a que?, (2) quem ou o que se adapta? e (3) como a adaptação acontece?

No modelo Bak-Sneppen o termo *fitness* está intimamente ligado a palavra adaptação, seja em sua tradução literal, ou em sua compreensão. Portanto, a presente

pesquisa considera o *fitness ecológico*, como **uma barreira de adaptação as mudanças climáticas** que ocorrem devido a fatores antrópicos e naturais do planeta terra.

Ademais, considera-se aqui a distinção entre **adaptação** e **mitigação** do IPCC (2007). Ambas representam alteração devido às mudanças climáticas e as transformações ecossistêmicas. Considera-se *mitigação* como uma resposta ao amplo processo de mudança climática envolvendo redução ou estabilização da emissão de gases efeito estufa, com objetivo de *minimizar (aliviar)* as alterações climáticas. Já a *adaptação* é entendida como *ajustes* no sistema socioambiental em resposta as próprias mudanças climáticas que ocasionam transformações no ecossistema. Ademais, pode-se incluir nessa definição a tentativa dos agentes em não degradar o meio ambiente.

A conferência Rio 1992 sobre as mudanças climáticas certamente foi um marco para a sociedade contemporânea. Nesse encontro se discutiram as alterações das médias de temperaturas globais, da precipitação, dentre outros aspectos climáticos que oferecem “perigo” para a sociedade moderna. O significado da palavra “perigo” é muito importante para os pesquisadores ambientais e para os formuladores de políticas, sobretudo, porque está intimamente ligado à adaptação (SMIT, 2003).

Para os pesquisadores da conferência Rio 1992 os desafios encontram-se nas possíveis alterações ecossistêmicas propriamente ditas, na oferta global de alimentos e no desenvolvimento sustentável, que oferecem perigo para o futuro. Para Smit et al. (2001) entender que esses sistemas encontram-se em perigo envolve compreender a magnitude, taxa e a natureza da mudança climática, mas também compreender a habilidade que cada um tem em se adaptar a essas mudanças.

As condições climáticas mudam inerentemente ano a ano, década a década, século a século, e assim por diante, por isso, a variabilidade caminha junto, e é uma parte integral da mudança climática: um exemplo é a mudança média climática experimentada através de uma mudança na natureza e frequência de um ano particular, incluindo fortes extremos. É justamente a essa variabilidade que a adaptação deve ser feita (TURNER, 2011).

**Adaptar-se a que?** Inicialmente é preciso compreender que a adaptação pode se manifestar a qualquer estímulo climático. Às vezes o impulso a adaptação é expressado

como mudança no tempo (como a precipitação média anual), as vezes como características ecológicas dos impactos antrópicos nas condições climáticas (como secas, quebras de safra ou diminuição da renda) e também, com aumentos do risco baseados na expectativa dos agentes quanto as futuras variações (SMIT, et al., 2001).

Deriva dessa compreensão que qualquer forma de adaptação deve levar em conta as características climáticas (como por exemplo, temperatura e precipitação) e suas conexões diretas e indiretas com o sistema que será adaptado. Um exemplo seria a adaptação a um impacto na oferta de alimentos agrícolas, devido a alterações nas temperaturas e na precipitação. Nesse sentido, qualquer ação deve levar em conta os efeitos diretos sobre a agricultura como a seca e os indiretos, como a queda na produtividade e a diminuição da renda da terra. Toda essa adaptação deveria ser realizada considerando-se a especificidade de cada região, ou sistema.

**Quem ou o que se adapta?** Na simulação considera-se que quem se adapta são as firmas. Firmas, porque não deve haver uma ação global de adaptação devido às especificidades de cada bioma. *Quem e o que* nunca agem isolados, por exemplo: ações de gestor florestal (quem) podem resultar na adaptação de uma floresta (o que), entre outros casos.

Como relatado anteriormente, as características dos sistemas afetam a propensão a se adaptar as transformações, convencionalmente chamadas pela literatura de “determinantes da adaptação” (BATIMA et al., 2010). Termos como “sensibilidade”, “vulnerabilidade”, “susceptibilidade”, “estabilidade”, “nível crítico”, “flexibilidade” tem sido utilizados para diferenciar sistemas quanto à probabilidade (ou de maneira ainda mais categórica: a necessidade) de adaptar-se (SMIT et al. 2001; e BATIMA et al. 2010).

**Como a adaptação ocorre?** Para responder a esse questionamento primeiramente se deve compreender a taxonomia da adaptação ecossistêmica, que são muitas, no entanto as distinções mais comuns na literatura do assunto são: a do tipo **Timing**: que é uma adaptação pró-ativa, que busca antecipar os efeitos de um impacto; a **temporal e espacial**: são adaptações de curto prazo em oposição às de longo prazo, e localizadas em oposição as globalizadas; de **intencionalidade**: pode ser feita autonomamente ou devido a uma orientação política; e adaptação distinta por **agente**: que caracteriza-se por mudança individual ou coletiva, das pessoas, das instituições, de

uma firma ou do poder público (IPCC, 2011; BATIMA et al. 2010; SMIT et al. 2003; NCCARF, 2012).

A adaptação **não** deve ser entendida como *um fim*, mas sim como *um processo* (CAPRA, 1982). É um processo que ocorre por meio de agentes (indivíduos, comunidades, empresas, entidades civis, governo, etc.) associados a uma rede de relações institucionais, estruturais e tecnológicas em busca de mudança. NCCARF (2012). Ou seja, exibe uma característica de auto-organização.

Smit et al. (2003) relata uma série de exemplos de medidas que podem ser consideradas como de adaptação ecossistêmica, tais como: construção de diques, construção de reservatórios de água, estabelecimento de alertas a desastres naturais, alteração das práticas agrícolas e de uso do solo, melhoria na gestão de locais de risco, melhoria na eficiência do uso da água, utilização de tecnologias limpas, dentre outros (uma visão também é compartilhada pela NCCARF (2012)).

A firma é entendida como um agente que habita um bioma regional pertencente ao ecossistema terrestre, adequando a visão de sítio do modelo, da mesma forma que o apresentado para o progresso tecnológico.

A operação da regra I do modelo também é facilmente compreendida, pois é razoável pensar que a firma com menor *fitness* ecológico tem maiores possibilidades de mudar seu valor, em face dos valores superiores das demais, num processo de *aprendizado*, ou *convergência*.

Da segunda regra, de que os valores dos vizinhos imediatamente à direita e a esquerda tem seus valores randomicamente alterados em face da mudança das firmas com menor *fitness*, derivam-se importantes considerações. Além da interação global do *fitness* ecológico entre as firmas, não pode restar dúvida que quanto maior a proximidade maior será a correlação (positiva ou negativa) entre as mudanças na capacidade de adaptação firmas que tem relação de vizinhança (Mais: se poderia pensar na disposição das firmas por relações de intercâmbio comercial).

Segue-se, por exemplo, que um hipotético evento, como a escassez de água, ocorra numa região A que possua uma firma (pública) monopolizadora da distribuição. Ora, tal evento caracteriza-se como uma diminuição de *fitness*, pois a menor quantidade de água disponível, um recurso essencial para a vida na terra, limita em grande escala as

possibilidades de reprodução da vida nessa região, e a capacidade de sobrevivência da firma nesse mercado. Ademais, tal evento, no presente exemplo, ocasiona uma migração (indivíduos ou firmas) para uma região B, onde outra firma está sediada, em busca do recurso natural. Essa ação pode resultar em dois possíveis resultados: diminuição do seu *fitness*, pois agora “os novos indivíduos” exercem uma pressão desenfreada sobre a oferta de água; ou a elevação do valor do *fitness* da firma da região B com a criação de um plano de administração eficiente dos recursos hídricos.

No modelo simulado aqui tais eventos serão testados com relação positiva, negativa e independente, para dar conta da criticalidade que caracteriza os fenômenos dos sistemas complexos. Contudo, fica evidente a situação caótica (seja no seu sentido político, quanto científico) que esse sistema pode atingir, caso as perspectivas sejam negativas quanto às possibilidades de enfrentamento e adaptação.

#### 4.4 Simulações Computacionais

Pela revisão feita no Capítulo 3 e pela exposição do método acima, fica suficientemente claro, que o processo evolutivo do progresso técnico não tem impacto apenas sobre a distribuição da renda, mas sobre outras variáveis reais, como as ecológicas, uma vez que o sistema econômico está inserido num sistema muito maior: chamado de meio ambiente. Nesse contexto, a direção da evolução tecnológica tem impacto muito pertinente no sistema ambiental, norteador de como se dará a evolução nesse tipo de ambiente vivo.

Trata-se aqui apenas da relação no estado crítico entre a mudança técnica e a adaptação das firmas as mudanças climáticas. Para isso, a simulação é construída supondo-se um modelo Bak-Sneppen bidimensional. São consideradas  $N$  **firmas** na simulação, que são os sítios (agentes) do modelo, ou as espécies. Cada firma do sistema é representada por uma variável *fitness* tecnológica e uma ambiental, distribuída uniformemente.

A mudança técnica em cada firma  $x$  é representada por  $\psi(x) \in [0, 1]$ . Assim, a firma individual deverá ultrapassar essa barreira se quiser evoluir (se aproximar de 1), aumentando assim sua produtividade do trabalho. A adaptação ambiental é representada



por  $\zeta(x) \in [0, 1]$ . Esse valor sugere que se a firma deseja evoluir sua adaptação ao meio ambiente deve se aproximar de 1.

No presente modelo são consideradas três regras relacionais (Hipóteses) entre a mudança técnica das firmas e sua adaptação ao meio ambiente:

- 1) **Relação Aleatória (independente)**: a mudança técnica se relaciona de maneira totalmente imprevisível com a adaptação das firmas ao meio ambiente, ou seja, uma melhoria técnica pode aumentar ou diminuir as externalidades negativas da firma para com o meio ambiente.
- 2) **Relação Negativa**: a mudança técnica se relaciona negativamente com a capacidade de adaptação ambiental da firma, ou seja, o progresso tecnológico polui mais o meio ambiente, onde as firmas aumentam suas externalidades negativas no ambiente.
- 3) **Relação Positiva**: a mudança técnica se relaciona positivamente com a capacidade de adaptação das firmas ao meio ambiente, assim supõe-se a adoção de tecnologias limpas que reduzem o nível de externalidades negativas das firmas com o sistema ambiental.

Para cada um dos três casos as regras do modelo Bak-Sneppen serão alteradas para dar conta da nova dinâmica, não contemplada pela versão original do mesmo. Ademais, simulam-se três situações : Situação 1) em que a firma preocupa-se apenas com seu fator de mudança técnica, buscando otimiza-lo, não levando em conta o seu fator ecológico; Situação 2) as firmas do modelo se preocupam apenas como meio ambiente, e a mudança técnica fica em segundo plano; e Situação 3 em que as firmas buscam num primeiro momento uma mudança técnica que tem consequências sobre o meio ambiente, no passo seguinte trocam seus valores de adaptação ecológica para corrigir as externalidades, impactando assim no seu padrão tecnológico.

Abaixo se descrevem as rotinas.

### **Situação 1: A firma preocupa-se apenas com a mudança técnica**

#### **Hipótese A - Relação entre Mudança Técnica e Adaptação Ambiental é aleatória**

Adinâmica da simulação é a seguinte: supõe-se uma geração de  $n$  passos no tempo, ou seja,  $t = 1:n$ . Para cada passo, encontra-se a firma com o menor *fitness*

tecnológico (menor nível tecnológico) e muda-se aleatoriamente seu valor, imediatamente, suas duas firmas vizinhas, a esquerda e a direita, tem seus valores de *fitness* tecnológicos mudados de maneira aleatória. Simultaneamente, as mesmas firmas têm seus *fitness* ambientais mudados da mesma forma, para refletir o impacto que a mudança técnica tem sob a intensidade das externalidades que a firma gera no meio ambiente. Assim,

Localiza-se  $X_{min}$  com menor  $\psi(x)$ ,

$$(X_{min} - 1) \rightarrow u_1$$

$$(X_{min}) \rightarrow u_2$$

$$(X_{min} + 1) \rightarrow u_3$$

$$\zeta(X_{min} - 1) \rightarrow u_4 \tag{8}$$

$$\zeta(X_{min}) \rightarrow u_5$$

$$\zeta(X_{min} + 1) \rightarrow u_6$$

onde  $u_i \in [0,1]$

### **Hipótese B - Relação entre Mudança Técnica e Adaptação Ambiental é *viesada***

Especifica-se aqui a mudança tecnológica, num esquema insumo-produto, assumindo que o progresso tecnológico têm produz dois produtos: **um produto bom**, o crescimento econômico (e conseqüente aumento do bem estar, na visão materialista *a la* Marx), e **um produto ruim**, caracterizado pela potencialidade poluidora dessa tecnologia (que acelera as mudanças climáticas, transformando posteriormente o ecossistemas terrestre). Nesse sentido, para ter uma melhoria técnica o custo são as externalidades negativas no meio ambiente.

Aqui a adaptação ambiental diminui na mesma proporção do aumento da mudança técnica, e aumenta na mesma proporção quando o *fitness* tecnológico aumenta.

Localiza-se  $X_{min}$  com menor  $\psi(x)$ ,

$$(Xmin - 1) \rightarrow u_1$$

$$(Xmin) \rightarrow u_2$$

$$(Xmin + 1) \rightarrow u_3$$

Agora  $\Delta$  representa a variação do *fitness* tecnológico ( $\psi$ ) na respectiva posição. Toda variação é em termos percentuais.

$$\zeta(Xmin - 1) \rightarrow -[\Delta \psi(Xmin - 1)\%] \quad (9)$$

$$\zeta(Xmin) \rightarrow -[\Delta \psi(Xmin)\%]$$

$$\zeta(Xmin + 1) \rightarrow -[\Delta \psi(Xmin + 1)\%]$$

### Hipótese C– Relação entre Mudança Técnica e Adaptação Ambiental é positiva

Sob essa hipótese a adaptação ecológica às mudanças climáticas diminui na mesma proporção do aumento da mudança técnica, e aumenta na mesma proporção quando o *fitness* tecnológico aumenta.

Localiza-se  $Xmin$  com menor  $\psi(x)$ ,

$$(Xmin - 1) \rightarrow u_1$$

$$(Xmin) \rightarrow u_2$$

$$(Xmin + 1) \rightarrow u_3$$

$\Delta$  representa a variação do *fitness* tecnológico ( $\psi$ ) na respectiva posição,  $Xmin$ ,  $Xmin+1$  e  $Xmin-1$ . Toda variação é em termos percentuais.

$$\zeta(Xmin - 1) \rightarrow \Delta \psi(Xmin - 1)\% \quad (10)$$

$$\zeta(Xmin) \rightarrow \Delta \psi(Xmin)\%$$

$$\zeta(Xmin + 1) \rightarrow \Delta \psi(Xmin + 1)\%$$

Nesse caso, tem-se uma mudança de sinal em relação à especificação 9, antes negativo e agora positiva. Em ambas as situações 9 e 10, os valores de *fitness*

ecológico nunca serão negativos, pois as variações são percentuais, por exemplo, se o fator tecnológico diminuir 20%, o fator ecológico diminuirá também 20% de seu valor. No entanto, existiria a possibilidade dele ser superior a 1, nesses casos, impomos a condição de que o *fitness* ecológico seria igual ao máximo *fitness*, 1.

### **Situação 2: A firma preocupa-se apenas com a ecologia**

A situação dois é o inverso da primeira, ao invés de se buscarem agora os mínimos de  $\psi(x)$ , encontramos os mínimos de  $\zeta(x)$  e efetuamos as trocas contidas nas relações funcionais (Hipóteses) A, B e C. Isso poderia acontecer no mundo real, por exemplo, pela imposição de uma lei (ou pressão social) que forçasse as firmas a ter um cuidado especial com o meio ambiente, impedindo a mesma de adotar tecnologias que o agredissem de qualquer forma.

#### **Hipótese A – Relação entre Mudança Técnica e Adaptação Ambiental é aleatória**

Localiza-se  $\zeta_{min}$  com menor  $\zeta(x)$ ,

$$\zeta(X_{min} - 1) \rightarrow u_1$$

$$\zeta(X_{min}) \rightarrow u_2$$

$$\zeta(X_{min} + 1) \rightarrow u_3$$

$$\psi(X_{min} - 1) \rightarrow u_4 \tag{11}$$

$$\psi(X_{min}) \rightarrow u_5$$

$$\psi(X_{min} + 1) \rightarrow u_6$$

onde  $u_i \in [0,1]$

#### **Hipótese B – Relação entre Mudança Técnica e Adaptação Ambiental é viesada**

Localiza-se  $\zeta_{min}$  com menor  $\zeta(x)$ ,

$$\zeta(X_{min} - 1) \rightarrow u_1$$

$$\zeta (Xmin) \rightarrow u_2$$

$$\zeta (Xmin + 1) \rightarrow u_3$$

$\Delta$  representa a variação do *fitness* tecnológico ( $\zeta$ ) na respectiva posição,  $Xmin$ ,  $Xmin-1$  e  $Xmin+1$ . Toda variação é em termos percentuais.

$$\psi (Xmin - 1) \rightarrow -[\Delta \zeta (Xmin - 1)\%] \quad (12)$$

$$\psi (Xmin) \rightarrow -[\Delta \zeta (Xmin)\%]$$

$$\psi (Xmin + 1) \rightarrow -[\Delta \zeta (Xmin + 1)\%]$$

onde  $u_i \in [0,1]$

### Hipótese C– Relação entre Mudança Técnica e Adaptação Ambiental é positiva

Localiza-se  $\zeta_{min}$  com menor  $\zeta (x)$ ,

$$\zeta (Xmin - 1) \rightarrow u_1$$

$$\zeta (Xmin) \rightarrow u_2$$

$$\zeta (Xmin + 1) \rightarrow u_3$$

$$\psi (Xmin - 1) \rightarrow \Delta \zeta (Xmin - 1)\% \quad (13)$$

$$\psi (Xmin) \rightarrow \Delta \zeta (Xmin)\%$$

$$\psi (Xmin + 1) \rightarrow \Delta \zeta (Xmin + 1)\%$$

onde  $u_i \in [0,1]$

### Situação 3:

#### Hipótese A – Relação entre Mudança Técnica e Adaptação Ambiental é aleatória

Supõem-se uma geração de  $n$  passos no tempo, ou seja,  $t = 1:n$ . No primeiro passo encontra-se a firma com o menor *fitness* tecnológico (menor nível tecnológico) e muda-se aleatoriamente seu valor, imediatamente, suas duas firmas vizinhas, a esquerda

e a direita, tem seus valores de *fitness* tecnológicos mudados de maneira aleatória. Ademais, as mesmas firmas têm seus *fitness* ambientais mudados da mesma forma,

Localiza-se  $Xmin$  com menor  $\psi(x)$ ,

$$(Xmin - 1) \rightarrow u_1$$

$$(Xmin) \rightarrow u_2$$

$$(Xmin + 1) \rightarrow u_3$$

$$\zeta(Xmin - 1) \rightarrow u_4 \tag{14}$$

$$\zeta(Xmin) \rightarrow u_5$$

$$\zeta(Xmin + 1) \rightarrow u_6$$

onde  $u_i \in [0,1]$

No Segundo passo, encontra-se o sítio com menor adaptação ambiental, e seus dois vizinhos para mudar o valor de *fitness* aleatoriamente. Ao mesmo tempo mudam-se os valores da adaptação tecnológica das mesmas firmas. No passo 1:

Localiza-se  $Xmin$  com menor  $\zeta(x)$ ,

$$\zeta(Xmin - 1) \rightarrow u_1$$

$$\zeta(Xmin) \rightarrow u_2$$

$$\zeta(Xmin + 1) \rightarrow u_3$$

$$\psi(Xmin - 1) \rightarrow u_4 \tag{15}$$

$$\psi(Xmin) \rightarrow u_5$$

$$\psi(Xmin + 1) \rightarrow u_6$$

onde  $u_i \in [0,1]$

A dinâmica dos dois passos apresentados acima é repetida até  $t=n$ .

**Hipótese B – Relação entre Mudança Técnica e Adaptação Ambiental é viesada**

Geram-se  $t$  passos no tempo, onde  $t = 1:n$ . Nesse caso os passos são os mesmos da Situação 1, mas ao invés de  $\zeta(x)$  muda aleatoriamente quando  $\psi(x)$  muda, se impõe uma relação negativa, em que a adaptação ambiental diminui na mesma proporção do aumento da mudança técnica, e aumenta na mesma proporção quando o *fitness* tecnológico aumenta. A mesma relação negativa é válida para o passo seguinte, onde  $\zeta(x)$  muda seu valor.

$$\begin{aligned}
 (Xmin - 1) &\rightarrow u_1 \\
 (Xmin) &\rightarrow u_2 \\
 (Xmin + 1) &\rightarrow u_3 \\
 \zeta(Xmin - 1) &\rightarrow -[\Delta \psi(Xmin - 1)\%] \\
 \zeta(Xmin) &\rightarrow -[\Delta \psi(Xmin)\%] \\
 \zeta(Xmin + 1) &\rightarrow -[\Delta \psi(Xmin + 1)\%] \\
 \text{onde } u_i &\in [0,1]
 \end{aligned} \tag{16}$$

No passo 2:

$$\begin{aligned}
 \zeta(Xmin - 1) &\rightarrow u_1 \\
 \zeta(Xmin) &\rightarrow u_2 \\
 \zeta(Xmin + 1) &\rightarrow u_3 \\
 \psi(Xmin - 1) &\rightarrow -[\Delta \zeta(Xmin - 1)\%] \\
 \psi(Xmin) &\rightarrow -[\Delta \zeta(Xmin)\%] \\
 \psi(Xmin + 1) &\rightarrow -[\Delta \zeta(Xmin + 1)\%] \\
 \text{onde } u_i &\in [0,1]
 \end{aligned} \tag{17}$$

O procedimento se repete até que  $t=n$ .

**Hipótese C- Relação entre Mudança Técnica e Adaptação Ambiental é positiva**

As simulações ocorrem em  $t=1:n$ . As regras são as mesmas, no entanto, agora a relação é positiva, quando há uma melhoria tecnológica o meio ambiente tem ganho. E o inverso é válido. Assim, no primeiro passo:

$$\begin{aligned}
 \psi(X_{min} - 1) &\rightarrow u_1 \\
 \psi(X_{min}) &\rightarrow u_2 \\
 \psi(X_{min} + 1) &\rightarrow u_3 \\
 \zeta(X_{min} - 1) &\rightarrow \Delta \psi(X_{min} - 1)\% \\
 \zeta(X_{min}) &\rightarrow \Delta \psi(X_{min})\% \\
 \zeta(X_{min} + 1) &\rightarrow \Delta \psi(X_{min} + 1)\% \\
 \text{onde } u_i &\in [0,1]
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

No passo 2:

$$\begin{aligned}
 \zeta(X_{min} - 1) &\rightarrow u_1 \\
 \zeta(X_{min}) &\rightarrow u_2 \\
 \zeta(X_{min} + 1) &\rightarrow u_3 \\
 \psi(X_{min} - 1) &\rightarrow \Delta \zeta(X_{min} - 1)\% \\
 \psi(X_{min}) &\rightarrow \Delta \zeta(X_{min})\% \\
 \psi(X_{min} + 1) &\rightarrow \Delta \zeta(X_{min} + 1)\% \\
 \text{onde } u_i &\in [0,1]
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

A dinâmica dos dois passos apresentados acima é repetida até  $t=n$ .

O software utilizado para simular matematicamente o Bak-Sneppen foi o *Matrix Laboratory* (MATLAB) versão 7.1.



## 5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

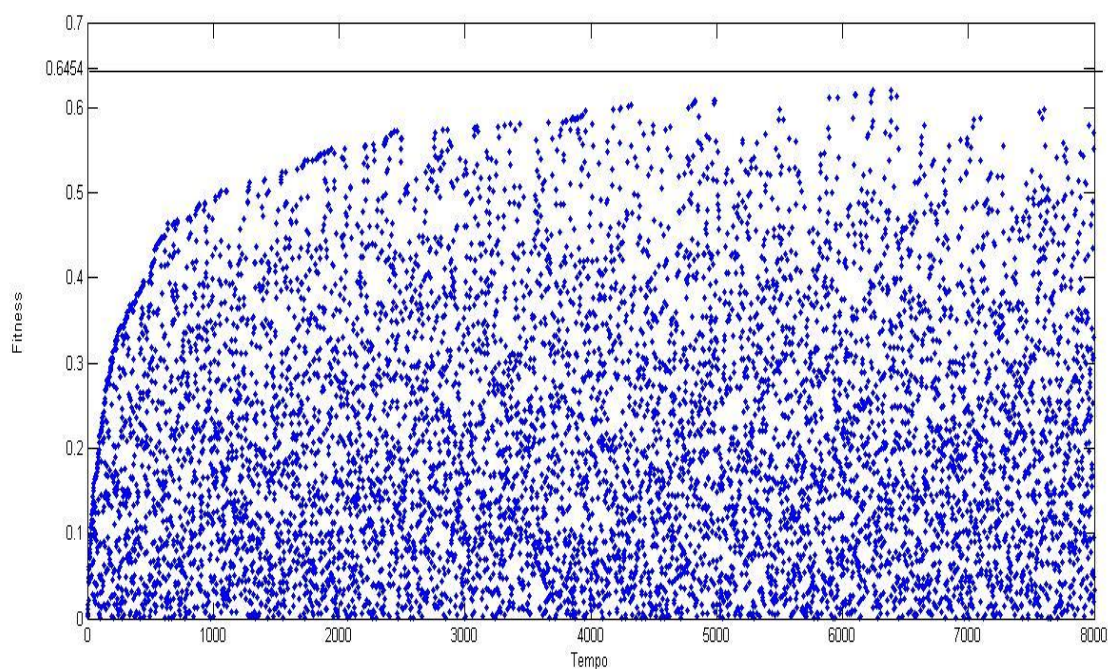
No presente capítulo apresentam-se os principais resultados da estimação do modelo Bak-Sneppen em duas dimensões: tecnológica e ecológica. Mais uma vez ressalta-se que se sustentam as alterações da variável tecnológica sob o arcabouço da teoria do progresso técnico induzido, portanto, seu *fitness* representa a mudança técnica, ou a capacidade de adaptação tecnológica das firmas.

Quanto ao *fitness* ecológico, esse representa a capacidade de cuidado com o meio ambiente da firma, no que diz respeito à emissão de poluentes que contribuam para as mudanças climáticas. Nesse sentido, ele é encarado como uma adaptação preventiva, ou na terminologia adaptação do tipo *Timing*.

No modelo simulam-se 300 firmas dispostas num círculo chamado de *sistema econômico* que está inserido num sistema maior, o *ecossistema*. Cada firma tem um *fitness* tecnológico e um *fitness* ecológico (inicialmente distribuídos uniformemente). São simuladas as nove especificações relacionais entre o fator tecnológico e o ecológico, já detalhadas na seção anterior. Cada uma das atualizações é repetida no tempo 40.000 vezes. No entanto, cabe ressaltar que o tempo econômico é o período suficiente para que todas as firmas passem por uma mudança tecnológica ou ambiental. Ademais, todas as especificações passam por um processo de reamostragem, em que novas distribuições uniformes de fatores tecnológicos e ecológicos são distribuídas as firmas. Esse processo é realizado para tornar robusta a distribuição dos estados finais de *fitness* ecológico e tecnológico de cada firma.

Apresenta-se primeiramente o resultado da simulação para a Situação 1, quando ***as firmas se preocupam apenas com a mudança tecnológica ao longo do tempo***. Assim, a firma com menor *fitness* sofre um processo de troca de tecnologia (obtendo êxito ou não), afetando suas duas vizinhas, que também registraram mutação tecnológica. Tais firmas agora terão que alterar seu *fitness* ecológico, ou seja, seu cuidado com o meio ambiente. As três hipóteses são apresentadas: **a) a mudança tecnológica não apresenta correlação com a mudança ecológica; b) a mudança técnica se relaciona negativamente e unidirecionalmente (variando na mesma proporção) com a adaptação ecológica; e c) essa relação é positiva e unidirecional, uma mudança técnica aumenta (na mesma proporção) a capacidade de adaptação ambiental das firmas do modelo.**

A Figura 6 apresenta a evolução das firmas com menor *fitness* tecnológico para a Hipótese A. O valor máximo que o fator tecnológico alcançou ao longo da simulação foi 0,6454, que é o Limiar do modelo. Quando o sistema atinge esse nível de *fitness* (onde ele tende a flutuar ao longo do tempo) se diz que ele alcançou o *estado crítico auto-organizado*. Na Figura 3 se apresenta apenas os primeiros 8.000 períodos, pois nesse ponto o sistema está muito próximo do Limiar, que só é alcançado em 35.818 períodos da simulação<sup>7</sup>. Os pontos em cada t representam o valor dos mínimos naquele período.



**Figura 6 – Evolução do Fitness Tecnológico Mínimo das 300 Firms para Hipótese A. Firms=300, t=40.000, Limiar=0,6454.**

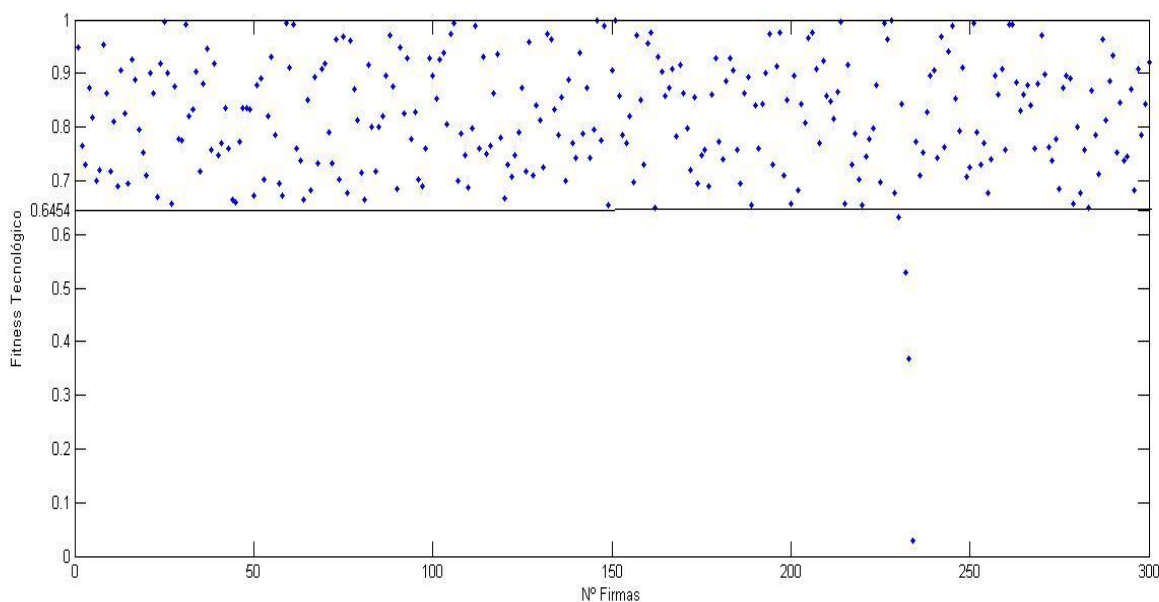
Fonte: Elaborado pelo autor (2012).

Percebe-se que as firmas de menor valor de *fitness* tecnológico do sistema econômico evoluem de maneira muito rápida (na simulação) até um nível de flutuação muito próximo ao nível limiar (0,6454). Na teoria do Progresso Técnico Induzido se poderia interpretar essa dinâmica como a velocidade de convergência técnica das firmas de maior nível tecnológico para as firmas menor adaptação técnica.

<sup>7</sup> Ademais, visualizar 40.000 períodos no gráfico comprometeria a interpretação.

De fato, no mundo real uma firma com menores níveis tecnológicos tem mais chances de melhorar seu nível tecnológico, dado a disponibilidade de técnicas superiores desenvolvidas pelas firmas líderes, que configuram a *Fronteira de Possibilidades Técnicas* da economia. O modelo simulado reflete bem essa característica com a rápida evolução do mínimo, no entanto, não existe nenhuma barreira para a firma de menor *fitness* evoluir tecnicamente.

A Figura 7 mostra uma imagem instantânea dos *Fitness* tecnológicos de todas as firmas num momento do tempo. Nota-se que a maioria das firmas encontra-se acima do Limiar tecnológico, porém algumas se encontram abaixo do limiar e serão selecionadas para a mudança técnica no próximo período.



**Figura 7 – Imagem Instantânea das Barreiras de Fitness tecnológicos do Modelo no Equilíbrio Pontual (estado estacionário) para a Hipótese A. Firms=300, t=40.000, Limiar=0,6454**

Fonte: Elaborado pelo autor (2012).

Nesse contexto, as possibilidades de evolução técnica são cada vez menores, ou seja, quando o sistema encontra-se no estado estacionário a chance de uma firma com elevado nível tecnológico não ser eficiente ao adotar uma nova tecnologia é maior. Ademais, atrelado à ideia básica do modelo de progresso técnico induzido de Kennedy (1964), as inovações tornam-se mais improváveis, assim, a Fronteira de Possibilidades de Inovação se estabilizaria. Não obstante, isso significa que se uma firma com baixo

nível tecnológico sofre mutação e é vizinha de uma firma com elevado nível técnico, a chance de essa última diminuir seu *fitness* tecnológico é maior.

De um ponto de vista histórico, esse fato revela-se inapropriado, pois se acredita que uma “firma líder” dificilmente teria prejuízo técnico (ou mesmo desapareceria) devido à mudança tecnológica da firma menos apta, a qual é sua concorrente. No entanto, o presente modelo diverge dessa afirmação, ao considerar a possibilidade de mutação (ou extinção) de uma firma líder através da relação concorrencial ou de vizinhança com uma menos apta, embora se prevê pouca probabilidade para esses acontecimentos. Em todo caso na simulação o fator de progresso técnico está acotado entre  $[0,1]$ , portanto as variações devem ser consideradas como variações relativas e não absolutas, assim sendo uma firma líder pode ter um prejuízo técnico relativo à outra que melhore seu *fitness* técnico.

Tanto na Teoria do Progresso Técnico Induzido *a la* Marx-Kennedy (1964), quanto, por exemplo, na Teoria Evolucionária da Mudança Técnica de Nelson e Winter (1990) considerar essa hipótese está totalmente fora de questão. Ora, então as firmas líderes não desaparecem em tais modelos? A resposta é sim, não desaparecem, porque tais modelos mecanicistas ou ditos “evolucionários” retratam uma contemporaneidade que não deveria ser condição necessária e suficiente para entender a evolução das firmas no sistema capitalista.

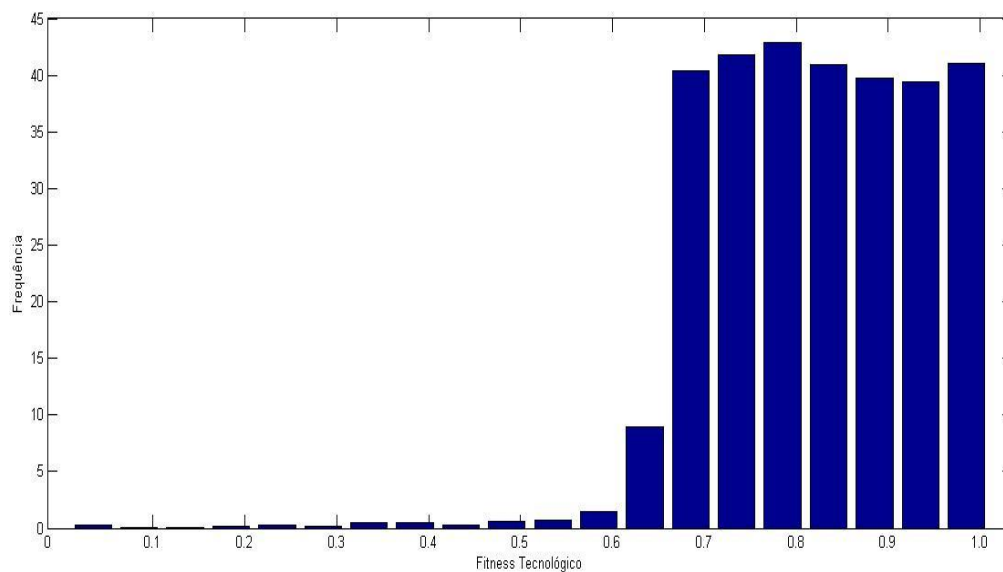
Em contraponto a essas teorias excessivamente determinísticas, o mundo real em sua história dá provas de que as líderes do mercado podem desaparecer (ou mesmo diminuir sua participação no mercado). Um exemplo clássico é o caso da Kodak, empresa no ramo de máquinas fotográficas, filmes e fotos digitais. Na década de 1980 a companhia detinha de 85% do mercado americano, mas perdeu a liderança abruptamente pelo desenvolvimento das câmeras digitais. A Kodak ruiu por não considerar que o progresso tecnológico poderia ser benéfico para a sua perpetuação na liderança, pois não adotou a inovação quando a desenvolveu. 20 anos mais tarde suas concorrentes o fizeram, e a Kodak sentiu as consequências.

Outro exemplo emblemático que contraria a teoria é o caso das Máquinas Polaroid. A firma era líder no mercado e detinha a patente das máquinas fotográficas com revelação instantânea, no entanto com o advento das fotos digitais acabou ruindo no mercado.

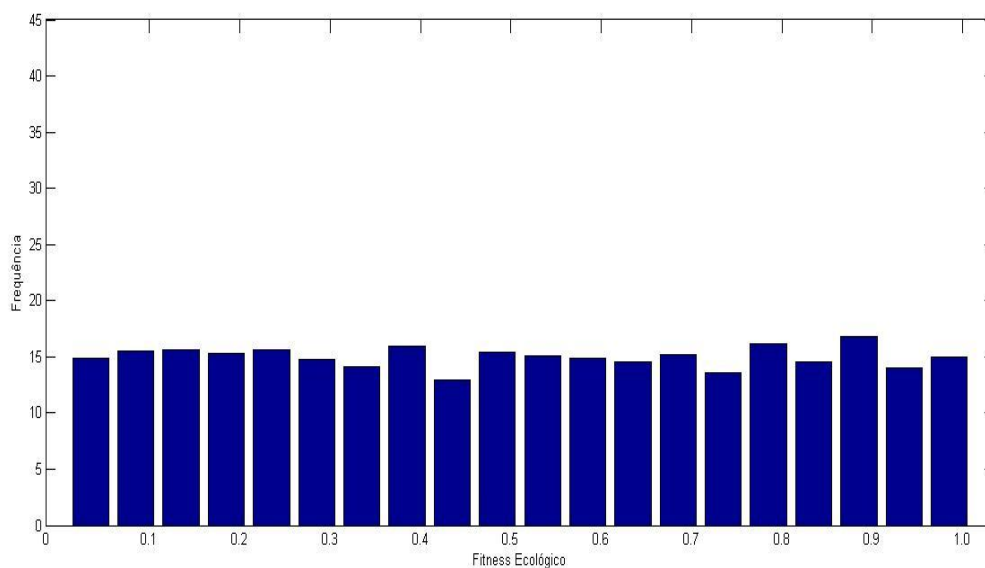
Reconhece-se que o *path-dependence* é importante para a trajetória das firmas, o que é refletido na evolução, por exemplo, das firmas de mínimo *fitness* tecnológico. Contudo, a característica refletida pelo modelo simulado, e a que se quer passar, é que para compreender evolução é necessário se analisar além da contemporaneidade do sistema capitalista. Ademais, a dependência histórica é uma condição necessária, mas não suficiente para a manutenção das firmas mais aptas, mas a condição suficiente é a evolução.

Realizado esse panorama inicial da relação entre o modelo e a teoria econômica, avalia-se agora como ficaram as distribuições do *fitness* tecnológico e ecológico no estado final do modelo, ou seja, no estado estacionário. A Figura 8 apresenta a distribuição do fator tecnológico e ecológico no estado final do modelo.

Percebe-se pela Figura 8(a) que as firmas se auto-organizaram num estado final onde a maioria delas tem elevada adaptação tecnológica, ou seja, são mais desenvolvidas tecnologicamente, o que é mostrado pela área distribuída uniformemente acima do Limiar de 0,6454.



a) Distribuição do *Fitness* Tecnológico



b) Distribuição do *Fitness* Ecológico

**Figura 8 – Distribuição dos Fitness Tecnológicos e Ecológicos no Estado Final para a Hipótese A. Firms=300, t=40.000, Limiar=0,6454.**

Fonte: Elaborado pelo autor (2012).

Quando se analisa a Figura 8(b) onde é mostrada a distribuição do *Fitness* ecológico percebe-se que o mesmo é uniformemente distribuído desde a origem, onde apresenta um Limiar praticamente igual a zero, de 0,096.

A correlação entre ambas a distribuição é baixa, de 0,11, refletindo a independência atribuída na simulação. Nota-se que sob a hipótese A, em que a firma se preocupa apenas com sua mudança técnica e não com sua adaptação ecológica, no entanto, pode haver tanto novas tecnologias limpas, quanto novas tecnologias poluidoras, o número de firmas em cada intervalo de *fitness* ecológico flutua em torno de 15. Isso é reflexo da independência entre o fator tecnológico e o ecológico.

Avaliando agora a Hipótese B em que a mudança técnica se relaciona negativamente e unidirecionalmente com a adaptação ecológica, os resultados são diferentes ao da Hipótese A. A Figura 9 apresenta as distribuições do estado final dos fatores ecológicos e tecnológicos para essa hipótese.

Aqui não se apresenta a figura da evolução do *fitness* Limiar para a tecnologia, uma vez que a Figura não muda sensivelmente em relação às Figuras 6 e 7, pois a dinâmica evolutiva é a mesma. O que muda na Hipótese B em relação a A é a relação de *causalidade* da tecnologia com a adaptação ambiental.

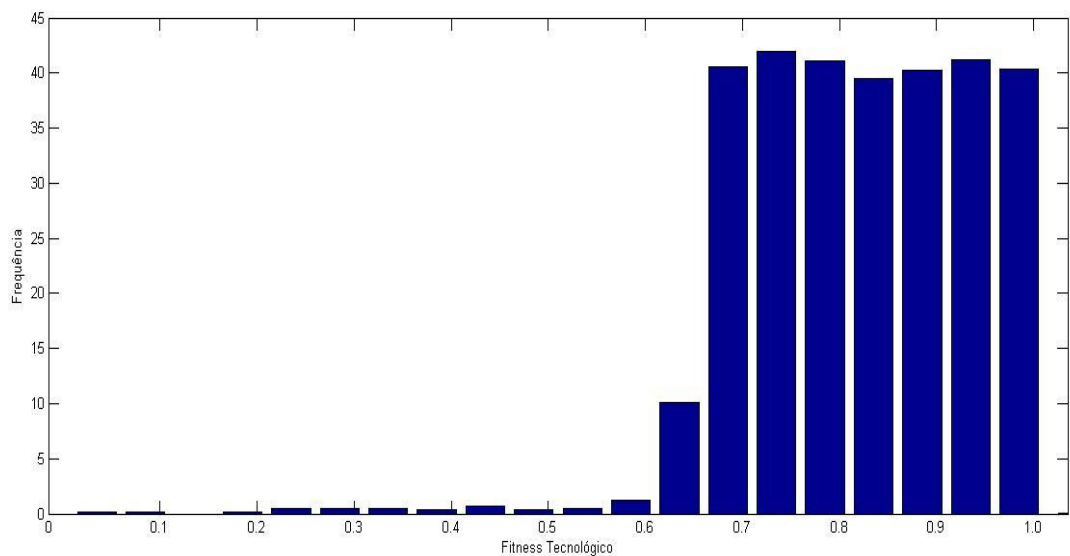
Da mesma forma que na Hipótese A as firmas se auto-organizam num estado final em que o nível tecnológico é elevado, com um limiar de 0,6483. Um resultado que não é gratuito uma vez que a dinâmica proposta é a mesma<sup>8</sup>.

Contudo, os resultados do fator ecológico mudam sensivelmente, agora a capacidade de adaptação frente às mudanças climáticas se torna mínima para quase que a totalidade das firmas, um resultado que no sentido empírico teria consequências catastróficas para os ecossistemas. Não gratuitamente, o limiar ecológico foi 0.

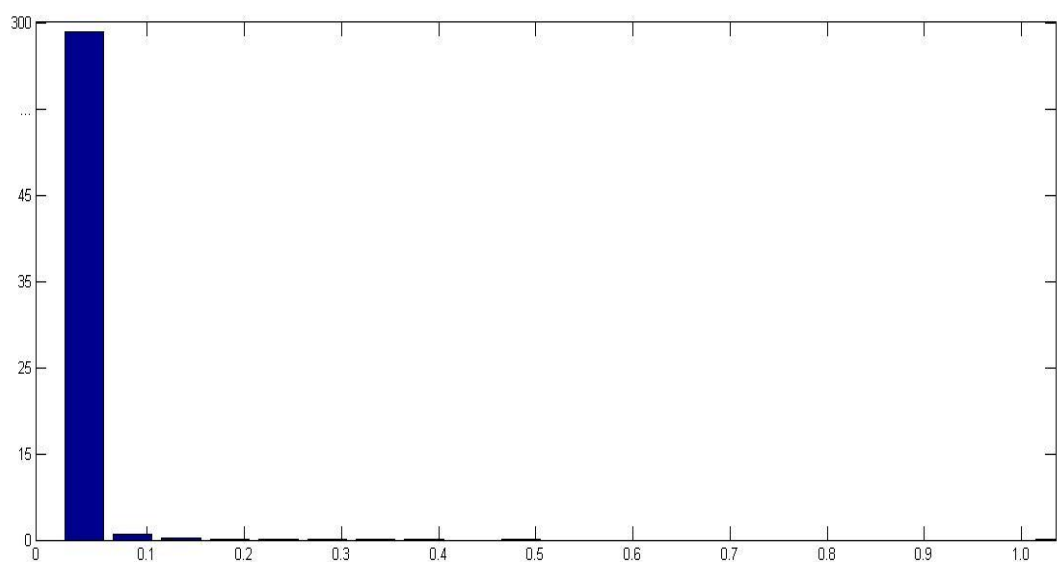
Nesse contexto, quando a relação é unidirecional e negativa entre mudança técnica e adaptação ecológica, as firmas se preocuparam apenas com o progresso técnico, e quase que inevitavelmente adotaram tecnologias que não são limpas, mas justamente o oposto, com potencial elevado potencial poluir.

---

<sup>8</sup> Recorda-se, no entanto, de que como o modelo é da classe dos sistemas complexos, nenhuma simulação é idêntica a outra, para as mesmas condições iniciais. Isso é refletido no resultado um pouco diferente do limiar.



a) Distribuição do *Fitness Tecnológico*



b) Distribuição do *Fitness Ecológico*

**Figura 9 – Distribuição dos Fitness Tecnológicos e Ecológicos no Estado Final para a Hipótese B. Firmas=300, t=40.000, Limiar=0,6483**

Fonte: Elaborado pelo autor (2012).

A correlação linear entre as distribuição foi negativa, em torno de -0,1798. Embora, pudesse-se pensar que a correlação seria próxima a -1, o resultado contraria as expectativas. Isso ocorre porque a firma busca maximizar seu fator tecnológico, e uma



vez que a relação é oposta, ela não procurará operar com o mínimo de adaptação possível ao meio ambiente.

Assim, num cenário em que as firmas atuam livremente em busca de progresso tecnológico sem levar em conta as externalidades negativas advindas da adoção de uma determinada técnica, e num sistema onde o governo não atua exigindo contrapartida ambiental, a adaptação ambiental não evolui.

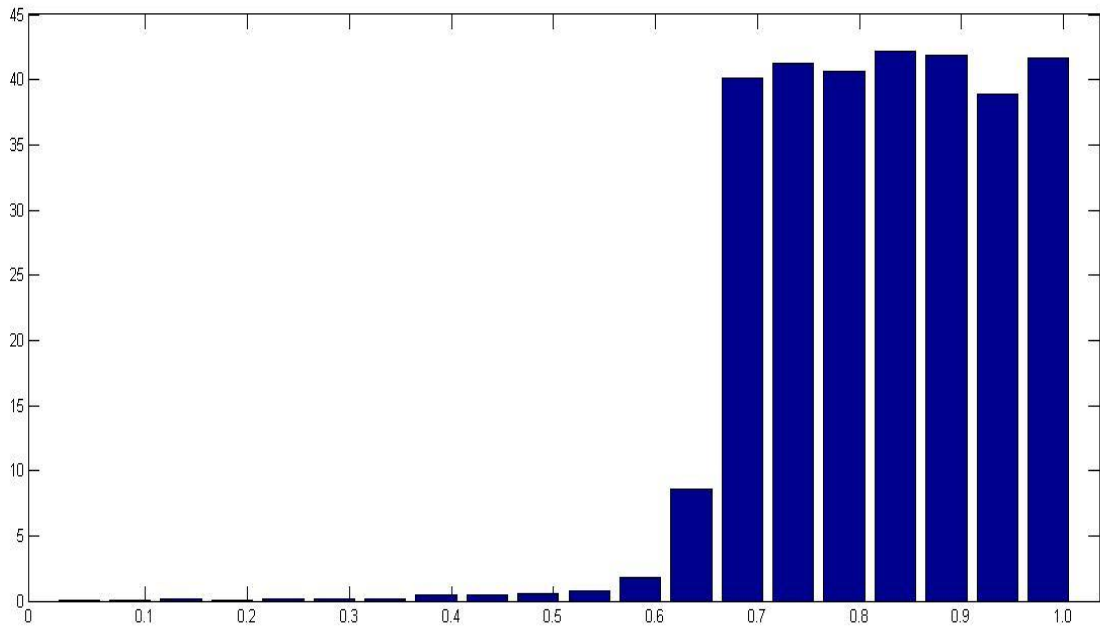
Nesse contexto, a simulação da Hipótese B reproduz a tese levantada por Capra (2006), Sachs (2006), Morin (1982) dentre outros, de que **a não** preocupação com o meio ambiente é desfavorável à evolução da vida na terra, e que o não estímulo (ou fiscalização) por parte dos demais agentes do sistema econômica e ambiental não conduz a um resultado que propicie ganho material com qualidade ecológica para a sociedade.

Agora, parte-se para a análise da Hipótese C, onde o capitalista preocupa-se apenas com a mudança técnica, mas suas tecnologias são relacionadas unidirecionalmente e positivamente com a sua capacidade de adaptação ao meio ambiente.

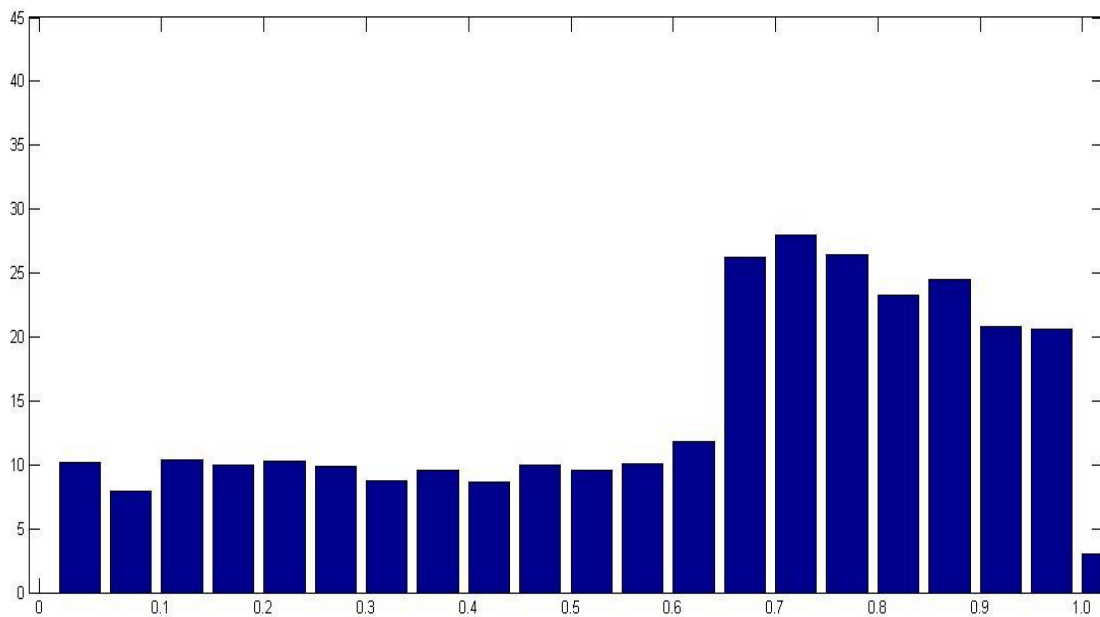
Como anteriormente, parte-se diretamente para as distribuições dos *Fitness* tecnológicos e ecológicos, uma vez que a evolução é a mesma que a apresenta nas Figuras 3 e 4. Nesses termos, a Figura 10 apresenta a distribuição do *Fitness* Tecnológico e ecológico.

O fator tecnológico evolui como nas outras hipóteses, no entanto seu limiar foi de 0,6412, mas agora, com a imposição da correlação positiva (adoção de tecnologias limpas por parte da empresa) o *fitness* ecológico se auto-organiza num estado final, onde um número maior de empresas apresenta adaptação ecológica relativamente alta acima de 0,60 de *fitness*.

Cabe ressaltar, que como a variação é na mesma proporção, poderiam ocorrer *fitness* acima de 1 na distribuição dos *fitness* ecológicos. Nesses casos, impõem-se que o *fitness* seja igual a 1, justamente por isso, à direita da distribuição mostrada na Figura 10(b) tem-se algumas firmas com valores de *fitness* iguais a 1.



a) Distribuição do *Fitness* Tecnológico



b) Distribuição do *Fitness* Ecológico

**Figura 10 – Distribuição dos Fitness Tecnológicos e Ecológicos no Estado Final para a Hipótese B. Firmas=300, t=40.000, Limiar=0,6483**

Fonte: Elaborado pelo autor (2012).

Contudo, como as empresas se preocupam apenas com a mudança técnica, algumas firmas não apresentam um cuidado com o meio ambiente elevado, exibindo uma concentração uniforme a esquerda da curva, mas estas firmas apresentam também um fator tecnológico menor que as outras, como fica evidenciado pelo alto valor da correlação, de fato, tais características reservam uma correlação de 0,9590 entre as distribuições.

Levando em conta um cenário onde as firmas preocupam-se apenas com a mudança técnica, dentro das três hipóteses, a situação ideal seria aquela onde as firmas evoluem tecnicamente, e essa tecnologia é “limpa”, ou seja, uma tecnologia que aumenta a capacidade de adaptação ecológica das mesmas, garantindo assim uma certa evolução para o ecossistema.

Essa solução “ótima” (em face de um mundo onde as firmas se preocupam apenas com tecnologia) vai de encontro aos alertas do IPCC quanto à adaptação ecológica, sobretudo a do tipo *Timing*. Ademais, dentro do ponto de vista teórico tal simulação se encaixa nas pressuposições de minimização de impacto ambiental da atividade econômica, uma vez que se a hipótese de que os seres humanos são materialistas é verdadeira, o melhor a ser feito é que o progresso material ocorra de maneira “limpa”.

Comentam-se agora os resultados obtidos para as simulações da **Situação 2** em que as firmas do modelo se preocupam apenas com sua adaptação ecológica, nesse caso o capitalista abdica de sua visão materialista em prol do cuidado ambiental. Embora apresente uma conotação utópica (ou uma imposição via Leis, ou de uma própria pressão pública) essa simulação é pertinente para mostrar como o sistema econômico e o ambiental evoluíram em direção ao estado estacionário.

A Situação 2 é o inverso da Situação 1, por isso esperar-se-ia *a priori* que as simulações fossem simétricas as obtidas na Situação 1, pois a dinâmica evolutiva é a mesma, sem premissas adicionais. De fato, a simetria foi confirmada, e as distribuições dos *Fitness* se comportam como as apresentadas nas Figuras 6, 7 e 8, só que agora o sistema que evolui para o estado estacionário exibindo equilíbrio pontual padrão de auto-organização é o sistema ambiental, ecossistema.

Na Hipótese A, em que não se especifica uma relação linear entre a mudança ecológica e tecnológica, a simetria é em relação a Figura 6. Nesse caso, o fator ecológico se auto-organiza em torno de um Limiar de 0,6482, onde a maior parte das firmas apresenta um *fitness* ecológico acima de 0,60, o que é representado pela uniformidade na extremidade direita da distribuição.

Embora as firmas tenham preocupação apenas ecológica algumas delas alcançam um nível tecnológico elevado, sobretudo aquelas acima de 0,60 de *Fitness* técnico. Assim, a distribuição é uniforme ao longo de toda sua extensão flutuando num número de 15 firmas para cada nível de adaptação tecnológica. Nesses termos, o Limiar da tecnologia foi de 0.

A correlação entre ambas as distribuições foi de 0,1164, refletindo, assim como na Situação 1, a independência (ou de maneira mais criteriosa, a baixa dependência) entre ambas os estados finais do modelo.

Na simulação da Hipótese B, em que as mudanças no fator ecológico se relacionam negativamente com a mudança técnica, a simetria se mantém, no entanto, sendo relacionada à Figura 7 da Situação 1. O ecossistema atinge o estado crítico gravitacionando o Limiar de 0,6514.

No entanto, o sistema econômico não evolui, permanecendo estacionário no limiar de 0, devido a impossibilidade de avanço material, pois degradariam o sistema mais importante dessa economia, o sistema ambiental. Nesse caso, a totalidade das firmas apresenta valores de *fitness* inferiores a 0,20, ou seja, um baixo nível técnico que se refletiria no mundo real, num baixo crescimento econômico, uma vez que o progresso técnico é responsável por grande parte desse último.

A correlação entre ambos os sistemas foi negativa em torno de -0,1698, o que difere do esperado, uma correlação elevada e negativa. No entanto, é razoável pensar que todas as firmas minimizarão ao máximo seus fatores tecnológicos, se o objetivo desse mundo fictício é a maximização do fator ecológico.

Essa Hipótese B, embora faça parte do mundo artificial simulado aqui, vai de encontro as recentes ideias desenvolvidas pela corrente dos Economistas Verdes, a hipótese do *DeGrowth*. Essa perspectiva se afasta da retórica do desenvolvimento sustentável, uma vez que postula que as ações de mitigações e de adaptação não terão

enfeito se os países continuarem a ter crescimento do PIB. A base disso é que a evidência de que um maior crescimento está vinculado a: o esgotamento de materiais não renováveis, e a de que colocar expectativas irreais nas pessoas, tanto de melhorias de eficiência quanto os avanços tecnológicos, a fim de ficar entre os limiares de emissão de gases efeito estudo do IPCC (JACKSON, 2009), (VICTOR, 2010), HEINBERG(2010).

Nesse sentido, a grande questão dos defensores do *DeGrowth* é: como reduzir o crescimento, assumindo que o progresso técnico não dará conta da redução das alterações climática, sem prejudicar a vida das pessoas, gerando miséria, desemprego e fome? Essas questões vêm atribuindo a esse debate o nome de *Sustainable DeGrowth*.

O modelo aqui simulado não capta essas questões que envolvem o social, mas pode-se perceber que apenas através da distribuição da renda seria possível trabalhar com essa hipótese no plano físico, uma vez que se não há progresso técnico, a probabilidade de haver decréscimo do produto é maior. Todo o padrão de competitividade *a la* Marx do modelo de progresso técnico induzido é afetado, pois as firmas não concorreriam (como apresentado no modelo) sua única preocupação seria apenas o cuidado com o meio ambiente.

Quando se considera a Hipótese C da Situação 2, em que as firmas preocupam-se com o meio ambiente, buscam uma adaptação, mas uma adaptação que afeta a dinâmica da mudança técnica, ou seja, a firma com menor fator ecológico é envolvida numa troca aleatória, em seguida ela sobre uma mutação técnica em que sua capacidade nesse meio aumenta a mesma proporção que seu cuidado com o meio ambiente. Percebe-se que essa situação é simetria àquela apresentada na Figura 8.

O sistema ambiental se auto-organizou em torno de um limiar de 0,6442 com uma distribuição uniforme a partir desse limiar. Percebe-se que assim como na Situação 1 (só que agora para o meio ambiente) existe um número grande firmas que tem um capacidade elevada de cuidado com o meio ambiente, reduzindo assim seus efeitos sobre as mudanças climáticas.

O sistema econômico se auto-organizou num estado estacionário que flutua em 0,05 de *fitness* técnico. A distribuição do fator tecnológico das firmas é uniforme, com

uma concentração elevada a partir do limiar 0,60 (como na ecologia), mas com um número menor de empresas. Uma figura simetria a Figura 6 anterior.

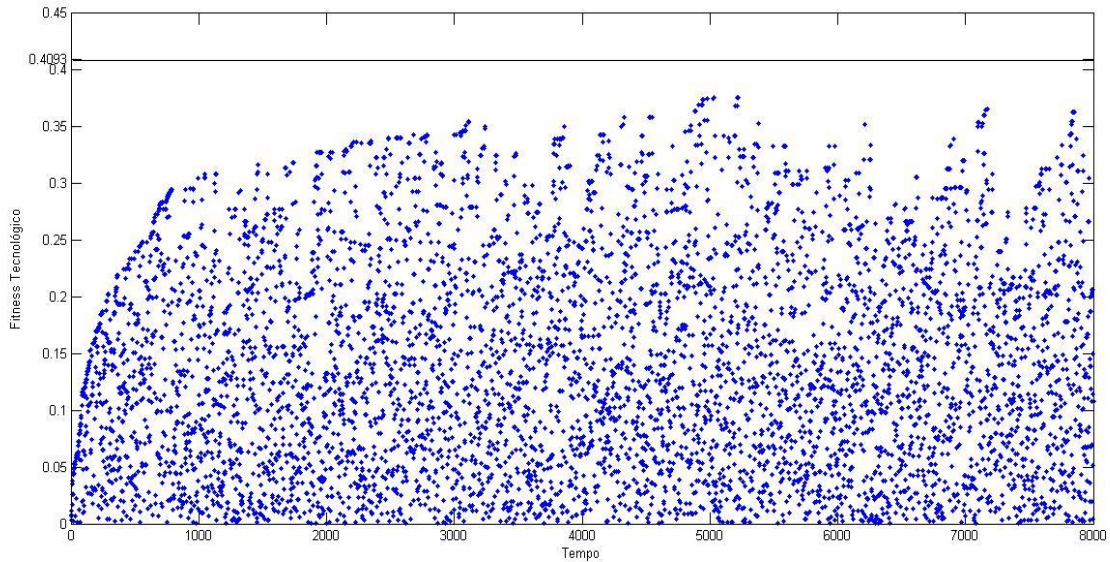
A correlação entre as distribuições ficou em 0,9612, refletindo que uma firma que opta por uma adaptação ecológica inevitavelmente variará sua proporção tecnológica na mesma intensidade. Da mesma maneira que na Situação, essa constatação demonstraria ser a mais adequada no mundo real, onde as firmas não se preocupariam apenas com o meio ambiente, mas sim com a tecnologia, para gerar o crescimento necessário à manutenção social, como prevê os teóricos do Desenvolvimento Sustentável, como Sachs (2006), Leff (2001a), Veiga (2004), Abramovay (2011), dentre outros.

Agora, analisam-se os resultados obtidos a partir da Simulação da Situação 3, onde as firmas no passo 1 de tempo mudam sua tecnologia de acordo com o arcabouço da teoria do progresso técnico induzido, e no passo seguinte são levada a adaptar-se ao meio ambiente. As três hipóteses são simuladas da seguinte forma: **a) a mudança tecnológica não apresenta correlação com a mudança ecológica; b) a mudança técnica se relaciona negativamente e de maneira bidirecional (variando na mesma proporção) com a adaptação ecológica; e c) essa relação é positiva e bidirecional, uma mudança técnica aumenta (na mesma proporção) a capacidade de adaptação ambiental das firmas do modelo.**

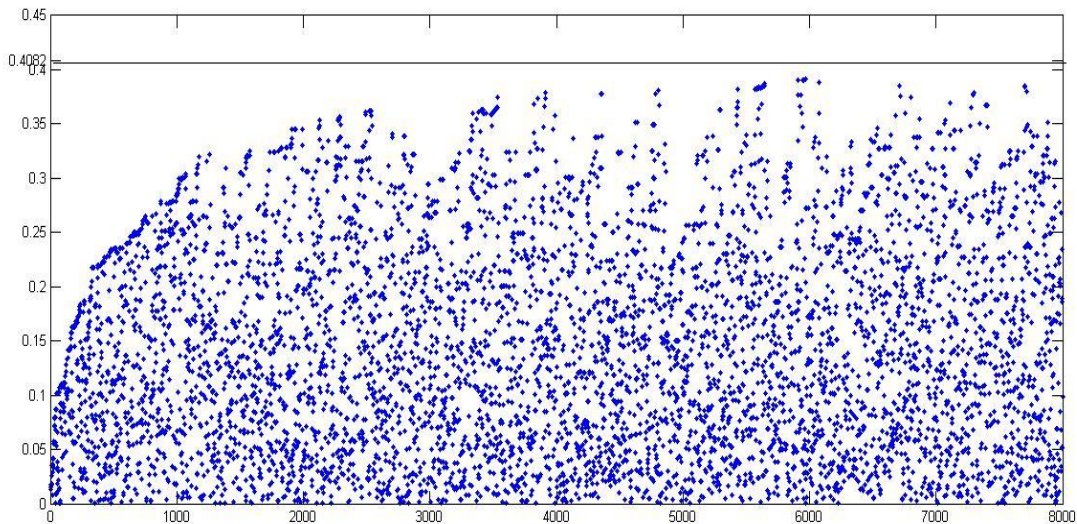
Para a Hipótese A, a Figura 11 apresenta a evolução do *fitness* tecnológico e ecológicos mínimos. O limiar da mudança técnica ficou em torno de 0,4093, sendo atingido no passo 35.600 da simulação. O limiar da adaptação ecológica atingiu o estado estacionário, no valor de 0,4083 de *fitness*. Na prática, e levando-se em conta que foi simulada uma única amostra, os dois limiares são da ordem de 0.4.

Quando se avalia a evolução das firmas nos dois fatores, percebe-se que esses são muito parecidos, e que com a independência linear atribuída parecem caminhar juntos. Parece, no entanto, que a evolução do *fitness* ecológico é um pouco mais rápida do que a tecnológica, pois já a partir do passo número 3.500 observam-se firmas de mínimo *fitness* próximas a linha reta que representa o limiar (que no entanto só é alcançado no passo número 34.600).

Destaca-se que os pontos superiores visualizados acima dos demais nas duas simulações evolutivas representam o máximo valor que o *fitness* alcançou em cada período de tempo. Esse valor máximo evolui em uma função de grau, num formato de escada, exibindo a evolução que apresenta Equilíbrio Pontual.



a) Evolução do *Fitness* Tecnológico Mínimo

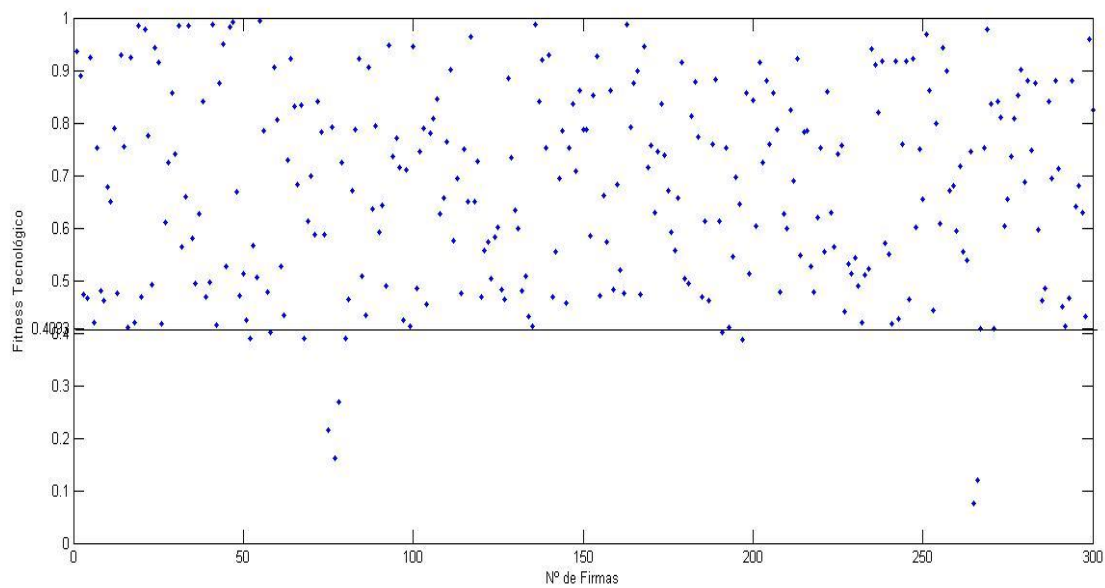


b) Evolução do *Fitness* Ecológico Mínimo

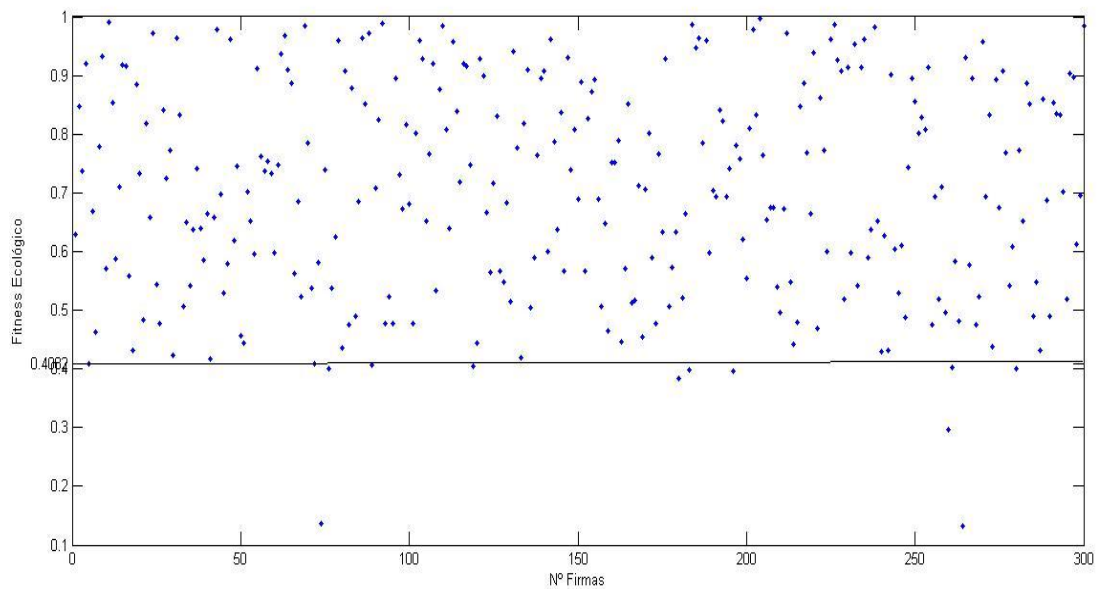
**Figura 11 – Evolução do *Fitness* Tecnológico e Ecológico Mínimo das 300 Firmas para Hipótese A. Firmas=300, t=40.000, Limiar tecnológico: 0,4093 e ecológico: 0,4082.**

Fonte: Elaborado pelo autor (2012).

Nos dois painéis da Figura 12 apresentam-se as representações instantâneas dos *fitness* em seu valor final.



a) Imagem Instantânea das Barreiras de *Fitness* tecnológicos



b) Imagem Instantânea das Barreiras de *Fitness* Ecológico

**Figura 12 – Imagem Instantânea das Barreiras de *Fitness* tecnológico e ecológico do Modelo estado estacionário para a Hipótese A. Firmas=300,  $t=40.000$ , Limiar tecnologia (painel a): 0,4093 e ecologia (painel b): 0,4082.**

Fonte: Elaborado pelo autor (2012).



Percebe-se que a maioria das firmas tem seu valor tecnológico e ambiental acima dos limiares de seus respectivos sistemas. No entanto, não se pode afirmar que ambos os sistemas encontram-se auto-organizados num elevado nível técnico e ecológico, pois ambos encontraram seus estados estacionários num *fitness* em torno de 0,41.

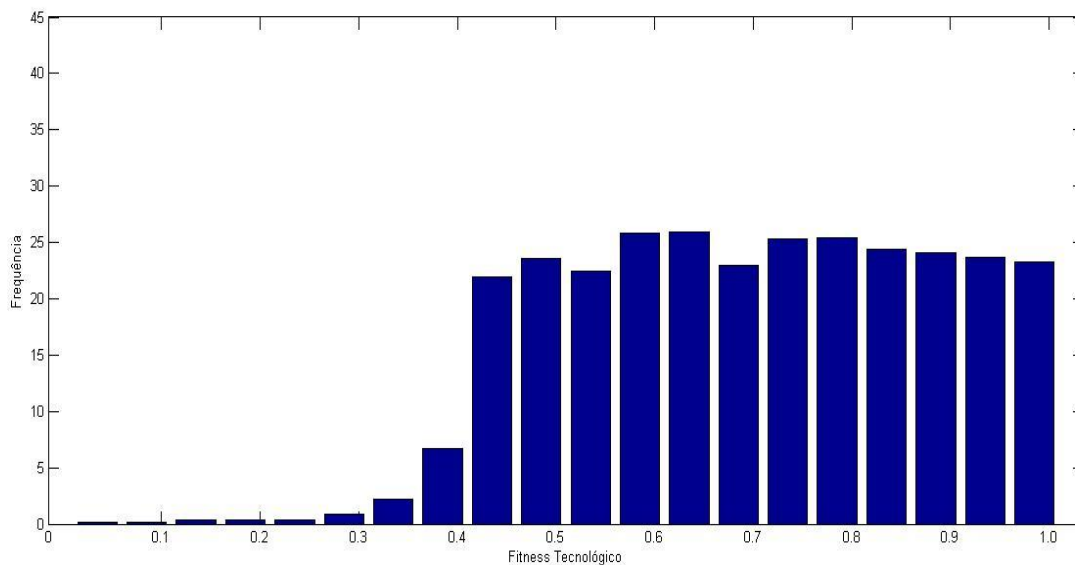
As firmas situadas abaixo do limiar serão selecionadas para a mutação, no entanto não existem restrições no modelo, como já foi destacado anteriormente que façam com que as firmas com *fitness* maiores não o sejam, dados os padrões concorrenciais e relacionais delas no sistema econômico e ambiental.

A partir dessas constatações evolutivas iniciais pode-se apresentar a distribuição do fator tecnológico no estado final da simulação e sua relação com o fator ecológico que opera sempre no passo seguinte, o que é mostrado na Figura 13.

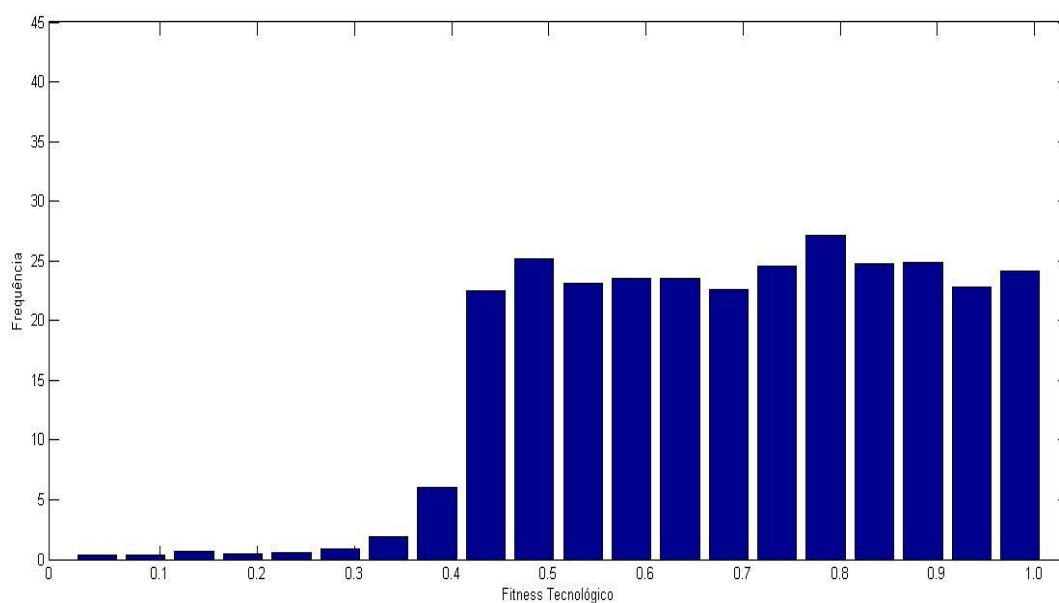
Nota-se que mudança técnica da firma produz uma distribuição uniforme a partir do valor do limiar para ambos fatores, tecnológicos e ecológicos. Nesse contexto, quando uma firma decide optar pela mudança técnica em cada passo do tempo, em virtude da elevação dos custos do trabalho sobre os custos totais, a mesma no passo seguinte muda sua relação de adaptação ao meio ambiente, podendo poluir mais ou menos através da adoção de medidas mitigadoras ou de técnicas que são “limpas”.

A correlação entre os fatores tecnológicos e ambientais ficou em 0,99, muito elevada em face da independência especificada pelo modelo. No entanto, o resultado desse coeficiente pode dizer que mesmo que as condições iniciais pressuponham independência linear, as distribuições de *fitness* ecológico e tecnológicos das firmas no sistema econômico e ambiental tendem a andar juntas.

Quando se comparam esses resultados, com o que é retratado nos artigos científicos da área de Desenvolvimento Sustentável apresentados no Capítulo 3, pode-se pensar essa simulação como a que mais reflita a distribuição dos fatores tecnológicos e ambientais no mundo real. Sobretudo, isso se sustentaria pela simples observação de que nas sociedades capitalistas as firmas sempre buscam a melhoria técnica (encarada como de produto ou de processo), mas nem todas no momento em que a adotam levaram em conta os efeitos climáticos, adaptando seus fatores ecológicos.



a) Distribuição do *Fitness Tecnológico*



b) Distribuição do *Fitness Ecológico*

**Figura 13 – Distribuição dos Fitness Tecnológicos e Ecológicos no Estado Final para a Hipótese A. Firms=300, t=40.000, Limiar=tecnologia (no painel a) 0,4093 e ecologia (no painel b) 0,4082.**

Fonte: Elaborado pelo autor (2012).

Mais: como salientado pelos autores que trabalham com Sistemas Complexos, dentre eles Capra (2006), são relativamente inconscientes os modelos econômicos (ou

sociais) que tentam derivar comportamentos desse tipo a partir de um agente representativo, onde não se considera a heterogeneidade de cada agente no sistema. É pertinente, contudo, considerar agentes heterogêneos dotados de estratégias que buscam maximizar (ou não) e que seguem uma trajetória de evolução ao longo do tempo no sistema. Nesse sentido, a trajetória de Equilíbrio Pontual exibida por esse modelo pode contribuir para complementar modelos com agentes heterogêneos envolvidos em jogos evolucionários.

Agora parte-se para análise da Hipótese B da Situação 3, em que no primeiro passo de tempo as firmas mudam sua tecnologia e em seguida sofrem mutações em sua capacidade de adaptação frente as mudanças climáticas, essa mutação é negativamente correlacionada. Nesse caso, o progresso técnico gera degradação ambiental, e a adaptação ecológica não é maximizada se a firma aumenta seu fator tecnológico ao longo do tempo.

Esses resultados são apresentados na Figura 14. Percebe-se que a distribuição de ambos os *fitness* tecnológico e ambiental é uniforme. O *fitness* limiar para ambas as distribuições, ficou abaixo de 0,01, o que é visualizado na Figura 12. Um resultado que não é gratuito, uma vez que as firmas buscam evoluir minimizando ao máximo os dois fatores (tecnológicos e ambientais) que são negativamente correlacionados.

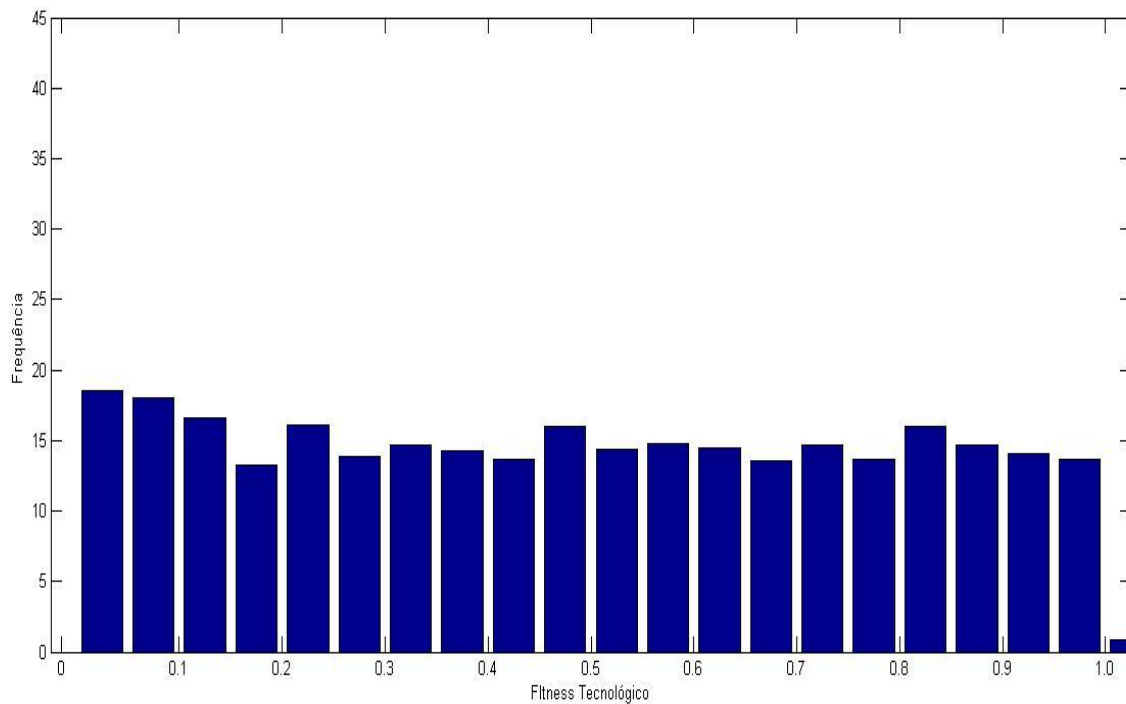
Assim, o que as firmas não consideram é justamente essa correlação, o que faz com que ambos os sistemas não evoluem em direção ao ponto de criticalidade auto-organizada. Essa uniformidade refletida nas curvas ocasiona uma correlação positiva de 0.93 para o fator de progresso técnico e o de adaptação ecológica das firmas.

Sem espaço para dúvida, o resultado apresentado para a Hipótese B é o cenário menos desejado pelos pesquisadores, políticos e pela sociedade em geral, agentes esses que estão envolvidos no debate da sustentabilidade. Ora, nesse cenário nenhum dos sistemas evolui<sup>9</sup>, mesmo em face dos esforços de ambas as firmas para tal.

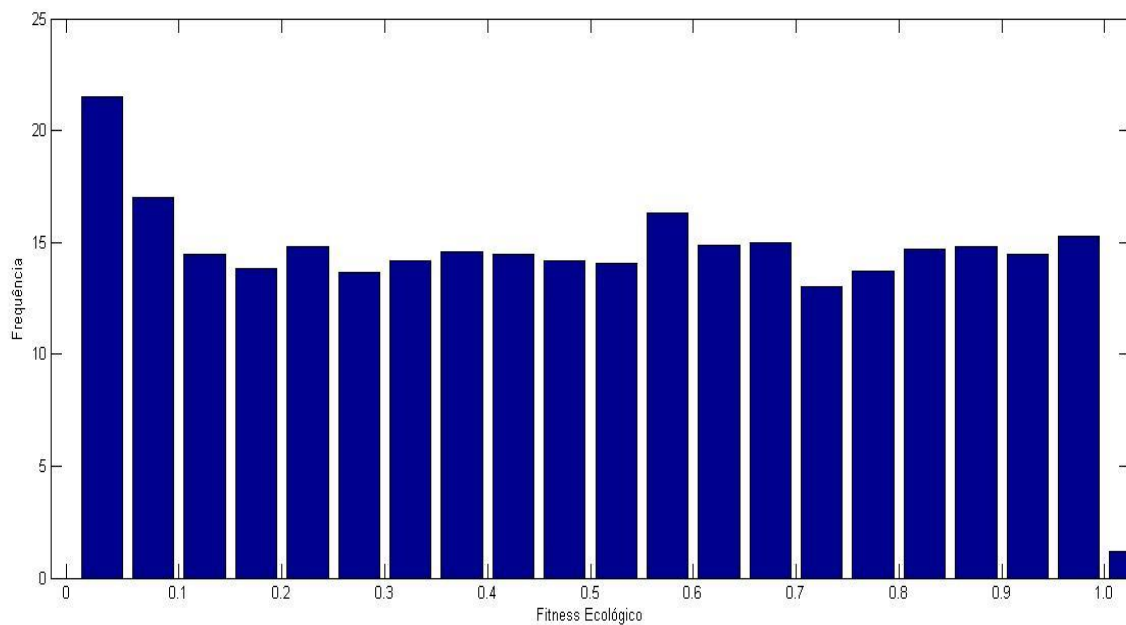
Nesse caso, a teoria do progresso técnico Marx-Kennedy, poderia se revelar insuficiente para explicar os fatores que determinam a mudança técnica ao longo do tempo, isso porque, agora não é apenas o salário (e o custo em capital) da nova técnica que impõem uma barreira, mas passa a surgir uma restrição ambiental.

---

<sup>9</sup> Por isso não se apresentam aqui os gráficos de evolução do *Fitness*.



a) Distribuição do *Fitness Tecnológico*



b) Distribuição do *Fitness Ecológico*

**Figura 14 – Distribuição dos *Fitness Tecnológicos* e *Ecológicos* no Estado Final para a Hipótese B. Firms=300,  $t=40.000$ , Limiar tecnologia (no painel a) 0,0096 e ecologia (no painel b) 0,0093.**

Fonte: Elaborado pelo autor (2012).

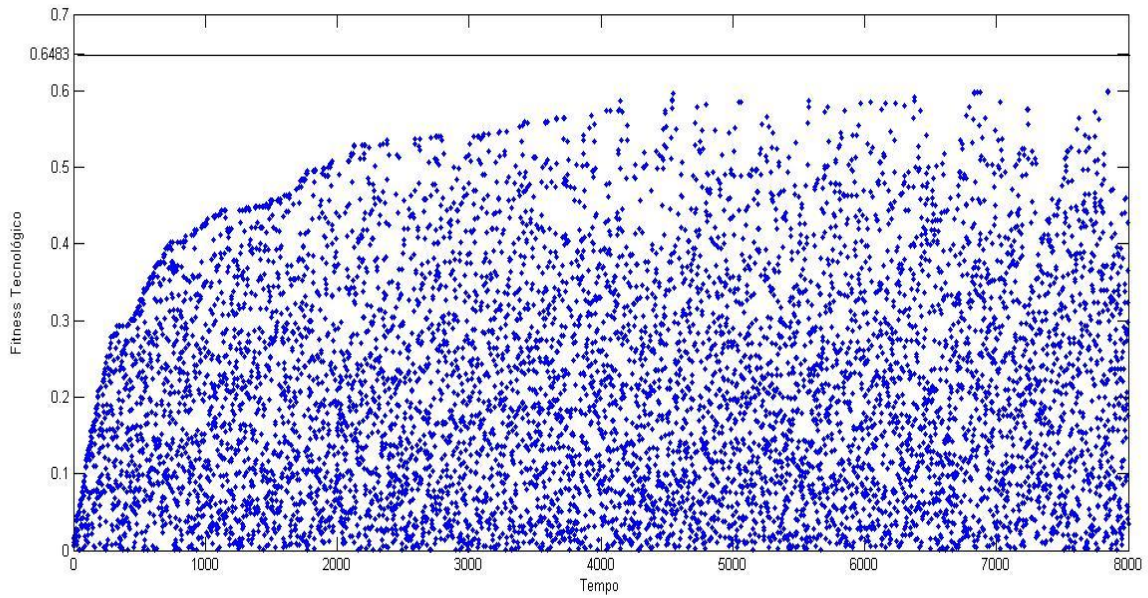
Incorporar uma variável que identifica o potencial poluidor (ou entropia) poderia se revelar uma boa iniciativa para, mesmo que de maneira normatiza, formalizar a restrição ambiental para a adoção de novas técnicas. Não obstante, sugestões políticas poderiam ser propostas a partir da análise desse modelo, onde o governo poderia desenvolver medidas de mitigação ou adaptação via lei para viabilizar o progresso técnico sem contribuir de maneira elevada para as mudanças climáticas na terra.

Por fim, analisa-se a última hipótese da Situação 3, a Hipótese C, em que as firmas no primeiro passo de tempo mudam sua tecnologia e no passo seguinte se adaptam as transformações climáticas. Nesse caso, a correlação atribuída é positiva e bidirecional, uma melhoria técnica aumenta a capacidade de adaptação das firmas frente as mudanças climáticas, onde o inverso também é válido.

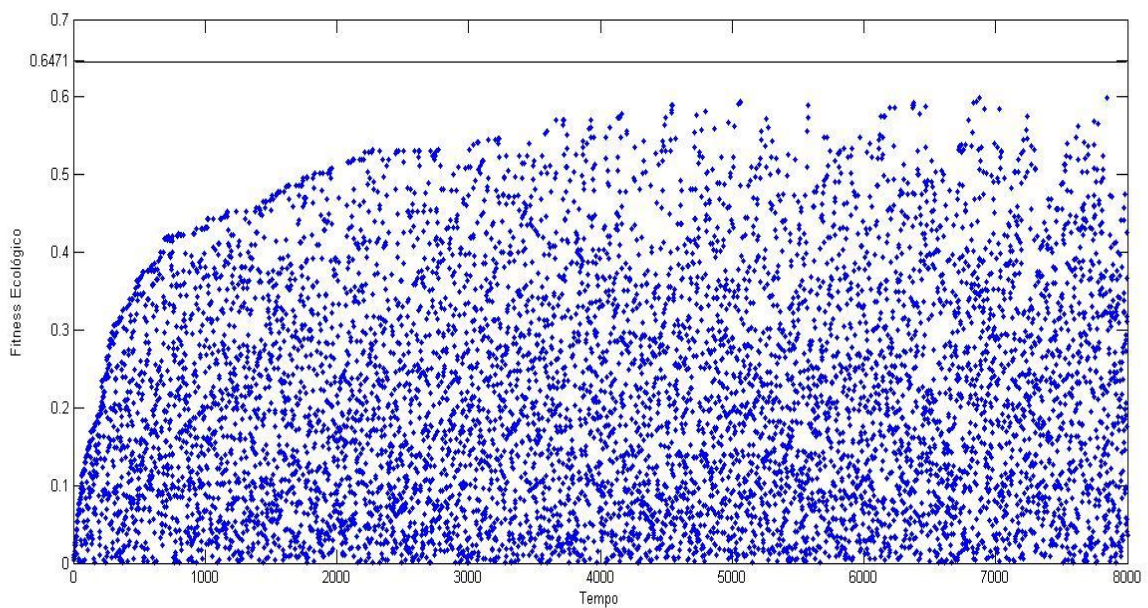
Essa simulação representa a situação ideal dentre todos os modelos simulados, pois é um mundo onde as empresas adotam apenas tecnologia que não agridem o meio ambiente, e as adaptações ecológicas não tem custos de redução técnicas. O sistema econômico evolui em perfeita harmonia com o ecossistema. Situação que não se observa no mundo real.

Nesse contexto, a Figura 15 apresenta a evolução das firmas de *fitness* mínimo para o progresso técnico e mudanças climáticas. O que se percebe através do painel (a) que representa a evolução do progresso técnico das firmas menos aptas, é que esse sistema evolui rapidamente, pois antes do passo de tempo 1.000, o limiar encontra-se de 0,42 de *fitness* mínimo. O sistema atinge o estado estacionário no passo 34.895 onde exhibe equilíbrio pontual. Nesse ponto entender o progresso tecnológico apenas pela representação isolada do indivíduo não é possível, porque esses apresentam um grande número de interações nesse estado.

O mesmo pode ser dito quanto à evolução da adaptação das firmas as mudanças climáticas, que também cresce rapidamente, pois até o passo 1.000 já é superior a 0,40 de *fitness* limiar, crescendo mais rápido que nas demais simulações apresentadas. As firmas atingem o estado estacionário do sistema ambiental no passo número 34.585.



a) Evolução do *Fitness* Tecnológico Mínimo



b) Evolução do *Fitness* Ecológico Mínimo

**Figura 15 – Evolução do *Fitness* Tecnológico e Ecológico Mínimo das 300 Firmas para Hipótese C. Firmas=300, t=40.000, Limiar tecnológico (painel a): 0,6483 e ecológico (painel b): 0,6471.**

Fonte: Elaborado pelo autor (2012).

Nesse sentido, quando as firmas mudam sua tecnologia sem agredir o meio ambiente e em seguida, melhorando sua capacidade de adaptação as mudanças climáticas sem criar mecanismos restrições ao desenvolvimento tecnológico, faz com que os sistemas econômicos e ambientais evoluam para o estado estacionário de maneira natural, mas acelerada.

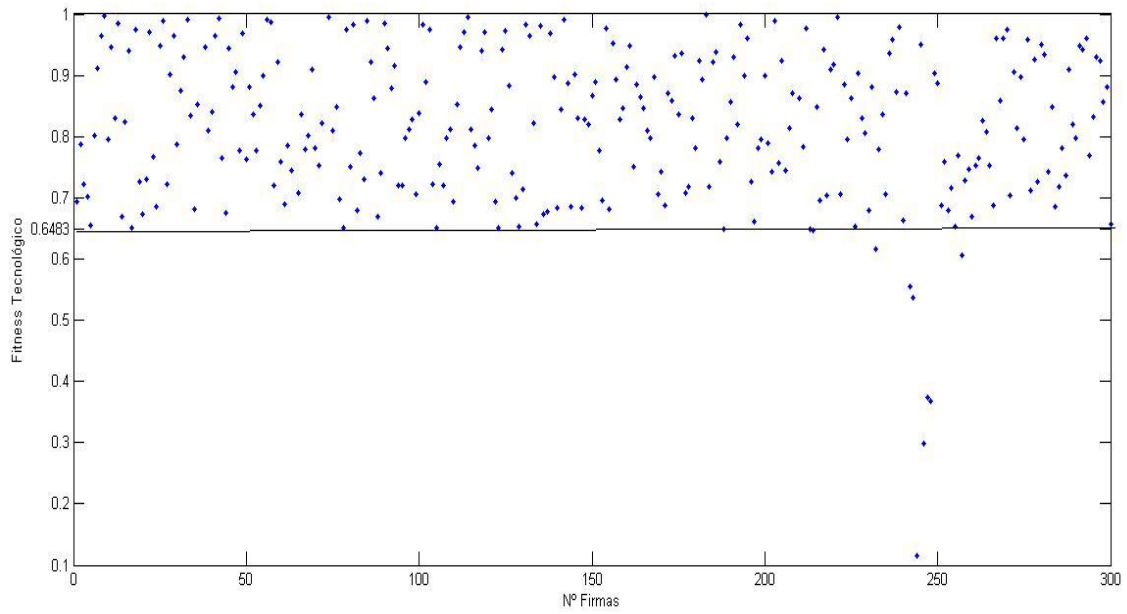
Como os pontos mais altos na Figura 15 representam o limiar atingido por ambos os sistemas, a partir de uma função envelope, é pertinente compreender quantas dessas firmas estão situadas acima desse valor de “equilíbrio” em cada um, o que é mostrado na Figura 15.

O que se percebe é que a representação entre o estado final do sistema econômico e do sistema ambiental é praticamente idêntico, o que reflete o objetivo claro das firmas em termos de mudança técnica e ecológica, evoluir conjuntamente, desenvolvendo tecnologia limpas e de que as adaptações ecológicas não se comportam como restrições ao desenvolvimento tecnológico.

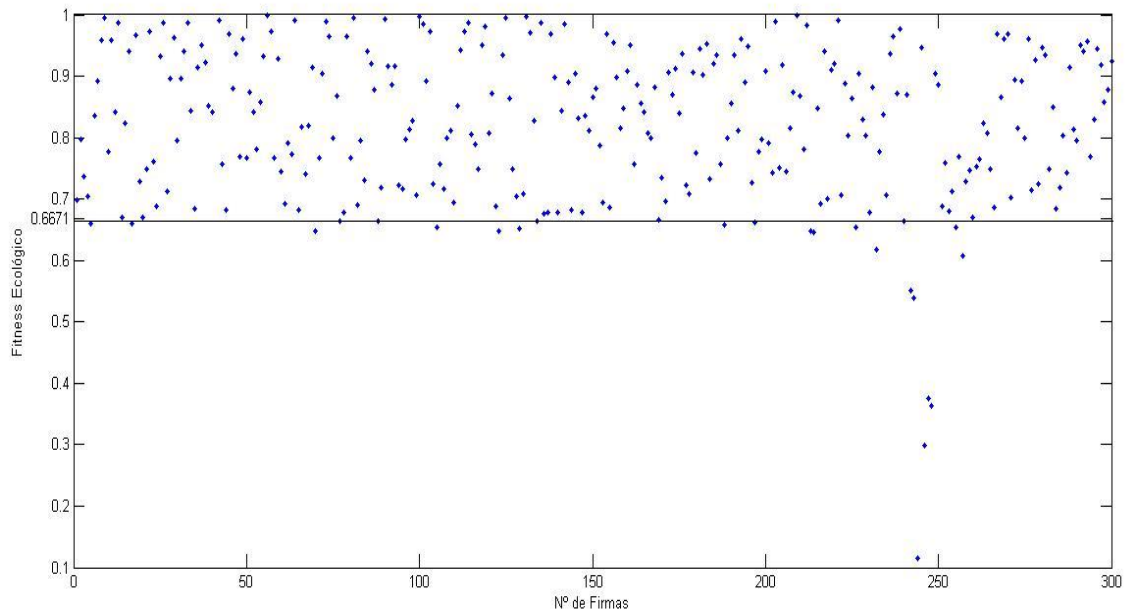
Nesse contexto, a maioria das firmas no sistema econômico e ambiental situa-se acima do limiar do estado estacionário, e poucas abaixo, que serão selecionadas para a mutação tecnológica e para a mutação ecológica. Mas por que os sistemas não evoluem mais, para além do estado estacionário? O limiar pode subir muitos passos à frente da simulação, mas não muito, o que despenderia um grande tempo em simulação computacional. Isso significa, que as chances de melhoria técnica se tornam cada vez mais difíceis a medida que as firmas tornam-se mais aptas (isso faz sentido pela proximidade de 1 do limiar), sendo mais provável que a firma reduza seu nível tecnológico caso seja selecionada para mutação. O mesmo é válido para as mesmas firmas no ecossistema.

Embora esse comportamento não seja confluyente com o arcabouço teórico da mudança técnica induzidas (e mesmo das discussões de epistemologia e empirismo ecológico), acredita-se que se existe a probabilidade de firmas com maiores níveis técnicos e de cuidado ambiental serem envolvidas em mutações devido a relação com as demais, essa probabilidade deve ser considerada nas trajetórias evolucionárias das mesmas.





a) Imagem Instantânea das Barreiras de *Fitness* tecnológicos



b) Imagem Instantânea das Barreiras de *Fitness* Ecológico

**Figura 16 – Imagem Instantânea das Barreiras de *Fitness* tecnológico e ecológico do Modelo no Equilíbrio Pontual (estado estacionário) para a Hipótese C. Firms=300, t=40.000, Limiar tecnologia (painel a): 0,6483 e ecologia (painel b): 0,6471.**

Fonte: Elaborado pelo autor (2012).



Não obstante, na Figura 16 são apresentadas as distribuições do estado final das firmas no sistema econômico e no ecossistema. A distribuição é uniforme para valores elevados de ambos os fatores. Essa uniformidade é concentrada no número de 40 empresas por nível de adaptação tecnológica e ecológica.

Nessa simulação, as distribuições refletem o esperado a priori, de que a correlação entre ambos os estados finais, no equilíbrio pontual, seria elevada, com um valor de 0,9998. Ou seja, se as firmas agem com equilíbrio ambiental e tecnológico o nível de bem-estar socioambiental será maior.

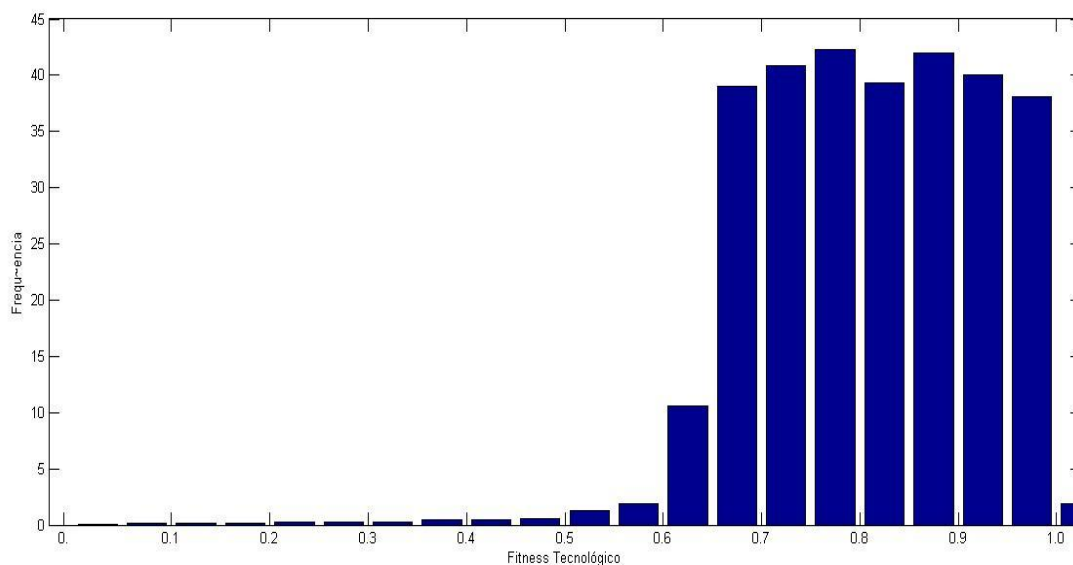
De fato, a área compreendida entre a partir do *fitness* limiar para ambas as distribuições é a maior entre todas as Situações (1,2 e 3), refletindo o cenário ideal para a sociedade capitalista.

Embora esse mundo seja irreal, no sentido de que a sociedade precisa realizar um esforço muito grande para chegar a esse nível relacional de progresso técnico e adaptação ecológica, ele corrobora com a visão de futuro idealizada pelos teóricos da sustentabilidade ambiental, como Capra (2006) e Abramovay (2011).

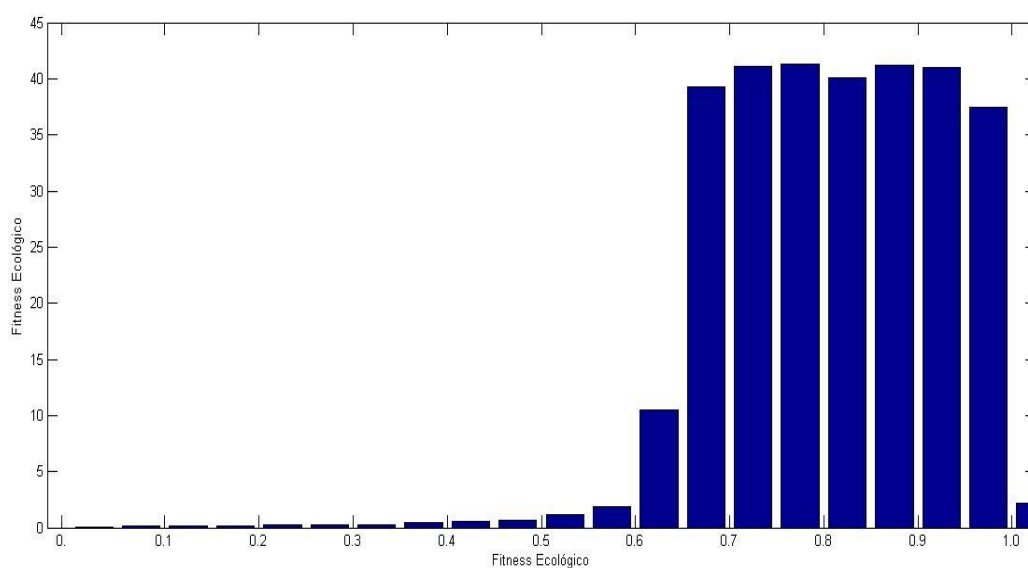
Essa sustentação teórica do sistema ambiental não é aplicada a teoria do progresso técnico induzido, uma teoria que ainda não contempla as restrições ambientais oriundas da escolha de determinada técnica de produção (ou produto)<sup>10</sup>. Nesse sentido, formalizar um modelo mesmo que normativo da mudança técnica poderia contribuir para que os agentes possam traçar o caminho em direção aos estados finais apresentados nas Figuras 15 e 17.

---

<sup>10</sup> Mais: nenhuma teoria de mudança técnica considera explicitamente o fator ecológico como uma restrição para a escolha da técnica.



a) Distribuição do *Fitness Tecnológico*



b) Distribuição do *Fitness Ecológico*

**Figura 17 – Distribuição dos Fitness Tecnológicos e Ecológicos no Estado Final para a Hipótese C. Firms=300, t=40.000, Limiar tecnologia (painel a) 0,6483 e ecologia (painel b) 0,6471.**

Fonte: Elaborado pelo autor (2012).

Por fim, os resultados das simulações apresentadas no presente capítulo contribuem para elucidar algumas conclusões empíricas já indicadas pelos teóricos do

Desenvolvimento Sustentável, contundo explicitando o padrão complexo emergente da relação entre o progresso técnico e as transformações ecossistêmicas em geral.

Nesse ponto, assumindo que o arcabouço teórico da mudança técnica de a adaptação ecológica possa ser útil para formalizar um modelo conceitual de evolução no sistema econômico e no ecossistema, é possível identificar alguns cenários que corroboram as teorias apresentadas no Capítulo 3, no que tange a relação crescimento-mudança climática.

O **cenário mais provável**, aquele que parece se adequar as evidências teóricas e empíricas é o da Hipótese A da Situação 3, em que as firmas no primeiro passo buscam maximizar seu fator tecnológico, podendo adotar tecnologias limpas ou não, e no passo seguinte outras firmas (ou a mesma) buscam maximizar seu fator ecológico sem levar em conta restrições ou potencialidades que possam existir com a mudança técnica.

Da mesma forma que na simulação, no mundo real algumas firmas preocupam-se com suas externalidades negativas para com o meio ambiente e outras não, assim, no padrão evolutivo algumas podem adotar tecnologias limpas e outras não. Aquelas firmas que se preocupam com a maximização do fator ecológico em primeiro lugar, podem sacrificar seus recursos tecnológicos, ou potencia-los com vistas a preservar o equilíbrio ambiental.

O **cenário** caracterizado como o **ideal**, aquele que os agentes do sistema avaliam como o que traria maior bem estar socioambiental, é o simulado pela Situação 3, sobretudo a Hipótese C, de que a evolução entre ambos os *fitness* ecológico e tecnológico se daria de maneira correlacionada e positiva (mais: de maneira retroalimentada).

Nesse cenário, a contribuição da simulação para a teoria e para evidência poderia ser em dois sentidos: na inclusão das restrições ambientais nos modelos da teoria do progresso técnico de tradição marxista, Kennedy (1964) ou Dumménil e Levy (2009); a segunda que merece maior destaque, reside na própria dinâmica evolutiva do modelo Bak-Sneppen (1993).

A dinâmica da evolução é governada pelo fitness mínimo e também pela interação entre os agentes vizinhos no sistema, já que entre eles existem relações que podemos comparar com a dicotomia presa – predador (concorrencial), mas não apenas isso, o

comportamento individual e local pode se refletir na dinâmica macroeconômica. Isso corrobora a visão de Schelling (1993) de microeconomia sistêmica, em que muitas vezes a ação de alguns indivíduos em interação pode “contaminar” todos os demais do sistema, promovendo assim uma mudança no estado crítico do sistema. Nesse sentido, a visão otimista (e normativa) que se quer passar é a de que pequenas ações bem sucedidas de inovação e cuidado com o meio ambiente podem desencadear um efeito em cadeia que mude a dinâmica evolutiva das firmas do sistema.

Não obstante, essa afirmação contraria toda a noção de equilíbrio neoclássico mecânico, em que pequenas alterações de poucos agentes não têm qualquer efeito sobre o ponto de equilíbrio geral do sistema econômico. Nesse contexto, qualquer teoria da mudança técnica que contemple essa concepção estará avançando sensivelmente o modo de visualizar o capitalismo e sua relação com a degradação ambiental.

O **cenário desfavorável**, em termos de sustentabilidade socioambiental também foi identificado nas três situações, mas particularmente na Situação 3, referindo-se a Hipótese B, de que as correlações entre mudança técnica e adaptação ecológica são negativas, ou seja, são dois fatores mutuamente excludentes que não contribuem para a evolução de ambos os sistemas.

Nesse cenário, tanto o crescimento econômico, quanto a degradação ambiental estão comprometidos e estacionários num limiar muito baixo de tecnologia e adaptação climática. Esse caso poderia acontecer no sistema se o mesmo estivesse organizado com um agente institucional que regulasse a evolução dos fatores tecnológicos e não houvesse inovações “limpas”, assim quando a firma buscasse maximizar sua mudança técnica, no período seguinte deveria corrigir a externalidade, e para isso teria que sacrificar nível técnico.

Embora difícil de visualizar a nível global, não se pode negar, da mesma forma que no cenário normativo anterior, que a interação microscópica entre as firmas pode fazer com que esse cenário ocorra no mundo real.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou descrever as relações existentes entre o *progresso técnico* e as *alterações ao ecossistema* a partir de métodos e técnicas que fazem parte do que se convencionou chamar de *Teoria dos Sistemas Complexos*. Nesse sentido, o problema principal era determinar de que maneira um *modelo evolucionário* que exhibe comportamento complexo poderia contribuir para essa descrição.

A partir de uma revisão básica na literatura dos *Sistemas Complexos*, tanto em seu aspecto epistemológico, quanto instrumental, pode-se entender a natureza desse tipo de sistema, quais suas características, regras relacionais e auto-organização. Essa revisão contribuiu para a seleção do modelo a ser utilizado, o modelo de evolução de espécies de Bak-Sneppen.

O modelo de Bak-Sneppen opera com regras simples: dinâmica de mínimo e interação entre agentes, exibindo criticalidade auto-organizada que conduz a um estado crítico, onde podem ser obtidas médias, estimativas, etc., também chamado de estado estacionário. Não obstante, o modelo exhibe um padrão evolutivo chamado de Equilíbrio Pontual, que proporciona ao estudo o desvio das premissas neoclássicas de equilíbrio estável e do gradualismo da teoria evolucionária Darwiniana.

Quanto aos aspectos de teoria econômica, revisaram-se os aspectos essenciais da Teoria do Progresso Técnico induzido, pressupostos marxistas de mudança técnica que Kennedy (1964) resgatou para formalização. Embora nesse primeiro momento ainda não se tenha simulado o modelo de Kennedy (1964), sua revisão forneceu ao modelo uma *fundamentação econômica* dos motivos que levam as firmas a adotar uma nova tecnologia.

No aspecto ambiental revisaram-se as teorias de Desenvolvimento Sustentável, Sachs(2006), Morin (2001), dentre outros para compreender a relação que os mesmos fazem entre as mudanças climáticas e os Sistemas Complexos. Buscaram-se artigos empíricos que abordam a relação entre crescimento e mudanças climáticas para a elucidação do problema. Não obstante, se adaptaram as terminologias do IPCC para mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas do modelo Bak-Sneppen. Isso

ajudou a contextualizar porque as firmas optam por mitigar impactos ou antecipá-los a fim de minimizar externalidades.

Nesse contexto, adaptou-se a teoria econômica e as discussões empíricas relacionadas ao meio ambiente para a dinâmica do modelo Bak-Sneppen. Simularam-se assim nove modelos em duas dimensões, que apresentam relações entre as mudanças climáticas e o progresso técnico.

Identificaram-se as dinâmicas evolutivas para o progresso técnico e a adaptação frente às mudanças climáticas, sendo que essa tende a ocorrer de maneira mais rápida quando a mudança técnica é positivamente correlacionada com a adaptação ecológica. Não obstante, as distribuições dos estados finais tendem a concentrar um grande número de firmas que apresentam elevado nível técnico e fator ecológico, sobretudo os testes para a Situação 3 na Hipótese ou regra relacional C, onde o sistema atingiu o estado estacionário com um *fitness* próximo a 0,66.. Esse cenário foi considerado como o **cenário ideal** para otimizar os dois fatores, ambiental e econômico.

Ademais, verificou-se que a simulação que mais apresenta relação com o mundo real, no sentido do debate acadêmico, é aquele em que as empresas buscam maximizar seu fator tecnológico, sendo que algumas podem ou não adotar tecnologia que não agravem o efeito das mudanças climáticas. Essa simulação foi a da Situação 3, para a Hipótese A. Nela o sistema se auto-organizou num limiar próximo a 0,40 de *fitness* nos dois sistemas. As distribuições dos *fitness* finais, nesse caso, tenderam a ser uniformes a partir desse valor, com um número em torno de 25 firmas por *bin* contidas na área que vai do limiar até o *fitness* máximo de 1. Essa simulação foi chamada de o **cenário mais provável**.

A situação menos desejada é aquela em que a mudança técnica das firmas se correlaciona negativamente e bidirecionalmente com a adaptação ecológica. Ou seja, quando as duas caminham em sentidos contrários, criando restrições umas as outras. Nesse caso a distribuição é uniforme partindo da origem até o valor de máximo *fitness*. Ambos os sistemas não evoluem, o que caracteriza esse **cenário** como **desfavorável**.

Neste contexto, verificou-se que a dinâmica evolutiva contida no modelo Bak-Sneppen contribuiu para descrever de *maneira* complexa as relações entre o progresso técnico e as mudanças climáticas, pois apresentou a dinâmica ao longo do tempo e o

estado final para onde caminham o sistema econômico e o ecossistema, dado as regras relacionais adotadas *a priori*.

Não obstante, diversas extensões (sugestões de trabalhos futuros) podem ser derivadas do presente trabalho, que se apresentam de maneira pertinente: uma possibilidade seria a incorporação da dinâmica do modelo Bak-Sneppen como mecanismo indutor da mudança técnica das firmas, assim poderiam ser geradas séries de dados que seriam comparados com a realidade dos fatos estilizados do crescimento econômico. Ademais, se poderiam formalizar equações relacionais entre crescimento e degradação ambiental, testando assim, estaticamente as propriedades dessas séries.

Ademais, uma possibilidade poderia ser adequar o modelo às sugestões teóricas vigentes impondo que o *fitness* tecnológico só mude a firma melhorar seu fator tecnológico. Não obstante, poder-se-ia utilizar a técnica de mapas acoplados da física para fazer um diagrama de mapas em que a variável tecnológica flutua caoticamente pela ecológica.

Outra possibilidade imediata seria testar a hipótese de obsolescência programada da tecnologia de bens de consumo e sua relação com o aumento/diminuição da adaptação ecológica dos agentes.

Enfim, a presente pesquisa foi um primeiro passo para estudar as possíveis aplicações de sistemas complexos na ciência econômica, aplicações essas que são muitas, além de pertinentes para entender a dinâmica que envolve as economias capitalistas.

## 7 REFERÊNCIAS

ABRAMOVAY, R. Desenvolvimento Sustentável: Qual a estratégia para o Brasil. Texto para Discussão. Disponível em: <[http://www.abramovay.pro.br/artigos\\_cientificos.htm](http://www.abramovay.pro.br/artigos_cientificos.htm)>. Acesso em 03 de Janeiro de 2012.

AHMAD, S, “*On the Theory of Induced Invention,*” *Economic Journal* LXXVI, (1966), 344-357.

ATKINSON, A. B.; STIGLITZ. J. *A New View of Technological Change.* *Economic Journal.* 79, Sept. 1969, 573-578

BAK, ET. AL. Evolution as a Self-Organized Critical Phenomenon. *Proc. Nat. Acad. Sci. Washington* v.92, n.11, p.5209-5213, Maio 1995.

BAK P.; SNEPPEN. K. A simple model of evolution. *Physical. Review. Letters.*, 71 (1993) 4083. 1993.

BAK, P. et al. Self-organized criticality: an explanation of 1/f noise. *Physic. Review. Letters.* 59, 381-384. 1987.

BAK, P. *How Nature Works*, Springer-Verlag, New York, 1996.

BATIMA, P. ET. AL.: Climate change impacts on environment. In: *Climate Change Impacts*, P. Batima and B. Bayasgalan, Eds., Admon publishing, Ulaanbaatar, 2010 59-115.

BERTALANFFY, L. von. *General System Theory – Foundations, development, applications.* New York: George Braziller, 1945.

BESSAT, F. A. Mudança climática entre ciência, desafios e decisões: olhar geográfico. *Revista Terra Livre* 19 (1) nº 20. 2003.

BRADFORD, D.F.; ET. AL. The environmental Kuznets curve: exploring a fresh specification. *B.E. Journal in Economic Analysis & Policy*, n.4. 2005, p.1-28. Millimet, D.; List, J.; Stengos, S. *The Environmental Kuznets Curve: Real Progress or Misspecified Models?*, *The Review of Economics and Statistics*, MIT Press, vol. 85(4), 2003, pages 1038-1047, 09.

BROWN, C.; MEEKS, R.; YU, W. Hydroclimatic risk to economic growth in Sub Saharan Africa. Technical Report 08-03. *Water and Growth Report.* University of Massachusetts, 2008. Disponível em <<http://water.columbia.edu/files/2011/11/BrownIRIReport2008-03.pdf>> Acesso em 19 de agosto de 2011.

CAPRA, F. *A Teia da Vida.* São Paulo: Cultrix, 2006.

CAPRA, F. *As Conexões Ocultas.* São Paulo: Cultrix. 2003.



CAPRA, F. *O ponto de mutação*. São Paulo: Cultrix, 1982.

CARVALHO, T. S.; ALMEIDA, E. A hipótese da curva de Kuznets ambiental global: uma perspectiva econométrico-espacial. *Estudos Econômicos*, v.40, n.3, p.587-505. Julho-setembro de 2010.

CHRISTENSEN, K., Donangelo R., Koiller B. and Sneppen K., *Phys. Rev. Lett.*, 81 2380. 1998

CIALINI, C. Economic growth and environmental quality An econometric and a decomposition analysis, *Management of Environmental Quality: An International Journal* Vol. 18 No. 5, 2007 pp. 568-577, Emerald

COLE, M. A. Trade, the pollution haven hypothesis and the environmental Kuznets curve: examining the linkages. *Ecological Economics*, Birmingham, v. 48, p. 71-81, 2004.

CONTI ET. AL. Considerações sobre as Mudanças Climáticas Globais: *Revista do Departamento de Geografia*, São Paulo, vol. 16, p.70-75, 2005.

COSTA. T. V.M., *Mudanças Climáticas: uma questão de geopolítica*. Texto para Discussão-CEPEAC. Upf. Disponível em: <[http://www.upf.br/cepeac/index.php?option=com\\_content&task=view&id=15&Itemid=17](http://www.upf.br/cepeac/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=17)>

COURNOT, A. *Recherches sur les Principes Mathématiques de la Théorie de la Richesses* (Gérard Jorland, Ed.). Paris: Vrin. 1980: 1838.

DOMAR, E. O. "Capital Expansion, Rate of Growth and Employment", *Econometrica*, nº. 14, abril. 1946.

DRANDAKIS, E. M.; PHELPS, E. S. *A model of induced invention, growth, and distribution*. *Economic Journal*, 76, 823-40. 1966.

DUMMÉNIL, G.; LÉVY, D. A stochastic model of technical change, application to the US. Economy (1869-1989), *Metroeconomica*, 46(3): 213-245. (1995).

DUMMÉNIL, G.; LÉVY, D. A stochastic model of technical change, application to the US. Economy (1869-1989), *working Paper*, 46(3): 213-245. (2009).

DUMMÉNIL, G.; LÉVY, D. The Profit Rate: Where and how much did it fall? Did it Recover? (USA 1948-2000). *Review of Radical Political Economy*, 34: 437-461. (2002).

DUMMÉNIL, G. LEVY, Dominique. *Keynesian and Marxian macroeconomics: Toward a synthesis*. Texto para Discussão, 2011. Disponível em: <<http://www.jourdan.ens.fr/levy/>> acesso em 21 de dezembro de 2012.

- ELDREDGE, N. *The allopatric model and phylogeny in Paleozoic invertebrates*. Evolution 25:156–167. 1971
- FOLEY, D. K. *Unholy Trinity: Labor, capital, and land in the new economy*.. London: Routledge, 98 pages, index. 2003
- FOLEY, D. e MARQUETTI, A. Economic growth from a classical perspective. In: Joanelio Rodolpho Teixeira. (Org.). *Money, growth, distribution and structural change: contemporaneous analysis*, pp. 197-210. (1997).
- FOLEY, D. e MARQUETTI, A. Productivity, Employment and Growth in European Integration. *Metroeconomica*, 50: 277-300. (1999).
- FOLEY, D.K.; MICHL, T. *Growth and Distribution*. Cambridge: Harvard University Press. (1999).
- FUJIWARA, Y., AOYAMA, H., SOUMA, W. Growth off Firms and Networks, In: *Econphysics and Sociophysics: Trends and Perspectives*. Kolkatta: India, 2006.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, MA: Harvard University Press. 1999
- GERSHENSON, C.; HEYLIGHEN F. When Can we Call a System Self-organizing? In Banzhaf, W, T. Christaller, P. Dittrich, J. T. Kim, and J. Ziegler, *Advances in Artificial Life, 7th European Conference, ECAL 2003, Dortmund, Germany*, pp. 606-614. LNAI 2801.. 2003
- GIL, A. C. *Técnicas de pesquisa em economia e elaboração de monografias*. 4.ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- GOODWIN, R.M. A Growth Cycle. In: C.H. Feinstein (Ed.), *Socialism, Capitalism and Economic Growth: Essays Presented to Maurice Dobb*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 54-58. 1967.
- GOULD, S. J; ELDREDGE, N. *Punctuated equilibrium: the tempo and mode of Evolution reconsidered*. Paleobiology 3: 115–151. 1977.
- HAL R. VARIAN , *Microeconomic Analysis, Third Edition*. Campus: Rio de Janeiro. 1992.
- HARROD, R. F. “An Essay in Dynamic Theory”. *The Economic Journal*, nº XLIX, Março. (1939).
- HEINBERG, R. *Peak Everything: Waking up to a Century of Declines*. New Society Publishers, 2010.
- HICKS, J. R.. *Theory of Wages*. London: Macmillan. 1932.
- HUNT, E. K.; *História do pensamento econômico*. Petrópolis: Vozes, 1986.

SACHS, I. *Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável*. Gremaud: Rio de Janeiro. 2003

SACHS, I. *Desenvolvimento incluyente, sustentável e sustentado*. Gremaud: Rio de Janeiro. 2004.

SACHS, I. *Desenvolvimento incluyente, sustentável e sustentado*. Gremaud: Rio de Janeiro. 2004.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contributions to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers, Technical Summary and Frequently Asked Questions. 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2010: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contributions to the Five Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers and Technical Summary. 2010.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2011: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contributions to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers and Technical Summary. 2011.

JACKSON, T. *Prosperity without Growth: Economics for a Finite Planet* Earthscan, London 2009.

JENSEN, H. J. *Self-Organized Criticality: Emergent Complex Behaviour in Physical and Biological Systems*, Cambridge Lecture Notes in Physics 10, Cambridge University Press. 1998.

JEVONS, W. S. A Teoria da Economia Política. In: *os economistas*. São Paulo: Abril Cultural, 1982: (1871).

KALDOR, N.. A Model of Economic Growth. *The Economic Journal*, 67 (268): 591-624. (1957).

KALDOR, Nicholas "Alternative Theories of Distribution", *Review of Economic Studies*, nº 2. 1956.

KAUFFMAN S. A. ; JOHNSON S. Coevolution to the edge of chaos: coupled fitness landscapes, poised states and coevolutionary avalanches. In *Art@ciuf Life ZZ* (Edited by Langton C. G., Taylor C., Farmer J. D. and Rasmussen S. pp. 325-370. Addison Wesley, Reading, MA. 1991.

KAUFFMAN, S. *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self Organization and Complexity*. Oxford. 2005.

- KAUFFMAN, S.A. *Applied Molecular Evolution*. Texto Discussão, Santa Fe Institute, 1991.
- KAUFFMAN, S.A. *At Home in the Universe*. London: Penguin. 1995.
- KENNEDY, C. *Induced bias in the theory of innovation and the theory of distribution*. The Economic Journal 74, 541-547. 1964.
- KENNEDY, C. *Samuelson on induced innovation*. Review of Economics and Statistics, vol. 48, pp. 442±4. 1966
- LEFF, E. Saber Ambiental. Petrópolis: Rio de Janeiro: Vozes, 2001a.
- LEFF, E. Epistemologia Ambiental. Petrópolis: Rio de Janeiro: Vozes, 2001b.
- LUCAS, R. E. On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics*, 22, p. 3-42, 1988.
- MALTHUS. T. Princípios de Economia Política: Abril Cultural, 1982.
- MANDELBROT, B.B.. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman and Company. 1982.
- MARQUETTI, A.A.; G., PICHARDO. Stylized Facts on Economic Growth and Climate Change: 1960-2006. Apresentação Seminário. Economia Cinco e Meia, Programa de Pós-Graduação em Economia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2011.
- MARSHALL, A. Princípios de Economia. In: *os economistas*. São Paulo: Abril Cultural, 1982:(1890).
- MARX, K. *O Capital*. São Paulo: Abril Cultural, 1982.
- MAS-COLELL, A., M WHINSTON, and J. GREEN, *Microeconomic Theory*, Oxford University Press. 1995.
- MICHEL, P.; G. ROTILLION: Desutility of Pollution and Endogenous Growth., *Environmental and Resource Economics*, 6, 279-300. 1996.
- MORIN, E., Saberes globais e saberes locais: *o olhar transdisciplinar*, Rio de Janeiro: Garamond. 2004.
- MORIN, Edgar. *Os sete saberes necessários à educação do futuro*. São Paulo: Cortez; Brasília: UNESCO, 2000.
- MUSU, I. Transitional dynamics to optimal sustainable growth. Nota di Lavoro 50.95, Fondazione ENI E. Mattei, Milan. 1995.

- NADAL, A. "Corn in NAFTA: Eight Years After." Montreal: North American Commission for Environmental Cooperation, 2010
- NELSON, R.R.; S.G. WINTER. *An Evolutionary Theory of Economic Change*, Cambridge, Mass: Harvard University Press 1990.
- NEUMANN, J. A Model of General Economic Equilibrium, translated by G. Morton. *Review of Economic Studies* 13.1:1-9. 1945.
- OLIVEIRA S. L. Tratado de metodologia científica. 3.ed. São Paulo: Pioneira Thompson Learning, 2002.
- PACZUSKI, ET. AL. *Field Theory for a Model of Self-Organized Criticality*. Europhys. Lettters. V.27, n.2 p.97:202. July. 1994.
- PIMENTEL, D. Environmental, Energetic, and Economic Comparisons of Organic and Conventional Farming Systems. BioScience. American Institute of Biological Sciences, 2005.
- PRADO, E.F,S. Economia, Complexidade e Dialética. Plêide: São Paulo, 2009. 165 p.
- PRADO, E. F. S. – Microeconomia Reducionista e Microeconomia Sistêmica. In: *Nova Economia*, vol. 16 (2), maio-agosto de 2006, p. 303-322.
- RICHARDSON, R. J.; PERES, J. A. de S. (Colab.). *Pesquisa social: métodos e técnicas*. 3.ed. São Paulo: Atlas, 1999.
- ROGERS P.; JALAL, K. F.; BOYD ,J.A. *An introduction to sustainable development*. Sterling VA: Earthscan, p. 251 2007.
- ROMER, D.. *Advanced Macroeconomics*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill. 2006.
- ROMER, P. Increasing returns and long-run growth. *Journal of Political Economy*, 94, p. 1002-1037, 1986.
- ROMER, P. M., SASAKI, Monotonically Decreasing Natural Resource Prices under Perfect Foresight." *Working Paper* no. 19. Rochester, N.Y.: Univ. Rochester, Center Econ. Res., 1985.
- ROSENZWEIG, C.; PARRY, M.L. Potential impacts of climate change on world food supply. *Nature* Vol. 367, 1994. p. 133-138.
- SALTER W. E.G., *Productivity and Technical Change*, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1966.
- SAMUELSON, P. A. A theory of induced innovation along Kennedy-Weizsacker lines. *Review of Economics and Statistics*, 47, 343-56. 1965.
- SCHELLING, T. C. *Micromotives and macrobehavior*. New York: W. W. Norton, 1993.

SAHA, N ; DESAI, A. *Growth cycles with induced technical change*. Economic Journal, 91: 1006-10. 1982

SMIT, B., ET. AL., *An anatomy of adaptation to climate change and variability, Climatic Change*, Vol. 45, 2001 pages: 223–251.

SMIT, B., *The Science of Adaptation: A Framework for Assessment Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2003 4 (3-4) 199-213.

SMITH, A. *A riqueza das nações: investigação sobre sua natureza e suas causas*. São Paulo: Abril Cultural, 1982.

SMULDERS, S., and R. GRADUS, *Pollution abatement and long-term growth*, mirae9, Tilburg University. 1995.

SOLOW, R. M. “A Contribution to the Theory of Economic Growth”. *The Quarterly Journal of Economics*, nº LXX, fevereiro. 1956.

Sornette, D. – *Critical Phenomena in Natural Sciences – Chaos, Fractals, Self-organization and Disorder: Concepts and Tools*. Berlim: Springer-Verlag, 2004.

SRAFFA, P. *Production of Commodities by Means of Commodities: Prelude to a Critique of Economic Theory*. Cambridge University Press. (1960).

STOKEY, N. Are there limits to growth? *International Economic Review* 39 (1), 1.31. 1996.

The National Climate Change Adaptation Research Facility (NCCARF). *Statistical Reports*, 2012. Disponível em: < <http://www.nccarf.edu.au/>> Acesso em 21 de Dezembro de 2012.

TURNER, M.D. The Role of Social Networks, Indefinite Boundaries and Political Bargaining in Maintaining the Ecological and Economic Resilience of the Transhumance Systems of Sudano-Sahelian West Africa. In: *Managing Mobility in African Rangelands: The Legitimization of Transhumance*, M. Niamir-Fuller (ed.). London and Rome: Intermediate Technology Publications, Food and Agriculture Organization, and Beijer International Institute of Ecological Economics, 2011

VEIGA, José Eli. Indicadores de Sustentabilidade. *Estudos Avançados* nº 68, Jan.-Abr. de 2010.

VICTOR, P. Questioning economic growth. *Nature*, 468 2010, pp. 370–371.

WALRAS, M. *Compêndio dos Elementos de Economia Política Pura*. São Paulo: Abril Cultural 1982 (1874).

World Health Organization (WHO). *Global Health Risks Report, 2002* Disponível em: <

[http://www.who.int/healthinfo/global\\_burden\\_disease/global\\_health\\_risks/en/index.htm](http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/global_health_risks/en/index.htm)  
l> Acesso em 19 de Agosto de 2011.

World Health Organization (WHO). Global Health Risks Report, 2004 Disponível em:

<

[http://www.who.int/healthinfo/global\\_burden\\_disease/global\\_health\\_risks/en/index.htm](http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/global_health_risks/en/index.htm)  
l> Acesso em 19 de Agosto de 2011.

ZIPF, G.K. *Human Behavior and the Principle of Least Effort*. Cambridge, MA: Addison-Wesley. 1949.