UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ARTES, CIÊNCIAS E HUMANIDADES

FABRICIO GAVA DE ALMEIDA JORGE

**Redes Empresariais e Sustentabilidade: modelos baseados em agentes para análise da
difusão de estratégias no ambiente competitivo**

São Paulo
2014

FABRICIO GAVA DE ALMEIDA JORGE

**Redes Empresariais e Sustentabilidade: modelos baseados em agentes para análise da
difusão de estratégias no ambiente competitivo**

Versão original

Dissertação apresentada à Escola de Artes,
Ciências e Humanidades da Universidade
de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de Concentração: Modelagem de
Sistemas Complexos

Orientador: Prof. Dr. Carlos de Brito
Pereira

São Paulo
2014

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO

Biblioteca

Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo

Jorge, Fabricio Gava de Almeida

Redes empresariais e sustentabilidade : modelos baseados em agentes para análise da difusão de estratégias no ambiente competitivo / Fabricio Gava de Almeida Jorge ; orientador, Carlos de Brito Pereira. – São Paulo, 2014

71 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Modelagem de Sistemas Complexos, Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, em 2014

Versão original

1. Administração de empresas. 2. Administração de empresas – Aspectos ambientais. 3. Administração de empresas - Simulação. 4. Responsabilidade social - Simulação. 5. Estratégia organizacional. 6. Sustentabilidade. 7. Sistemas dinâmicos. I. Pereira, Carlos de Brito, orient. II. Título.

CDD 22.ed. – 658.408

Nome: JORGE, Fabricio Gava de Almeida

Título: Redes Empresariais e Sustentabilidade: modelos baseados em agentes para análise da difusão de estratégias no ambiente competitivo

Dissertação apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Modelagem de Sistemas Complexos

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Julgamento: _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Julgamento: _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Julgamento: _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

*Ao meu pai, José Augusto, alicerce
de todas as minhas conquistas.*

AGRADECIMENTOS

A pesquisa acadêmica não é feita apenas de referências e levantamento de dados. Além de necessitar de grande esforço e determinação próprios, ela só é possível com auxílio de diversas outras pessoas. Durante os 30 meses de trabalho que culminaram com a apresentação desse trabalho, precisei de ajuda em todos os instantes e, portanto, só posso creditar o êxito desse projeto a todas essas pessoas.

Agradeço a minha família, partícipes sempre atenciosos em todos os momentos da minha vida e que dividem comigo a conquista desse título. À minha mãe, Águida, pelo encorajamento acadêmico sempre presente e por me convencer a cursar o mestrado. Ao meu pai, José Augusto, por ter permitido que essa conquista fosse possível, me amparando em todos os momentos da minha vida. A minha irmã Célia, sempre pronta a me ouvir e a torcer pelas minhas conquistas.

À Amanda, companheira de todos os momentos, pela paciência durante a feitura desse trabalho e por todo o apoio necessário, mesmo nas horas mais difíceis. Compartilhamos juntos mais essa etapa de nossas vidas profissionais.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos de Brito Pereira, um exemplo acadêmico e profissional. Sem seu auxílio sempre pronto e as ótimas conversas, o título de mestre seria impossível e a minha passagem pela USP menos proveitosa.

Ao Prof. Dr. Fernando Ferreira, sempre solícito, que sempre me socorreu com a utilização do ferramental da área de sistemas complexos no desenvolvimento de meus objetivos acadêmicos.

À Prof. Dra. Flávia Mori, que nunca mediu esforços para fazer do Programa de Pós-Graduação em Modelagem de Sistemas Complexos uma referência na área, além de me auxiliar sempre que a ela recorri.

Ao Prof. Jorge Louçã, que me recebeu em visita ao ISCTE-IUL e, juntamente com sua equipe, me apresentou ideias valiosas empregadas na elaboração desta dissertação.

Aos colegas do Programa, profissionais que tive a honra de ter convivido durante pouco mais de dois anos. Sem a ajuda mútua a determinação de todos, as disciplinas cursadas não teriam sido tão exitosas.

À Secretaria de Pós-Graduação da EACH, em especial à Jussara e Vanessa, que, sempre atenciosas, me auxiliaram todas as vezes que a elas recorri.

À Biblioteca da EACH, em especial à Maria Fátima, que me auxiliou na adequação do presente trabalho às normas técnicas com extrema presteza.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que proveu o auxílio financeiro para a condução dessa pesquisa.

À Universidade de São Paulo (USP), em especial à Escola de Artes Ciências e Humanidades (EACH) e à Pró-Reitoria de Pós Graduação, que, além de ter fornecido todos os meios para feitura do presente trabalho, financiou a etapa do desenvolvimento da pesquisa no ISCTE-IUL, Lisboa.

*Você não sente nem vê
Mas eu não posso deixar de dizer, meu amigo
Que uma nova mudança em breve vai acontecer
E o que há algum tempo era jovem novo
Hoje é antigo, e precisamos todos rejuvenescer*

Belchior

RESUMO

JORGE, Fabricio Gava de Almeida. **Redes empresariais e sustentabilidade: modelos baseados em agentes para análise da difusão de estratégias no ambiente competitivo**. 2014. 71 f. Dissertação de Mestrado em Ciências – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Com a divulgação dos efeitos antrópicos sobre o clima nos últimos anos, nota-se um adensamento no debate acerca da incorporação da temática socioambiental na agenda corporativa. Embora as externalidades ambientais da atividade produtiva sejam conhecidas desde o início da Revolução Industrial, os processos de elaboração e implementação de estratégias empresariais de sustentabilidade ainda é algo em desenvolvimento. O presente trabalho visa analisar a dinâmica da difusão de estratégias de sustentabilidade em redes empresariais através de modelos de sistemas sociais complexos. Para tanto, são analisados alguns modelos consolidados na literatura, como o modelo de Ising (1925), Barabási-Albert (1999) e Ito e Kaneko (2002). Tal análise subsidia a criação de um modelo específico, cujos resultados de sua simulação são utilizados para gerar hipóteses que alicerceiam a elaboração de cenários prospectivos, pautando-se no referencial de Berger (1959) e Godet (2008). Por fim, tais cenários apresentam possíveis realidades futuras quanto à emergência de um setor produtivo mais sustentável, auxiliando no planejamento de empresas e governos.

Palavras-chave: Estratégia empresarial. Difusão de estratégias. Sustentabilidade. Sistemas complexos. Redes complexas. Modelagem de sistemas complexos. Redes empresariais.

ABSTRACT

JORGE, Fabricio Gava de Almeida. **Business Networks and Sustainability**: agent-based models for analysis of strategies' diffusion in the competitive environment. 2014. 71 f. Dissertação de Mestrado em Ciências – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

With the disclosure of anthropogenic impacts on climate in recent years, there has been a growing debate about the incorporation of environmental issues on the corporate agenda. Although the environmental externalities of productive activity are known since the beginning of the Industrial Revolution, the processes of development and implementation of corporate sustainability strategies are still under development. The present work analyzes the dynamics of the diffusion of sustainability strategies on enterprise networks through models of complex social systems. Hence, we analyze three well known models: Ising (1925), Barabási-Albert (1999) and Ito and Kaneko (2002). This analysis underpins the creation of a specific model, which results are used to generate hypotheses that support the development of prospective scenarios, based on Berger (1959) and Godet (2008). Finally, these scenarios present possible future realities for the emergence of a sustainable productive sector, assisting in the planning of businesses and governments.

Keywords: Business strategy. Diffusion of strategies. Sustainability. Complex systems. Complex networks. Modeling of complex systems. Business networks.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 SUSTENTABILIDADE E ESTRATÉGIA EMPRESARIAL.....	14
2.1 A INFLUÊNCIA DOS <i>STAKEHOLDERS</i>	15
3 A PROSPECTIVA ESTRATÉGICA	18
3.1 ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS PROSPECTIVOS	19
4 SISTEMAS COMPLEXOS	22
4.1 REDES COMPLEXAS.....	25
4.1.1 <i>Redes Regulares</i>	27
4.1.2 <i>Redes Aleatórias</i>	28
4.1.3 <i>Redes de mundo-pequeno</i>	29
4.1.4 <i>Redes livres de escala</i>	31
5 A UTILIZAÇÃO DE MODELOS DE SISTEMAS SOCIAIS COMPLEXOS	33
6 O MODELO.....	40
6.1 O MODELO DE ISING	41
6.2 O MODELO DE BARABÁSI-ALBERT.....	44
6.3 O MODELO DE ITO E KANEKO	45
7 RESULTADOS.....	48
7.1 ETAPA 1 –MODELO INICIAL BASEADO EM ISING	48
7.2 ETAPA 2 – UTLIZAÇÃO DE REDE LIVRE DE ESCALA.....	53
7.3 ETAPA 3 – UTILIZAÇÃO DE INTENSIDADES DE INTERAÇÃO VARIÁVEIS.....	58
8 CENÁRIOS PARA A ADOÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE SUSTENTABILIDADE... 61	61
8.1 CENÁRIO A.....	61
8.2 CENÁRIO B	62
8.3 CENÁRIO C	63
8.4 CENÁRIO D	64
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Antes vistos como casos excepcionais, os efeitos ambientais que o crescimento econômico produz estão sendo revistos e mudanças nos sistemas produtivos tornam-se imperativas. De um lado, a intensificação do crescimento encontra limites físicos impostos pelo rareamento dos recursos naturais; de outro, hoje se sabe que os resíduos originados pelos processos produtivos detêm impactos perversos sobre o sistema natural, ocasionando mudanças climáticas que podem alterar a própria organização da humanidade e de seu modo de produção.

Embora muito dos impactos socioambientais da atividade empresária sejam conhecidos desde o início da revolução industrial, o tema ingressou na agenda corporativa muito recentemente. Desde a publicação do relatório Stern em 2006, muitas empresas passaram a envidar esforços com vistas à mitigação de impactos socioambientais. Ainda que motivadas por inúmeros motivos (como mitigação de riscos de imagem, atração de novos investidores ou pressão de fundos de investimento) tais esforços passam a ser difundidos em diversas empresas de forma muito semelhante a um “contágio”. Quando uma grande empresa passa a implementar estratégias de mitigação de impactos socioambientais, passa a pressionar em certa medida toda sua rede a mudar sua postura quanto à temática.

Destarte, o entendimento dessa dinâmica faz-se necessário às empresas e ao governo para que suas atuações no ambiente competitivo tornem-se frutíferas. Ao governo interessa compreender como e quanto deve intervir no setor produtivo para que esse detenha baixos impactos socioambientais. O tema é notadamente relevante no Brasil, visto que a sustentabilidade deixou de ser um clamor exclusivo dos países desenvolvidos e passou a ocupar a agenda de países emergentes que, como no caso do Brasil, passaram a perceber que os problemas sociais e ambientais são problemas de proporções globais, transfronteiriços, e que requerem esforços conjuntos para serem tratados (JAMALI, 2010). Não obstante, o Brasil ainda possui um parque industrial não tão desenvolvido, problemas para assegurar sua competitividade internacional e dispõe de limitados recursos para investir em mitigação de impactos socioambientais.

Já as empresas demonstram a necessidade de entender a dinâmica da difusão de estratégias de sustentabilidade no ambiente competitivo para planejar seus esforços de modo a garantir sua competitividade e a aderência ao seu planejamento estratégico. Tal necessidade torna-se mais premente no ambiente competitivo hodierno, denotado por constantes mudanças

e cujas tendências são propensas a reviravoltas. Destarte, para uma empresa que aspira ter uma estratégia flexível, reagindo agilmente às forças da mudança ou de manter o curso, é fundamental envidar esforços na previsão da difusão desse tipo de estratégia em sua rede.

Aliando o ferramental metodológico apresentado pelos estudos da prospectiva para estudar o futuro com modelos complexos de sistemas sociais baseados em agentes, é possível tecer hipóteses futuras para a emergência de estratégias de sustentabilidade no ambiente competitivo, indo além de previsões realizadas pela extrapolação matemática ou através da econometria clássica.

Nesse sentido, o ferramental proporcionado pelo desenvolvimento da modelagem de sistemas complexos, mormente de redes complexas, traz ingente subsídio ao estudo de sistemas sociais, impregnados de imprevisibilidade, auto-organização e cuja dinâmica pode ser dividida em diferentes níveis de análise. A utilização de modelos computacionais para a compreensão de sistemas sociais complexos abre novas fronteiras para exploração, pois os limites usuais das ferramentas tradicionais podem ser facilmente superadas, como a necessidade de manter todo o modelo matematicamente tratável (MILLER; PAGE, 2007). Ademais, tal ferramental permite manter uma perspectiva ampla sobre os múltiplos fatores interligados, que são necessários para compreender problemas sociais.

O presente estudo, portanto, objetiva demonstrar a proficuidade da utilização de tal ferramental para embasamento de um processo de prospecção de cenários alicerçado nos trabalhos de Berger, Godet e Schwartz, auxiliando no desenvolvimento do estudo da sustentabilidade empresarial, principalmente na tentativa de responder quais as principais variáveis que impactam na capacidade de auto-organização do empresariado com vistas à mitigação de seus impactos socioambientais.

Para tanto, parte-se da discussão da introdução do tema socioambiental na agenda das empresas, evidenciando os diferentes aspectos da implementação de estratégias de sustentabilidade, como seus *drivers* e resultados esperados. Ademais, a apresentação da prospectiva estratégica e seus princípios norteadores alicerçam a metodologia empregada no presente estudo, delineando as bases para a prospecção de cenários a partir dos resultados gerados. Da mesma forma, são apresentados os principais conceitos da área de sistemas complexos, mormente o processo de modelagem e as principais características exibidas por sistemas caracterizados como complexos. Não obstante, ainda é apresentada a discussão sobre a utilização do ferramental de modelagem de sistemas complexos para a análise de sistemas sociais.

Tal ferramental é utilizado então para descrever e analisar a dinâmica do comportamento das empresas em um ambiente competitivo hipotético, simulando tal interação segundo diferentes variáveis. Para tanto, são analisados alguns modelos aplicados ao estudo de sistemas sociais, como o modelo de Ising (1925), de Barabási-Albert (1999) e Ito e Kaneko (2002), que embasam a construção de um modelo voltado especificamente ao objeto de estudo, apresentado em diferentes etapas de modelagem. Por fim, os resultados das simulações são apresentados e discutidos, gerando hipóteses que são utilizadas para a elaboração de cenários prospectivos.

2 SUSTENTABILIDADE E ESTRATÉGIA EMPRESARIAL

Embora as preocupações com externalidades socioambientais negativas sejam antigas, o debate começou a deter uma nova perspectiva nos últimos anos. Antes analisada através de questões pontuais, a temática ambiental passou a ser vista de uma forma sistêmica, englobada na ideia de desenvolvimento sustentável. Tal conceito refere-se à ideia de continuidade de desenvolvimento econômico e social sem prejuízo ao meio ambiente e aos recursos naturais essenciais à sobrevivência humana.

Tal debate foi adensado após a divulgação do relatório Stern, em 2006, que versou sobre os impactos econômicos das mudanças climáticas, e do relatório do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) em 2007, que apresentou evidências científicas da natureza antrópica de tais mudanças. Embora o aquecimento global não seja o único desafio ambiental contemporâneo, talvez possa ser considerado o mais urgente (KLEIN, 2012), além de ter colocado o tema ambiental em destaque.

O acentuado debate acerca da temática socioambiental nas últimas décadas é um sintoma da necessidade das empresas integrarem as questões socioambientais às suas estratégias de negócios. Essa necessidade é percebida desde meados do século passado, quando se passou a disseminar a visão de que o escopo de atuação das empresas deve ir além da geração e maximização de lucros, uma vez que suas ações e decisões repercutem efeitos sobre toda a sociedade (BORGER, 2009).

As estratégias elaboradas iniciam-se pela busca de uma política de sustentabilidade intimamente relacionada à natureza do negócio em pauta (PORTER; KRAMER, 2006). Assim, o tema passou a ser incorporado à agenda do setor produtivo de diferentes formas, como a manutenção de fundações de ensino, o auxílio a entidades filantrópicas, o desenvolvimento de produtos e serviços de cunho sustentável, o investimento em energias renováveis, a promoção de incentivos a investimentos éticos, entre outras.

A proposição de medidas para o endereçamento dessas questões socioambientais também é condicionada pelo setor produtivo em que a empresa se quadra e por diferentes cenários futuros traçados por organizações como o IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Em indústrias, por exemplo, as iniciativas mais proeminentes são voltadas à ecoeficiência, visto que suas emissões de gases de efeito estufa são consideráveis e tais esforços detêm grande potencial de exibirem retornos financeiros, através da diminuição do uso de certos materiais no processo fabril ou na mitigação de riscos. No setor de serviços, a

questão sustentável não se relaciona com iniciativas de ecoeficiência, mas ao seu papel de indutor de mudanças no empresariado e no sistema produtivo, considerando sua influência nas empresas de outros setores.

O desafio que se posta ao empresariado é internalizar o conceito de desenvolvimento sustentável à sua própria visão e as suas estratégias, “passando a adotar critérios socioambientais, além dos econômico-financeiros, nos processos de tomada de decisão no âmbito dos negócios” (MATTAROZZI; TRUNKL, 2008, p. 19). Mais além, é conseguir enxergar seus clientes sob esse novo prisma, identificando riscos e oportunidades socioambientais, e incentivá-los a uma gestão mais sustentável.

Assim, ainda que possa haver incremento de custos na elaboração dos projetos em novos moldes, as empresas podem se beneficiar das vantagens competitivas advindas de investimentos em medidas socioambientais no médio e longo prazo (PORTER; van der LINDE, 1995; BRANCO; RODRIGUES, 2006). Havendo maior exigência do ambiente de negócios, o tema passa a relacionar-se mais intimamente com a própria perenidade da empresa.

O caso do setor financeiro é especialmente didático para evidenciar o efeito que determinadas empresas (ou outros *stakeholders*) podem deter sobre todo o sistema produtivo, principalmente em relação à análise de impactos socioambientais no financiamento de projetos (RICHARDSON, 2009). O fato de um projeto financiado por um banco apresentar elevado passivo ambiental implica na responsabilização do banco quanto aos prejuízos causados pelos tomadores do empréstimo à sociedade e ao meio ambiente (PORTO, 2010). Assim, a recusa em financiar atividades ou projetos que apresentam significativa degradação socioambiental permite significativa redução de riscos de imagem, além do risco do empreendimento tornar-se insolvente devido a sua inadequação à legislação vigente.

Assim, havendo maior pressão das instituições financeiras na concessão de crédito por questões socioambientais, outras empresas em sua rede passam a adotar estratégias de sustentabilidade da expectativa de conseguir crédito mais fácil, menores taxas ou mais investidores.

2.1 A INFLUÊNCIA DOS *STAKEHOLDERS*

Os *stakeholders* são os grupos interessados nas atividades desempenhadas por uma empresa, porque impactam nessas atividades ou são impactados por elas, com maior ou menor

intensidade. Ou seja, empresas e *stakeholders* são interdependentes, havendo um complexo jogo de interesses entre as partes. Esse jogo de interesses deve ser gerido com base no reconhecimento de valores, direitos e interesses das partes, buscando-se o equilíbrio entre elas (BORGER, 2009).

Diante da multiplicidade de *stakeholders* e da diversidade de suas demandas, além da necessidade de sua identificação, as empresas precisam priorizar quais demandas de quais grupos serão atendidas. Essa decisão é fundamentalmente estratégica, pois o atendimento ou não das demandas de certos grupos pode ser determinante para o sucesso ou insucesso de uma empresa que busque legitimação no meio social. Isso decorre do poder que esses grupos possuem para pressionar a empresa em uma direção diferente caso não vejam suas expectativas contempladas (BORGER, 2009).

Dessa forma, pode-se inferir que a incorporação da sustentabilidade à estratégia empresarial é ditada por seus *stakeholders* e pelas demandas eles levam à organização (FREEMAN apud BORGER, 2009). À tais demandas devem ser atribuídas prioridades conforme proposto por Porter e Kramer (2006): a) mais genéricas e que não são diretamente impactadas pelas operações da empresa; b) diretamente impactadas pelas operações da empresa; ou c) que afetam a competitividade da empresa no local de sua atuação. Cada temática terá relevância tanto mais estratégica quanto maior for o impacto que exerça sobre a competitividade da empresa.

Alguns grupos de *stakeholders* que podem ser mencionados são os funcionários, os consumidores, as organizações da comunidade local (ONGs, sindicatos e grupos ambientalistas, por exemplo), os proprietários, o Estado, os fornecedores, os concorrentes e a própria mídia (BARBIERI; CAJAZEIRA, 2009). Mas há, também, outros grupos que poderão exercer maior ou menor pressão acerca de questões específicas relacionadas a determinados tipos de empresas. Empresas com fortes impactos ambientais, por exemplo, sofrerão pressões de órgãos reguladores, consumidores, investidores, ONGs, credores, seguradoras, funcionários e formuladores de políticas públicas, para que atuem de forma mais responsável com relação ao planeta. Assim, os interesses do próprio planeta se veem representados por cada um desses *stakeholders* (STEAD, J. G.; STEAD, E., 2000) com seus interesses específicos.

Ainda que a influência da demandas de cada grupo sobre diferentes empresas seja muito variável, todas elas passaram a sofrer pressão para reduzir seus impactos

socioambientais (KLEIN, 2012), bem como divulga-los juntamente aos seus relatórios financeiros.

Em 1999, 35% das 250 maiores empresas globais elaboravam relatórios de sustentabilidade e outros 32% publicavam outro tipo de informação ambiental. (KOLK; WALHAIN; van der WATERINGEN, 2001). Atualmente, 95% dessas empresas já incluíram a divulgação de relatório não-financeiro em sua rotina (KPMG, 2011).

Esse fenômeno ocorre, em grande parte, pela pressão de investidores e credores sobre as empresas, visto que o posicionamento corporativo socioambiental reflete diretamente no desenvolvimento dos negócios a longo prazo. Além disso, empresas engajadas no mote sustentável também passam efetuar grandes mudanças em suas cadeias de suprimento, pressionando fornecedores e parceiros a reduzirem seus impactos socioambientais e investir em produtos mais sustentáveis (CETINKAYA, 2011). Pode-se inferir, portanto, que o ambiente de mercado tem se alterado em prol da sustentabilidade, que passa a ser exigida das empresas para continuarem competitivas.

3 A PROSPECTIVA ESTRATÉGICA

Em um ambiente competitivo onde as mudanças ocorrem de forma mais lenta e minimamente previsível, o planejamento pode ser constituído de formulações gerais e intuitivas do futuro. Ao passo que o ambiente competitivo torna-se mais complicado, com mudanças rápidas ou abruptas, as incertezas em relação ao futuro aumentam, o que faz necessária a utilização de metodologias e ferramentas para antecipação do futuro.

A expressão “prospectiva” foi apresentada por Gaston Berger em 1950, englobando a ideia de que o futuro não é simplesmente resultante do passado, mas essencialmente diferente do presente. Para Berger essa diferença se faz pois as consequências das ações cometidas no presente poderão ter impacto global que extrapola o contexto em que foi iniciada.

Moura (1994, p. 102) define prospectiva como uma “área do saber que engloba todas as formas de pesquisar o futuro, desde a simples extrapolação [...] até as utopias”. Segundo Godet e Berger, a prospectiva é uma filosofia normativa que debruça-se sobre futuros desejáveis, bem como os possíveis. Essa filosofia, portanto, permite que uma organização construa o seu próprio futuro desejado, ao tempo que prepara-se para os possíveis.

Para Godet (2008), a prospectiva é uma síntese global, reconciliando fenômenos interdependentes. O objetivo da prospectiva, segundo o autor, é prever as consequências das ações atuais e analisar como tais consequências podem repercutir nos vários domínios de atividade. Segundo o autor, a prospectiva provê a tomadores de decisão a oportunidade de transformarem suas visões em realidade através de ações específicas orientadas a um objetivo.

Segundo Massé (1959 apud GODET, 2008), a prospectiva permite a uma organização determinar os futuros possíveis e avaliá-los qualitativa e quantitativamente. Nos casos em que os futuros mais prováveis incluem elementos desfavoráveis, o papel da prospectiva é determinar quais estratégias irão eliminar ou minimizar esses elementos desfavoráveis.

Berger (1959) ainda argumenta que antecipar todos os possíveis futuros é inútil. O importante é antecipar o que aconteceria se não fosse feito nada para mudar o curso do futuro para, então, determinar o que seria necessário para provocar o futuro desejado. O objetivo, portanto, não é observar o futuro a partir do presente, mas observar o presente em função do futuro. Essa retrospectiva virtual permite que escolhas mais eficazes sejam feitas no presente considerando-se os objetivos finais. A prospectiva, portanto, permite conciliar os fins com os meios, bem como a situação atual e as possibilidades de escolha que proporciona (BERGER, 1959).

Segundo Massini (apud MOURA, 1994, p. 107), os estudos sobre o futuro são, ao mesmo tempo, uma necessidade, uma escolha e uma maneira de pensar. É uma necessidade em tempos de mudança acelerada, uma escolha em relação a decisões e caminhos alternativos e uma maneira de pensar sobre a vida e os objetivos humanos.

Destarte, os autores inferem que não há lugar para métodos determinísticos, que simplesmente analisam comportamento como o conjunto de rotina independentes. Para que seja possível realmente entender as variáveis determinantes do futuro, são necessários métodos suficientemente sofisticados que considerem a interdependência de tais variáveis.

Já em 1959, Berger considerava que os métodos clássicos de estratégia e tomada de decisão baseadas principalmente em extrapolação matemática e experiência passadas eram ineficientes. A antecipação do futuro através de eventos passados é ineficiente pois assume que os fenômenos em estudo permanecerão estáticos. Para Godet (2008), nós não podemos nos dar o luxo de tecer esse tipo de hipótese em um mundo de mudanças tão rápidas. A ação retrospectiva, portanto, não é mais considerada adequada para a resolução dos problemas contemporâneos.

Apesar do valor dado ao futuro nas obras sobre a prospectiva, os autores não diminuem o valor da história no processo de tomada de decisão. História e prospectiva tem muito em comum, visto que as duas lidam com fatos potenciais. A análise do passado apresenta as variáveis imutáveis para o objeto de estudo, ao passo que exhibe tendências que poderão ser úteis na formulação de hipóteses e diretrizes.

3.1 ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS PROSPECTIVOS

Dentre os estudos prospectivos, a elaboração de cenários é a técnica mais utilizada na tratativa de eventos e processos incertos, apoiando a decisão sobre escolhas estratégicas. A elaboração de cenários, portanto, tem sido cada vez mais utilizada para preparar organizações a competir em um ambiente permeado de riscos e incertezas.

Godet et al. (2000, p. 19) definem cenário como “um conjunto formado pela descrição de uma situação futura e do encaminhamento dos acontecimentos que permitem passar da situação de origem a essa situação futura”.

Já para Porter (1989, apud BUARQUE, 2003, p. 22), um cenário é uma “visão internamente consistente da realidade futura, baseada em um conjunto de suposições plausíveis sobre as incertezas importantes que podem influenciar o objeto”.

Van Der Heijden (1996, apud BUARQUE, 2003, p. 22) ainda expõe que cenários constituem um conjunto de futuros razoavelmente plausíveis, mas estruturalmente diferentes, concebidos por meio de um processo de reflexão mais causal que probabilístico, usado como meio para a reflexão e a formulação de estratégias para atuar nos modelos de futuros.

De forma similar, Kahn (apud GODET, 2008, p. 31) apresenta cenário como “[a set of] hypothetical events set in the future constructed to clarify a possible chain of causal events as well as their decision points”.

Destarte, um cenário é uma descrição de um futuro possível que assume a ocorrência de uma série de eventos ou condições entre o tempo da situação original e do tempo em que o cenário está definido. A elaboração de cenários objetiva construir possíveis representações do futuro, assim como os meios para atingir objetivos estratégicos. A meta dessas representações é revelar tendências predominantes e possíveis rupturas no ambiente competitivo.

A literatura ainda apresenta dois tipos principais de cenários, os exploratórios e os normativos.

Os cenários exploratórios visam explorar tendências passadas ou presentes que podem levar a futuros possíveis, desconsiderando valores e desejos dos formuladores na descrição de futuros. Segundo Godet (2008), eles são construídos a partir do presente e descrevem situações futuras através da extrapolação de certas tendências, também considerando possíveis rupturas (DATAR, 1975, apud GODET, 2008, p. 48). Esse tipo de cenário, portanto, permite que sua desconstrução possa ser realizada para rastrear a cadeia lógica de eventos que origina determinado futuro possível.

Já os cenários normativos apresentam imagens alternativas de futuros desejáveis, concebidas de maneira retro-projetiva. O propósito desse tipo de cenário é evidenciar como certos objetivos podem ser alcançados e quais os caminhos necessários para tal. Os cenários normativos devem ser plausíveis e viáveis, “não apenas a representação de uma vontade ou de uma esperança” (BUARQUE, 2003, p. 23). Esses cenários geralmente são criados em relação aos cenários exploratórios, descrevendo o desejo da organização ou como uma síntese dos cenários exploratórios (GODET, 2008).

A elaboração de cenários, portanto, objetiva “analisar e sistematizar as diversas probabilidades dos eventos e dos processos por meio da exploração dos pontos de mudança e das grandes tendências, de modo que as alternativas mais prováveis sejam antecipadas” (BUARQUE, 2003, p. 21). Com a antecipação de possíveis futuros, os cenários permitem que

as organizações possam envidar esforços para otimizar resultados e favorecer a construção do futuro desejado.

Contudo, para que seja possível a apresentação de alternativas futuras plausíveis, a elaboração de cenários deve obedecer a requisitos metodológicos. Para Godet (2008, p. 31), um conjunto de hipóteses só pode ser considerado como um cenário prospectivo se satisfazer cinco condições principais: pertinência, coerência, verossimilhança, importância e transparência. Ou seja, para que uma combinação de hipóteses possa ser chamada de cenário, é necessário que sejam formuladas hipóteses adequadas e a coerência e a verossimilhança das possíveis combinações sejam analisadas.

Buarque (2003, p. 21) salienta ainda a necessidade de analisar todos os elementos e eventos que levam a determinado acontecimento futuro, bem como suas “implicações sobre o conjunto das variáveis centrais que determinam a realidade”. O autor argumenta que tal condição é satisfeita se o estudo conta com um “referencial teórico de interpretação – variáveis centrais de relação de causa e efeito – com uma base de informações sólida e atualizadas e, finalmente, com instrumentos técnicos para organizar e tratar a multiplicidade de informações” (BUARQUE, 2003, p. 21).

Os aspectos metodológicos sobre a utilização de modelagem de sistemas complexos para a elaboração de cenários prospectivos serão discutidos em maior profundidade em capítulo posterior.

4 SISTEMAS COMPLEXOS

Embora o termo “complexo” possa definido como “falta de clareza, obscuro; difícil de compreender”, sua origem parte da palavra latina *complecti*, significando “cercar, abarcar, compreender” (HOUAISS, 2009). Ainda que a acepção apresentada possa referir-se às incertezas naturais que o alvorecer de uma nova área do conhecimento apresenta, mais elucidativo é definir complexo como “[...] conjunto, tomado como um todo mais ou menos coerente, cujos componentes funcionam entre si em numerosas relações de interdependência ou de subordinação [...]” (HOUAISS, 2009).

De forma semelhante, não há consenso bem definido sobre o que são “sistemas complexos” ou como quantificar o grau de complexidade de um sistema. Todavia, Mitchell (2009) nota que uma característica essencial em todo o alvorecer de uma nova ciência é a dificuldade de definir seus temas centrais.

Bak (1996, p. 4-7) simplifica o conceito de complexidade definindo-o como variabilidade. Assim, um sistema poderia ser considerado como complexo quando apresenta grande variabilidade, em diferentes escalas, em todos os seus níveis de magnificação. Nessa visão, um sistema complexo poderia ser visto como uma boneca russa (*matryoshka*), para cada camada que retiramos, novas surpresas são descobertas. Assim, a variabilidade de uma camada interior origina a camada mais exterior de forma sucessiva, através de simples leis invariáveis, como as leis da física.

Mitchell (2009, p. 13) define como complexo um sistema em que uma grande rede de componentes que seguem regras de operação relativamente simples sem que haja um controle central origina um comportamento coletivo complexo, processamento sofisticado de informação e adaptação através de aprendizagem ou evolução.

Para Miller e Page (2007, p. 9), um sistema complexo é composto por agentes capazes de processar informação e interagir entre si, sendo que a dependência entre eles é vital para a existência do sistema. Assim, a remoção de um elemento destrói o comportamento do sistema em um grau muito diferente do que é representado por tal elemento.

De maneira geral, os estudos em complexidade são realizados através de diferentes áreas do saber e objetivam entender como um grande número de entidades relativamente simples pode originar comportamento emergente auto-organizado e não trivial. Tais pesquisas, portanto, desafiam a noção de que o entendimento de um sistema é possível através da análise de suas partes constituintes isoladamente, sugerida pela lógica cartesiana.

Grande parte do esforço em definir os temas centrais da complexidade volta-se a definir as propriedades comuns que sistemas ditos complexos exibem. Tal intento dirige-nos a uma melhor definição de complexidade e nos aproxima de uma maneira de classificar sistemas de acordo com o seu grau de complexidade. Não obstante, evidenciar as características inatas de sistemas tidos como complexos também nos auxilia a melhor entender sua dinâmica, perscrutando quais características estão presentes e em que situações emergem.

Destarte, a Tabela 1 apresenta algumas características de ampla referência na literatura, a saber: adaptação, controle, criticalidade, emergência, heterogeneidade e processamento de informação.

Tabela 1 – Principais características observadas em sistemas complexos

Característica	Definição
Adaptação	Uma característica comum de sistemas considerados como complexos é a sua capacidade de alterar seu comportamento para aumentar suas chances de sobrevivência ou sucesso, através de processos de aprendizagem ou evolucionários (MITCHELL, 2009).
Controle descentralizado	Sistemas complexos são compostos de elementos individuais, cada um seguindo regras relativamente simples sem que haja um líder ou controle central. A ação coletiva de um vasto número de componentes origina padrões de comportamentos complexos, de difícil predição e em constante mudança. Tal característica refere-se à capacidade de direcionar o controle global através do controle local. Embora tal particularidade seja um tanto quanto enigmática, é uma característica de diversos sistemas sociais (MILLER; PAGE, 2007).
Criticalidade auto-organizada	Segundo Bak (1996), grandes sistemas com muitos componentes tendem a evoluir para um estado “crítico” estável, distante do equilíbrio, onde distúrbios menores podem originar eventos catastróficos (chamados de avalanches) de todos os tamanhos. O autor denomina tal estado como auto-organizado quando estabelecido exclusivamente através das interações dinâmicas entre os elementos individuais do sistema. As mudanças ocorridas nesse tipo de sistema, portanto, dão-se através de eventos catastróficos em vez de seguirem

uma trajetória gradual e sem que haja planejamento de um agente externo.

Nesse sentido, a natureza seria um sistema perpetuamente fora de equilíbrio, mas organizada em um estado equilibrado (estado crítico) onde tudo acontece dentro de leis estatísticas bem definidas (BAK; TANG; WIESENFELD, 1987, p. 382). Vários eventos podem ser caracterizados por esse fenômeno, como catástrofes naturais e fractais. Para analisar o fenômeno, o autor elaborou um modelo que foi amplamente discutido na literatura, chamado de *sandpile*¹.

Emergência	É a principal característica (ou a de principal interesse) em sistemas complexos. Refere-se ao fenômeno em que o comportamento individual e localizado origina um comportamento global que é, de alguma forma, desconectado de suas origens (MILER; PAGE, 2007, p. 44). Isto é, habitualmente, o comportamento agregado mostra-se imune a algumas flutuações no comportamento individual. O exemplo mais notável desse fenômeno no campo da economia é o conceito da “Mão Invisível” de Adam Smith (1985), em que a interação entre diferentes indivíduos seguindo seus próprios interesses resultaria na emergência de uma determinada ordem econômica.
Heterogeneidade	Os elementos constituintes de um sistema nem sempre são iguais, frequentemente há certo grau de diferenciação entre eles. Tais elementos não são totalmente parvos ou inteligentes. Miller e Page (2007) ainda salientam que a heterogeneidade é uma característica importante para aumentar a robustez de um sistema.
Processamento de informação	Os elementos constituintes de um sistema recebem informações sobre o seu ambiente (tanto interno, quanto externo), processa-as e age. Tais informações são seletivamente recebidas através de diferentes canais de comunicação, processadas via mecanismos adaptativos ou regras restritivas ao invés de pura lógica, e a ação do elemento geralmente é limitada e localizada (MITCHELL, 2009). Isso desafia os modelos

¹ O modelo *sadpile* descrito em (BAK, 1996, p. 49-64) refere-se à modelagem computacional de uma pilha de areia, em que se a inclinação for muito grande, a pilha é afastada do equilíbrio, e entrará em colapso até que a inclinação média alcance um valor crítico em que o sistema é minimamente estável em relação a pequenas perturbações.

econômicos tradicionais, em que os agentes tendem a possuir todas as informações disponíveis, processam de forma apropriada e agem logicamente para otimizar seus resultados.

4.1 REDES COMPLEXAS

Uma rede pode ser definida simplesmente como um “conjunto de pontos que se comunicam entre si” (HOUAISS, 2009), embora o mesmo dicionário apresente outras onze acepções. Embora simples, essa definição apresenta uma importante característica de sistemas complexos e o que diferencia uma rede de um amontoado de pontos: a comunicação.

Assim, grande parte do foco da pesquisa das chamadas teorias da complexidade utiliza o conceito de redes para descrever e analisar a dependência entre os elementos de um sistema e suas trocas de informação. O que torna um sistema diferente da soma de suas partes é, em essência, o tipo de ligação entre seus elementos constituintes, como eles se influenciam e como a informação percorre a rede.

Assim, a modelagem computacional de redes complexas é realizada para analisar a influência e interdependência entre os elementos constituintes no comportamento global de sistemas sociais, econômicos ou biológicos. Ao mesmo tempo em que permite analisar tal fenômeno, o conceito de redes permite ao cientista manter uma perspectiva ampla sobre os múltiplos fatores interligados de forma computacionalmente tratável.

Gross e Sayama (2009) ainda indicam que nos últimos anos pesquisas em diversas áreas começaram a convergir para o estudo de redes adaptativas. Consequentemente, esse tipo de rede está sendo estudado através de diferentes ângulos, utilizando-se ferramentas desenvolvidas em diferentes disciplinas.

Os autores ainda propõem uma definição para redes complexas (ou adaptativas):

Adaptive networks uniquely combine dynamics on a network with dynamical adaptive changes of the underlying network topology, and thus they link classes of mechanisms that were previously studied in isolation. Here adding one and one certainly does not make two, but gives rise to a number of new phenomena, including highly robust self-organization of topology and dynamics and other remarkably rich dynamical behaviors. (GROSS; SAYAMA, 2009, p. vii)

É importante notar que uma rede adaptativa é o resultado da união de dinâmica na rede com dinâmica da rede. Ou seja, em uma rede adaptativa é composta por sistemas

dinâmicos individuais acoplados entre si (dinâmica na rede), sendo que o padrão das ligações entre eles (a topologia da rede) evolui dinamicamente no tempo (dinâmica da rede). Assim, uma rede complexa é uma rede em que os links mudam adaptativamente em relação aos seus estados, resultando em uma interação dinâmica entre o estado e a topologia da rede (GROSS; SAYAMA, 2009; BARABÁSI; ALBERT, 1999; NEWMAN; BARABÁSI; WATTS, 2006)

É nesse sentido que Newman, Barabási e Watts (2006, p. 4) apontam que as pesquisas hodiernas em redes distinguem-se dos trabalhos anteriores em três principais aspectos:

(1) By focusing on the properties of real-world networks, it is concerned with empirical as well as theoretical questions; (2) it frequently takes the view that networks are not static, but evolve in time according to various dynamical rules; and (3) it aims, ultimately at least, to understand networks not just topological objects, but also as the framework upon which distributed dynamical systems are built.

Tais pesquisas revelaram diversos fenômenos e mecanismos, conforme citado por Gross e Sayama (2009, p. 1):

Adaptive networks based on simple local rules can self-organize robustly toward phase transitions (BORNHOLDT, ROHLF, 2000) and highly non-trivial complex topologies (HOLME, GHOSHAL, 2008); distinct classes of nodes can emerge spontaneously from an initially homogeneous population (ITO, KANEKO, 2002); and, complex dynamics can be observed as a consequence of phase transitions (HOLME, NEWMAN, 2010) and bifurcations (GROSS et al, 2006) that involve topological as well as local degrees of freedom.

Os artigos citados ainda demonstram os processos dinâmicos que ocorrem em redes são altamente sensíveis à topologia da rede, o que nos permite inferir que “the dynamics explores the network topology and thereby, somehow, ‘encodes’ topological information in the time series of the states of the nodes” (GROSS; SAYAMA, 2009, p. 4). Exemplo desse fenômeno é pode ser representado por um modelo de propagação de uma doença em uma rede:

Each node is either susceptible to the disease or infected. Susceptible nodes that are linked to infected nodes become infected with a certain rate, while infected nodes recover at a different rate, coming back to susceptible again. Whether such a disease can persist in the network depends on the rates of infection and recovery, but also on the number of connections per network node, or the *degree* of the nodes. Specifically, it depends on a quantity called *mean excess degree*, which denotes the average number of additional links that one finds connected to a node that is reached by following a random link. In a large connected network in which the excess degree exceeds a certain threshold, the disease can persist indefinitely. In this case, every node will be infected once in a while. Consequently, we can estimate whether the

mean excess degree exceeds the threshold (global topological information) just by watching the behavior of a single node (time series of states of an individual node) for a sufficiently long period of time (GROSS; SAYAMA, 2009, p. 5)

Tal exemplo ilustra como a informação sobre a topologia pode ser incluída na dinâmica de cada nó. Todavia, em redes estáticas o fluxo da informação é unidirecional, o que faz com que a informação sobre a topologia não possa ser retroalimentada para os nós. Se, no exemplo citado acima, os nós suscetíveis pudessem desligar-se de nós vizinhos infectados com certa probabilidade, é criado um *loop* de retroalimentação entre a topologia e os estados da rede. Dessa forma, a dinâmica da prevalência da doença depende da topologia da rede ao mesmo tempo em que a topologia da rede depende da prevalência da doença.

Os modelos teóricos de estrutura de redes fazem uso de quatro classes principais de rede de acordo com sua estrutura: redes regulares, redes aleatórias, rede de mundo-pequeno e redes livre de escala. Com o foco de pesquisa voltado às redes reais, os modelos hodiernos voltam-se a simular fenômenos através da construção e análise de redes mundo-pequeno e redes livre de escala. Ainda assim, redes regulares e aleatórias ainda são parte da consecução de modelos atuais. Tais estruturas são detalhadas separadamente a seguir.

4.1.1 Redes Regulares

Redes regulares são utilizadas em diversos modelos matemáticos devido a sua simplicidade de implementação e análise. Nesses modelos, as ligações são construídas entre os vértices em um padrão regular. Os padrões mais usuais são o de Von Neumann e Moore.

A vizinhança de Von Neumann considera os quatro vértices ortogonalmente adjacentes (norte, sul, leste e oeste). Já a vizinhança de Moore engloba os oito vértices que cercam o nó central.

Tal topologia é utilizada principalmente por Autômatos Celulares, que podem ser definidos “[...] as a mathematical abstraction of the physical world, an abstraction in which time is discrete and space is made of little blocks, or cells. These cells are organized as a regular lattice, in such a way as to fully cover the spatial domain of interest” (CHOPARD, 2012, p. 288).

Autômatos Celulares foram propostos por Von Neumann e Ulam no final da década de 1940 e têm sido utilizados em vários campos de pesquisa até os dias atuais (CHOPARD,

2012). A principal vantagem de utilizar uma visão microscópica e idealizada do mundo real é que sua implementação é fácil e rápida, ainda permitindo analisar comportamentos reais. Ademais, modelos que utilizam redes regulares são intuitivos e de fácil compreensão. Embora simples, modelos realizados sobre redes regulares podem exibir padrões de comportamentos complexos.

4.1.2 Redes Aleatórias

Redes aleatórias foram introduzidos por Solomonoff e Rapoport (1951) e extensamente analisadas por Erdős e Rényi (1960). Os modelos estudados por Erdős e Rényi foram amplamente discutidos na literatura, e são divididos em dois tipos, $G_{n,m}$ e $G_{n,p}$:

$G_{n,m}$ is the set of all graphs consisting of n vertices and m edges. In order to generate a graph sampled uniformly at random from the set $G_{n,m}$, we simply throw down m edges between vertex pairs chosen at random from n initially unconnected vertices.

$G_{n,p}$ is the set of all graphs consisting of n vertices, where each pair is connected together with independent probability p . In order to generate a graph sampled uniformly at random from the set $G_{n,p}$, we take n initially unconnected vertices and go through each pair of them, joining the pair with an edge with probability p , or not with probability $1 - p$. (NEWMAN, BARÁBASI, WATTS, 2006, p. 229-230)

Em $G_{n,m}$ o número de arestas é fixo, enquanto em $G_{n,p}$ o número de arestas pode flutuar, ainda que sua média seja fixa. Nota-se que os dois modelos são essencialmente equivalentes no limite de n grande. Devido a essa equivalência e uma maior facilidade de implementação, o modelo $G_{n,p}$ é mais frequentemente utilizado.

Apesar dos resultados desses modelos não corresponderem a pesquisas empíricas sobre redes reais, o estudo de redes aleatórias demonstrou importantes características que ajudaram a balizar estudos futuros.

Uma das principais características observadas é que o modelo exibe uma transição de fase em que um *componente gigante* é formado quando o grau médio z de um vértice é $z = np = 1$, sendo que, em um grafo aleatório, há a existência de apenas um componente gigante (NEWMAN, BARABÁSI, WATTS, 2006). Essa transição de fase é uma transição de fase ordinária contínua semelhante a que ocorre em outros sistemas, como o modelo de Ising, que será alvo de detalhamento em capítulo posterior. O parâmetro de ordem para a transição é

a fração S do grafo ocupado pelo componente gigante, que varia continuamente de zero para $z \leq 1$ a diferente de zero para $z > 1$.

Ademais, Bollobás (2001) também aponta outros resultados que demonstram a correlação dos fenômenos observados em grafos aleatórios com redes reais:

- Below the phase transition there is no giant component, only a large number of small components disconnected from one another. The average size of the component to which a randomly chosen vertex belongs is $1/(1 - z)$, which is just a constant as the graph becomes large if we keep z constant.
- Above the phase transition the giant component fills a fraction S of the graph given by the larger solution to the transcendental equation $S = 1 - e^{-zS}$. This equation has no closed-form solutions other than $S = 0$, but it is clear that S increases monotonically once we pass the threshold at $z = 1$. Above the transition, there are also many smaller components that fill the portion of the graph not occupied by the giant component. These have average size $1/(1 - z + zS)$, which is again a constant independent of n if we keep z fixed. (NEWMAN, BARABÁSI, WATTS, 2006, p. 232)

Destarte, as propriedades básicas exibidas por grafos aleatórios podem prover dados valiosos sobre o comportamento de redes reais, como a existência (ou não) de um grande componente, os pequenos componentes e transições de fase. Todavia, outros tipos de redes têm sido mais bem empregados para o estudo de redes reais, nomeadamente redes de mundo-pequeno e livres de escala, pois a distribuição de grau de redes aleatórias não é corroborada por estudos empíricos na maioria de redes reais.

4.1.3 Redes de mundo-pequeno

Em 1998, Duncan Watts e Steven Strogatz apresentaram um novo modelo de rede, chamado de redes de mundo-pequeno. O artigo foi publicado na tentativa de aproximar os modelos de redes até então utilizados (regulares e aleatórios) ao que acontecia em redes reais.

No modelo proposto, a interpolação entre redes regulares e aleatórias é realizada através de um processo de religação aleatória. O modelo utiliza uma rede inicial disposta em anel com n vértices e k graus por vértice. Cada aresta é religada com uma probabilidade p .

Essa configuração permite ajustar o grafo para operar entre a regularidade ($p = 0$) e desordem ($p = 1$) e, portanto, explorar a região intermediária $1 < p < 1$, até então desconhecida.

O modelo foi construído após a observação de que, em algumas redes reais, a maior parte dos vértices é conectada através da rede por curtos caminhos. Isto é, a distância média (ou por vezes a máxima) entre vértices na rede aumenta logarithmicamente em relação ao número total de vértices.

Newman, Barabási e Watts (2009) reforçam que há evidências empíricas e matemáticas que corroboram a existências desse escalonamento logarítmico em redes reais. Tal escalonamento é incluído no modelo implicitamente através da definição de caminhos curtos para indicar caminhos comparáveis aos encontrados em grafos aleatórios de mesmo tamanho e grau médio.

Além disso, o modelo demonstra grande “clusterização” ou “transitividade”, indicando que há uma alta probabilidade de dois vértices serem conectados diretamente entre si caso eles tenham um terceiro vértice vizinho em comum. Esse fenômeno é evidente em redes sociais, em que duas pessoas são mais suscetíveis de se conhecerem se possuem um amigo em comum.

Matematicamente, Watts e Strogatz definem uma rede como de mundo-pequeno quando a distância média entre dois vértices ℓ é análoga a de um grafo aleatório ($\ell/\ell_{rg} \sim 1$) e o coeficiente de clusterização é muito maior que o de um grafo aleatório ($C/C_{rg} \gg 1$).

Tabela 2 – Número de vértices n , grau médio z e coeficiente de clusterização C para algumas redes reais, juntamente com o valor esperado do coeficiente de clusterização em um grafo aleatório com o mesmo número de vértices e o mesmo grau médio. Traduzido de Newman, Barabási, Watts, 2006, p. 289).

Redes	n	z	coeficiente de clusterização C	
			mensurado	grafo aleatório
Internet	6.374	3,8	0,24	0,00060
World Wide Web	153.127	35,2	0,11	0,00023
rede de energia	4.941	2,7	0,080	0,00054
parcerias em biologia	1.520.251	15,5	0,081	0,000010
parcerias em matemática	253.339	3,9	0,15	0,000015
parcerias entre atores	449.913	113,4	0,20	0,00025
diretores de empresas	7.673	14,4	0,59	0,0019
co-ocorrência de palavras	460.902	70,1	0,44	0,00015
rede neural	282	14,0	0,28	0,049
rede metabólica	315	28,3	0,59	0,090
teia alimentar	134	8,7	0,22	0,065

Todavia, Newman, Barabási e Watts apontam que o modelo aqui apresentado não é, em termos gerais, um bom modelo de redes reais, incluindo redes sociais. Outros modelos propostos se mostraram mais adequados, como os apresentados por Watts (2002) e Kleinberg (2002 apud NEWMAN, BARABÁSI, WATTS, 2006).

4.1.4 Redes livres de escala

O modelo de redes livres de escala foi proposto por Albert-László Barabási e Réka Albert (1999) a partir da observação de que em muitas redes grandes a conectividade dos vértices segue uma distribuição de lei de potência, não contemplada nos modelos de grafos precursores.

Os autores argumentam que essa característica é decorrente da expansão contínua da rede e do fato dos novos vértices conectarem-se preferencialmente aos vértices mais conectados. Portanto, o modelo proposto é baseado nesses dois ingredientes, indicando que o desenvolvimento de grandes redes é governado por um fenômeno robusto de auto-organização.

Em contraste, os modelos de redes aleatórias e de mundo-pequeno iniciam com um número de vértices (N) fixo que são conectados aleatoriamente (modelo de Erdős-Rényi) ou reconectados aleatoriamente (modelo de Watts-Strogatz) sem que haja qualquer alteração de N durante o processo. No entanto, as redes reais são formadas pela adição contínua de novos vértices, conectados aos vértices já presentes no sistema. Portanto, em redes reais N varia continuamente no tempo.

Além disso, tais modelos assumem uma probabilidade de ligação entre os vértices aleatória e uniforme. Todavia, Barabási e Albert (1999, p. 5) argumentam que a maioria de redes reais exibe conectividade preferencial, isto é, os novos vértices se conectam com uma maior probabilidade aos vértices que tem mais conexões.

Esses argumentos foram elaborados através da exploração de vários bancos de dados descrevendo a topologia de grandes redes (como a *www* ou o padrão de citação de artigos acadêmicos). Tal análise concluiu que, independente do sistema ou da identidade de seus constituintes, a probabilidade $P(k)$ de um vértice interagir com outros k vértices decai como uma lei de potência, seguindo $P(k) \sim k^{-\gamma}$. Esse resultado indica que grandes redes se auto-

organizam em um estado livre de escala, uma característica não reproduzida pelos modelos precursores de redes aleatórias.

O termo “livre de escala” é utilizado aqui como sinônimo de lei de potência. Segundo Newman (2003, p. 13), o termo “livre de escala” refere-se a qualquer forma funcional $f(x)$ que permanece inalterada dentro de um fator multiplicativo sob um reescalonamento da variável independente x . Isso significa utilizar leis de potência, visto que são as únicas soluções para $f(ax) = bf(x)$. Disso decorre o fato de que uma rede livre de escala seja caracterizada pela distribuição de grau observar uma lei de potência.

No modelo apresentado, chamado de *preferential attachment*, os vértices são adicionados a uma rede com grau m_0 de forma que a extremidade de cada aresta é ligada a outro vértice com probabilidade proporcional ao grau daquele vértice. Como as ligações não são direcionais, não há diferenciação entre grau de entrada e saída.

Assim, o modelo inicia com um pequeno número de vértices (m_0), sendo que um novo vértice com $m(\leq m_0)$ arestas é adicionado a cada iteração e conectado aos vértices já presentes no sistema. Para incorporar o efeito de *preferential attachment*, assume-se que a probabilidade P de ligação do novo vértice com o vértice já existente i depende da conectividade k_i do vértice, definida por $P(k_i) = k_i / \sum_j k_j$.

Após t iterações, o modelo apresenta uma rede aleatória com $t + m_0$ vértices e mt arestas. Essa rede evolui para um estado invariante de escala com a probabilidade de que um vértice tenha k arestas seguindo uma lei de potência com expoente $\gamma_{model} = 2,9 \pm 0,1$.

Como a lei de potência observada em redes reais descreve um sistema de diferentes tamanhos em diferentes estágios de desenvolvimento, é esperado que um modelo apresente uma distribuição de forma que suas características sejam independentes do tempo. Os autores expõem que $P(k)$ é independente do tempo e, portanto, independente do tamanho do sistema $m_0 + t$, o que indica que o sistema se auto-organiza em um estado estacionário livre de escala apesar de seu crescimento contínuo.

Apesar de redes reais exibirem outras características não consideradas no modelo (como a remoção e reorganização de vértices) o modelo proposto apresentou o primeiro mecanismo satisfatório responsável pela natureza invariante de escala de redes reais.

5 A UTILIZAÇÃO DE MODELOS DE SISTEMAS SOCIAIS COMPLEXOS

Embora o desenvolvimento das ciências sociais seja antigo, alguns fenômenos ainda causam perplexidade na comunidade acadêmica. Para Miller e Page (2007) isso é decorrente da incapacidade das ferramentas e metodologias tradicionalmente empregadas de prover resultados satisfatórios para a análise de fenômenos complexos.

Um dos primeiros escritos sobre complexidade em ciências sociais pode ser atribuído a Adam Smith em “A Riqueza das Nações” (1776). A obra apresenta o conceito da “mão invisível” como uma metáfora utilizada para descrever um comportamento auto-regulatório do mercado. Nessa concepção, um conjunto de agentes, agindo apenas segundo seus próprios interesses, daria origem a uma estrutura econômica que conduz o mercado a uma determinada direção sem que haja uma entidade coordenadora central. Embora centenas de estudos tenham analisado o mecanismo dessa estrutura, a real dinâmica por trás da mão invisível permanece em grande parte oculta (MILLER, PAGE, 2007).

Essa incerteza demonstra como as ferramentas disponíveis podem restringir a capacidade científica de executar e validar teorias, apesar de nossa grande capacidade em teorizar sobre sistemas sociais. No entanto, o desenvolvimento de novas ideias e ferramentas ao longo das últimas décadas abriu uma nova fronteira de exploração científica de sistemas sociais.

Assim como outros tipos de sistemas, sistemas sociais são compostos por agentes ligados entre si, trocam informações com seus pares, processam-na e agem na tentativa de aumentar suas chances de sucesso. As ligações entre eles podem ser relativamente estáveis (como ligações familiares) ou em constante mutação (como ligações comerciais). Além disso, o processo decisório e a tomada de ação podem ser bem planejados ou não, de acordo com o processamento de informação do indivíduo.

O mais notável sobre sistemas sociais, segundo Miller e Page (2007), é a rapidez com que as conexões entre os indivíduos podem levar à complexidade. Agentes sociais reagem às ações de outros agentes, baseando-se em sua experiência passadas, previsões futuras e habilidade em processar informações. À medida em que as ligações entre esses agentes são intensificadas, tais ações e reações são exacerbadas, originando um sistema em que a interação dos agentes torna-se altamente não linear. Dessa forma, o estudo do sistema não pode mais ser realizado através de sua decomposição em partes menores.

Os padrões complexos de interação gerados pelo comportamento social é consequência da busca ativa de novas conexões pelos agentes e de seu comportamento

orientado para um objetivo. Esse fenômeno faz com que seja necessário reformular as várias abordagens tradicionalmente utilizadas para entender, prever e manipular o comportamento do sistema.

Apesar desse panorama confuso, os estudos sobre a complexidade têm apresentado novas técnicas e metodologias que, aliadas ao desenvolvimento computacional das últimas décadas, tem auxiliado na construção de ferramentas consistentes de análise de sistemas sociais.

Para Popper (2006, p. 61), as teorias “são redes, lançadas para capturar aquilo que denominamos ‘o mundo’: para racionalizá-lo, explica-lo, dominá-lo”. As novas ferramentas, portanto, auxiliam cientistas sociais a tornar as malhas dessa rede cada vez mais estreitas.

O desenvolvimento de novas ferramentas objetiva explorar espaços até então intocados nas ciências sociais, os fenômenos que ocorrem entre extremos. Busca-se, portanto, entender o que está entre a estática e o caos absoluto, entre o comportamento simples e o estratégico, entre sistemas compostos por mais de dois e menos de infinitos agentes, entre anarquia e controle (MILLER; PAGE, 2007).

A necessidade de explorar novas metodologias se faz pela incapacidade de ferramentas tradicionais analisar os fenômenos entre tais extremos. Isso porque os métodos tradicionais restringiam pesquisadores a modelos de fenômenos estáticos e homogêneos, geralmente compostos por dois ou infinitos agentes (considerados extremamente ineptos ou notavelmente prescientes) e desconsiderando espaço e tempo (MILLER, PAGE, 2007). Embora qualquer modelagem seja uma simplificação da realidade, os fenômenos que despertam interesse científico geralmente ocorrem entre esses extremos.

Em contrapartida, as novas ferramentas oriundas de pesquisas em sistemas complexos permitem a modelagem com qualquer número de agentes em um ambiente dinâmico e sujeito a limites de tempo e espaço. Ressalta-se ainda que tais abordagem não visam substituir os métodos tradicionalmente empregados nas ciências sociais, mas complementá-los, permitindo a construção de teorias mais consistentes sobre o mundo real.

Nesse sentido, destaca-se a utilização de novas teorias em redes, que tem tido grande avanço facilitado pela abordagem de sistemas complexos. Embora a utilização de redes e conceito de interações entre agentes sociais tenham sido utilizados há tempos, atualmente vê-se a ascensão de modelos matemáticos e computacionais para analisar diversos fenômenos sociais. Esses modelos permitem que, ao invés de focar em uma rede particular, considerar propriedades genéricas de conexões sociais. Assim, é possível a criação de um enorme

número de redes que compartilham determinados padrões de conectividade para destes derivar padrões genéricos de comportamento. A mineração de dados on-line, por exemplo, proporciona diferentes tipos de análises que até então eram impossíveis de tecer.

Ademais, é notável o potencial dos modelos complexos adaptativos de sistemas sociais em combinar a riqueza dos métodos qualitativos com o rigor matemático, como exposto por Miller e Page (2007). Enquanto os métodos qualitativos proporcionam grande flexibilidade em relação aos tipos de problemas que podem ser analisados, eles também podem ser vagos, inconsistentes e incompletos. Já os métodos matemáticos tendem a ser mais rigorosos em relação à sua formulação e solução, embora o custo de tal rigor seja muitas vezes uma perda da riqueza que pode ser estudada. Portanto, argumentam os autores, os modelos de sistemas complexos são capazes de preencher a lacuna entre riqueza e rigor, desde a criação de modelos até a análise de seus resultados e formulação de teorias.

Miller e Page (2007) ainda apontam que, embora tal ferramental expanda os horizontes de pesquisa, também estão sujeitos às considerações sobre sua necessidade e validação científica. Como qualquer instrumento, deve ser submetido a julgamento quanto a sua capacidade de assistir na análise e entendimento de fenômenos sociais relevantes.

Dessa forma, as teorias advindas de modelos de sistemas complexos devem ser submetidas à prova (assim como qualquer outra teoria) em etapas, como argumenta Popper (2006, p. 33):

- 1) Comparação lógica das conclusões umas às outras, em que se testa a coerência interna do sistema;
- 2) Investigação da forma lógica da teoria, em que se determina se apresenta caráter de teoria empírica ou científica, ou então se é tautológica;
- 3) Comparação com outras teorias, em que se determina se a nova teoria apresenta avanços científicos caso passe pelas demais provas;
- 4) Comprovação da teoria por meio das aplicações empíricas das conclusões por ela apresentadas.

Enquanto os modelos de sistemas complexos diferem dos modelos de equilíbrio em sua forma de produzir hipóteses, a capacidade de coloca-las à prova é bastante semelhante. Em ambos os casos, as previsões geradas podem ser refutadas. Todavia, testes empíricos de modelos de sistemas complexos ainda podem exigir novos avanços em estatística para que seja possível analisar padrões temporais e espaciais observados nos resultados gerados.

A dificuldade hodierna em colocar os resultados produzidos por modelos computacionais aos testes empíricos não diminui a importância do trabalho realizado, constituindo uma etapa do processo científico. É nesse sentido que Max Planck assevera que a ciência avança a cada funeral.

Como Popper demonstra, o processo de prova inicia-se com as previsões deduzidas da teoria “mais suscetíveis de serem submetidas facilmente a prova ou previsões aplicáveis na prática” (POPPER, 2006, p. 33). O modelo (enquanto uma teoria sobre a realidade) apenas pode ser falseado quando a confrontação de suas previsões com os resultados das aplicações práticas e dos experimentos apresentar resultados negativos. Ou seja, resultados positivos desse processo apenas proveem alicerce temporário à teoria, ao passo que qualquer resultado negativo sempre será motivo para rejeitá-la. Magee (1974, p. 28) elucida essa questão através de um exemplo:

[...] embora não exista número de enunciados de observação relatando a observação de cisnes que permita derivar o enunciado universal “Todos os cisnes são brancos”, um só enunciado de observação, relatando uma única observação de um cisne preto, é suficiente para permitir a dedução lógica do enunciado “Nem todos os cisnes são brancos”.

Os modelos de sistemas complexos geralmente são construídos na tentativa de explicar um fenômeno para então, independentemente do tempo em que ocorre, antecipar processos em condições similares, mantidas as relações entre as variáveis que o compõe. Ademais, “[...] sempre que se dispuser de uma explicação para determinado evento, se dispõe também de uma previsão, posto que se tem um modelo das condições em que o evento deverá ocorrer” (GOMEZ DE SOUZA, SILVA, 1976 apud BUARQUE 2003, p. 21).

Em contraposição, salienta-se ainda que não se pode afirmar que as condições em que o evento ocorreu permanecerão as mesmas, ou seja, uma teoria pode ser capaz de explicar como e porque um determinado evento ocorreu, mas não será capaz de prever exatamente o que ocorrerá, pois não é possível afirmar que as condições necessárias para sua ocorrência permanecerão as mesmas. Como apresenta Magee (1974, p. 26):

Se eu noto que o acontecimento A vem acompanhado, em certa ocasião, pelo acontecimento B, não se segue logicamente que A volte a ser acompanhado por B em outra ocasião. Isso não decorre logicamente de duas observações, nem de vinte ou de duas mil. Se os acontecimentos vem juntos um número suficiente grande de vezes, eu posso, notando que A ocorreu, manifestar certa expectativa no sentido de que B ocorra – mas isso é uma fato psicológico, não lógico.

[...]

A ciência admite que haja regularidade da natureza, admite que o futuro se assemelhará ao passado em todos os aspectos em que as leis operam.

Todavia, não há meio que permita legitimar esse pressuposto. Ele não pode ser estabelecido pela observação, pois que nos é impossível observar acontecimentos futuros. E não pode ser estabelecido com base em argumentos lógicos, pois que do fato de futuros passados se terem assemelhado a passados passados não deflui que todos os futuros futuros venham a assemelhar-se aos passados futuros.

Esse argumento demonstra ainda como a utilização de modelagem de sistemas complexos torna-se exemplarmente profícua para a elaboração de cenários prospectivos. O argumento exposto por Magee apenas afirma que não é possível conhecer o futuro a partir de acontecimentos passados; e essa é a razão da ineficácia de modelos determinísticos ou extrapolações matemáticas. A viabilidade de utilizar-se a modelagem de sistemas complexos é listar quais variáveis compõe um sistema e como a mudança na relação entre elas pode alterar o comportamento global. Ou seja, a modelagem apresenta um instrumental matemático e computacional para tratar fenômenos sociais, analisando quais eventos poderão ocorrer no futuro. Portanto, não se trata predizer o futuro baseando-se em experiências passadas, mas analisar como perturbações no sistema podem originar os “futuros futuros”.

Segundo Popper (2006, p. 40), “há grande número – presumivelmente infinito – de ‘mundos logicamente possíveis’. Entretanto, o sistema que se denomina ‘ciência empírica’ pretende representar apenas um mundo: o ‘mundo real’, ou o ‘mundo de nossa experiência’”. Contudo, a prospectiva não objetiva representar o “mundo real” futuro, mas sim os “mundos logicamente possíveis” futuros. Dessa forma, ainda que os resultados do estudo possam ser submetidos à prova por contradição somente *a posteriori*, não perdem sua validade científica admitindo refutação por falseamento das conclusões deles deduzidas.

Uma vez especificado um modelo e descoberto que ele leva a um macrofenômeno coerente, tem-se assim encontrado pelo menos um conjunto de microcondições que é suficiente para gerar macro-observações. Naturalmente, isso não implica que o conjunto de condições é o que realmente tenha produzido o fenômeno no mundo real, mas apresenta uma base para analisar como flutuações nas microcondições podem alterar o macrofenômeno. Epstein (1999, apud MILLER, PAGE, 2007) ainda argumenta que essa abordagem é uma maneira poderosa de fazer ciência social.

Buarque (2003) ainda evidencia que tal análise deve ser pautada por um referencial analítico ou modelo de interpretação teórica do sistema em estudo. Ou seja, o modelo teórico posta-se como base para a interpretação de relações de causa e efeito entre múltiplas variáveis e comportamentos imponderáveis, possibilitando uma formulação consistente de movimentações futuras.

Embora o caminho apresentado por Popper seja amplamente aceito para determinar a manutenção de uma teoria como (provisoriamente) aceita ou não, as provas por contradição são estatisticamente difíceis de serem realizadas em sistemas sociais e normalmente não são intelectualmente satisfatórias, pois raramente a contradição fornece alguma informação útil sobre o problema subjacente.

Para alguns modelos de sistemas sociais em que haja dificuldade em submetê-los à provas por contradição, há de se avaliá-los segundo as etapas anteriores sugeridas por Popper e em sua capacidade de fornecer novos caminhos a partir dos quais pode-se tecer novas proposições. É nesse sentido que Hayek argumenta sobre teorias em análise de fenômenos de mercado:

The problem is thus in no way solved if we can show that all the facts, *if* they were known to a single mind (as we hypothetically assume them to be given to the observing economist), would uniquely determine the solution; instead we must show how a solution is produced by the interactions of people each of whom possesses only partial knowledge. To assume all the knowledge to be given to a single mind in the same manner in which we assume it to be given to us as the explaining economists is to assume the problem away and to disregard everything that is important and significant in the real world. (HAYEK, 1945, p. 530 apud MILLER, PAGE, 2007, p. 107)

Ainda segundo Magee (1974 p. 30), “demonstrar a verdade de uma teoria ou justificar nossa crença em certa teoria [...] é logicamente impossível. O que se pode fazer, porém, e isto sim, é de grande importância, é justificar nossa preferência por uma teoria, em detrimento de outra”.

Não obstante, modelos computacionais também podem ser úteis como objetos puramente abstratos ao fornecer uma realidade artificial, sob a qual pesquisadores podem experimentar novos mundos e novas regras de interação. Segundo Miller e Page (2007, p. 108), esses mundos artificiais são totalmente observáveis, recuperáveis, e repetíveis, e, portanto, são um campo fértil a partir do qual as teorias podem ser criadas, refinadas e testadas. Como muitas ferramentas teóricas, modelos computacionais têm o potencial de produzir novas ideias além das intenções originais no desenvolvimento do modelo, suscitando novos avanços científicos.

Evidentemente, tais ideias advindas do processo de modelagem não seguem caminhos lógicos mas psicológicos, como salienta Popper (2006, p. 32): “toda descoberta encerra um ‘elemento irracional’ ou uma ‘intuição criadora’”. A utilização desses mundos observáveis, recuperáveis e repetíveis fomentam, portanto, descobertas científicas que “[...] não poderiam ser feitas sem fé em ideias de cunho puramente especulativo e, por vezes, assas

nebulosas, fé que, sob o ponto de vista científico, é completamente destituída de base [...]” (POPPER, 2006, p. 40).

A geração de um fenômeno totalmente *bottom-up* muitas vezes proporciona novos caminhos para sua análise e entendimento. A visão completa de um fenômeno, de suas origens à sua manifestação, permite analisar a lógica interna do funcionamento e da dinâmica do objeto, permitindo antecipar sua evolução futura, bem como analisar o papel de diferentes variáveis nos movimentos e transformações exibidas pelo sistema.

6 O MODELO

Conforme exposto, a motivação da presente pesquisa reside na intenção de estudar e compreender o fenômeno da difusão de estratégias de sustentabilidade em redes empresariais. Para tanto, foi utilizado o ferramental de análise de redes complexas para construir estruturas de redes e examinar quais as condicionantes estruturais que fomentam a emergência de sustentabilidade. Os resultados da pesquisa almejam orientar organizações em sua tomada de decisão, fornecendo dados para a construção de cenários prospectivos.

Do ponto de vista do formulador de políticas públicas, intenta-se perscrutar acerca de seus métodos e capacidade de influenciar o setor produtivo a se auto-organizar em prol da adoção de estratégias de sustentabilidade.

O processo de pesquisa e construção de um modelo matemático para analisar as referidas questões obedece ao roteiro exposto por Per Bak na obra *How nature works* (1996, p. 44):

[...] we describe a class of phenomenon in nature by a simple mathematical model, such as the Feigenbaum map. We analyze the model either by mathematical analytical means, with pen and paper, or by numerical simulation. [...] Often, however, simulations are easier than mathematical analysis and serve to give us a quick look at the consequences of our model before starting analytical considerations. [...] We then compare the finding with experiments and observation. If there is general agreement, we have discovered new laws of nature operating at a higher level. If not, we haven't. The beauty of the model can be measured as the range between its own simplicity and the complexity of the phenomena that it describes, that is, by the degree to which it has allowed us to condense our description of the real world. (BAK, 1996, p. 44)

Ressalta-se que a presente pesquisa almeja apresentar um modelo e realizar as análises matemáticas dos resultados simulados. A comparação dos experimentos com pesquisas empíricas será realizada em momento posterior.

O modelo matemático escolhido como base para o desenvolvimento da pesquisa é o modelo de Ising, desenvolvido para estudar o comportamento de materiais ferromagnéticos (ISING, 1925). A escolha de um modelo simples para, em um segundo momento, adicionar características que aproximam o modelo do mundo real é condizente com a assertiva de Bak (1996, p. 43):

Once we have identified the basic mechanism from the simple models, we leave it to others to put more meat on the skeleton, to add more specific details, if so one wishes, to check whether or not more details modify the results.

Assim, após o detalhamento do modelo baseado em Ising e análise de seus resultados, são introduzidas novas características para aproximar o modelo aos fenômenos reais. Os resultados são simulados introduzindo uma topologia de rede livre de escala, adaptada do modelo de Barabási-Albert (1999) e reanalisados. Posteriormente, introduzimos diferentes valores para a influência da vizinhança sobre os vértices, de acordo com o modelo proposto por Ito e Kaneko (2002).

6.1 O MODELO DE ISING

O modelo de Ising (1925) é um modelo físico utilizado para estudar o comportamento de materiais ferromagnéticos sob diferentes temperaturas. Esse modelo permite analisar como os seus elementos constituintes modificam suas propriedades de acordo com os outros elementos de sua vizinhança, podendo considerar a influência do ambiente (campo magnético) externo. Embora simples, o modelo em duas dimensões já apresenta transição de fase e magnetização espontânea.

O modelo é proposto como um sistema constituído de N partículas, representadas como *spins*, podendo ser positivos (+1) ou negativos (-1). Os *spins* são dispostos em um plano e sua posição é fixa. A vizinhança de um *spin* é composta pelos *spins* ortogonalmente adjacentes (vizinhança de Von Neumann), embora alguns estudos também utilizem a vizinhança de Moore. Para a configuração da borda do sistema, utiliza-se um plano em forma de *Toro*, onde os agentes de uma borda interagem com os outros agentes da borda oposta. A Figura 2 ilustra essa configuração:

Figura 3: Composição da borda para o cálculo da energia

Fonte: COSTA, L. 2011, p. 2.

A energia total (hamiltoniana) é dada por: $H = -\sum_{(i,j)} J_{ij} S_i S_j - B \sum_i S_i$.

A soma contempla os pares mais próximos de *spins*, S_i e S_j . J_{ij} é a intensidade de acoplamento entre os *spins*, que é mantida fixa durante toda a simulação e para todos os vértices (J se i e j forem vizinhos, zero caso contrário). O campo magnético externo é considerado no modelo através do parâmetro B .

A magnetização é dada pela soma de todos os *spins* ($M = \sum_i S_i$), podendo ser apresentada em função de sua densidade ($m = \frac{M}{N}$), considerando a quantidade de *spins* (N) no plano.

A cada iteração, os *spins* podem alterar sua orientação, considerando sua presente orientação, a orientação de sua vizinhança e o campo externo. A alteração do *spin* (*spin-flip*) é realizada se um número aleatório entre 0 e 1 é menor que a probabilidade normalizada (p) de uma mudança de comportamento:

$$p = \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) / \left(1 + \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right)\right)$$

A temperatura (T) refere-se ao grau de liberdade que as partículas detêm para agirem aleatoriamente ao invés de seguir o que seus pares fazem. Dessa forma, o modelo permite avaliar o comportamento de um sistema sob diferentes níveis de influência do grupo.

Nesse sentido, destaca-se o trabalho aplicando o modelo de Ising ao entendimento do fenômeno da evasão fiscal publicado por Zaklan, Westerhoff e Stauffer (2009). Estudos anteriores baseavam-se na premissa de que as pessoas comparam os custos e benefícios da

evasão fiscal e evadem caso a penalidade esperada seja menor que o valor regular de impostos. O grande problema dessa abordagem é que ela prevê índices de *compliance* muito menores do que os observados.

Os autores então analisaram a questão à luz da influência do grupo no comportamento individual para conjecturar quais medidas são capazes de assegurar um alto nível de *compliance*. A importância dada à influência do grupo na tomada de decisão é apontada por Davis *et al* (2003 apud ZAKLAN; WESTERHOFF; STAUFFER, 2009) que salientam que o contato anterior com contribuintes que evadem tributos torna um determinado contribuinte suscetível à prática com certa probabilidade. Korobow *et al* (2007 apud ZAKLAN; WESTERHOFF; STAUFFER, 2009) ainda ressaltam a importância da influência do grupo na decisão individual de evadir ou não, concluindo que a existência de redes sociais diminui os níveis de *compliance*.

Stauffer (2007) ainda apresenta outras pesquisas que lograram sucesso com a aplicação do modelo de Ising para análise de fenômenos sociais, incluindo econômicos.

De forma análoga, pesquisa realizada por Kolk, Walhain e van der Wateringen (2001) apontou que muitas empresas passaram a publicar relatórios de sustentabilidade sem que houvesse pressão direta de investidores ou governos, mas por um efeito de “contágio” na rede de contatos da empresa, o que influenciou a tomada de decisão.

Destarte, assim como estudos utilizaram o modelo de Ising com sucesso para analisar a influência social da rede de vizinhos na tomada de decisão de agentes, o modelo nos permite iniciar a construção de um modelo onde haja difusão de estratégias de sustentabilidade em redes empresariais. Nessa concepção, as empresas seriam influenciadas por seus pares (outras empresas em sua rede de contato) a implementarem ou não estratégias de sustentabilidade de forma a imitar seus vizinhos com certa probabilidade.

A ponderação entre a influência da rede e a parcela autônoma de decisão é regulada através do parâmetro temperatura, que versa sobre o grau de aleatoriedade introduzido no sistema. Quanto menor a temperatura, menor a influência da parcela autônoma no processo de decisão. Portanto, para baixas temperaturas (menor que a temperatura crítica), o sistema tende a ordenar-se de acordo com a orientação da maioria na ausência de campo externo.

O parâmetro temperatura, portanto, permite-nos analisar qual é a relação entre a influência da rede e o processo decisório autônomo para que o sistema seja direcionado para patamares satisfatórios de adoção de estratégias de sustentabilidade ou não.

O campo externo define uma influência que atinge todos os *spins* com a mesma intensidade. A utilização do campo externo no modelo nos permite considerar, além da vizinhança e da parcela autônoma de decisão, uma influência que atinge todas as empresas com a mesma intensidade. O parâmetro campo externo, portanto, introduz ao modelo a influência da imprensa, dos consumidores e demais setores da sociedade civil organizada.

Enquanto as empresas pressionam diretamente seus fornecedores e outras empresas consumidoras a alterarem seu comportamento quanto a adoção de estratégias de sustentabilidade (seja exigindo menores impactos na produção de insumos ou custos mais baixos de produtos de alto impacto, por exemplo), os consumidores possuem informação muito fragmentada que os impede de uma ação mais direta sobre empresas e produtos específicos. Não obstante, consumidores, mídia e outros setores da sociedade civil desenvolvem um constructo social que impacta no desenvolvimento de estratégias de sustentabilidade de forma indireta como exposto anteriormente.

O parâmetro campo externo, portanto, nos permite considerar diferentes níveis de influência de um constructo social sustentável em diferentes níveis de consolidação. O valor zero de campo externo representaria a completa ausência de qualquer apreço social por estratégias de sustentabilidade, enquanto 1 representaria o cenário de conceitos sustentáveis totalmente arraigados na sociedade.

6.2 O MODELO DE BARABÁSI-ALBERT

O modelo de criação de redes livre de escala proposto por Barabási e Albert (1999) já foi alvo de análises no capítulo 2. A introdução de topologia livre de escala no modelo proposto por essa pesquisa se justifica pela tentativa de aproximar o modelo a realidade.

Embora a utilização de redes regulares permita realizar considerações teóricas sobre a influência da rede sobre o comportamento dos vértices, a adoção de uma rede livre de escala apresenta outras características importantes para o estudo em estratégia empresarial, como a possibilidade de formação de clusters e, portanto, a possibilidade de existência de equilíbrios locais que contrastam com a magnetização total do sistema apresentada pelo modelo utilizando redes regulares.

Ademais, a estrutura de sistemas econômicos e de redes reais de empresas exhibe características livres de escala conforme estudos apresentados por Kitsaki *et al* (2010), Konno

(2009), Kim *et al* (2002a e 2002b), Arora, Arayanan, Paul (2006), Sato (2004) e Barabási e Albert (1999).

A simulação desenvolve-se em uma rede livre de escala pré-existente, em que não há introdução ou remoção de vértices (empresas). A escolha de não permitir mudanças estruturais na rede, em um primeiro momento, visa permitir a comparação com os resultados exibidos através de simulações em redes regulares. Após essa etapa, são inseridas novas características complicadoras do modelo, como a introdução e remoção de vértices (empresas).

Ademais, a escolha de utilizar uma rede pré-existente permite analisar o surgimento de estratégias de sustentabilidade e analisar em quais condições uma rede constituída de elementos com estados aleatórios converge para cenários de adoção majoritária de sustentabilidade.

O modelo, portanto, gera uma rede de um número pré-determinado de vértices para, então, realizar as simulações sobre tal estrutura. O processo é detalhado como se segue:

O modelo é iniciado com dois vértices conectados por uma aresta. Depois, é constituído um *loop* que insere novos vértices ao sistema até que o número pré-determinado seja alcançado. Cada vértice adicionado escolhe um nó para conectar-se segundo o mecanismo de *preferential attachment*, ou seja, a probabilidade do novo vértice se conectar a um determinado vértice já existente é proporcional ao grau de conectividade desse vértice.

Os estados de todos os vértices são escolhidos aleatoriamente, podendo ser $+1$ (emprega estratégias de sustentabilidade) ou -1 (não emprega tais estratégias).

Com a rede criada e os estados definidos, é realizada a simulação da mudança dos estados utilizando-se a probabilidade do modelo de Ising. A intensidade de interação e o campo externo são mantidos constantes durante todo o processo.

As ligações entre os vértices não são direcionais, o que implica que a vizinhança de um vértice é constituída por todos os outros ligados a ela, sem que haja diferenciação de ligação de entrada ou saída.

Os resultados da incorporação de topologia livre de escala ao modelo é apresentada em discutida na seção 6.2.

6.3 O MODELO DE ITO E KANEKO

Em 2002, Junji Ito e Kunihiko Kaneko apresentaram um modelo abstrato de formação espontânea de uma estrutura em rede de unidades caóticas com intensidade de conexão variável através de um mapa logístico globalmente acoplado.

O modelo original considera uma rede de N unidades dinâmicas que interagem entre si de acordo com uma intensidade de interação que altera-se no tempo. A dinâmica das unidades e das intensidades de interação é descrita através de mapas em tempos discretos. O valor da i -ésima unidade ($1 \leq i \leq N$) no tempo n é definido por:

$$x_{n+1}^i = f \left[(1 - c)x_n^i + c \sum_{j=1}^N w_n^{ij} x_n^j \right]$$

A função que provê a dinâmica das unidades é o mapa logístico

$$f(x) = ax(1 - x)$$

A utilização do mapa logístico permite analisar comportamentos periódicos ou caóticos, de acordo com o parâmetro a . Além disso, permite definir um valor contínuo para unidade no intervalo entre 0 e 1. Esse modelo, portanto, permite aproximar os resultados dessa pesquisa a situações reais, considerando valores contínuos para representar o êxito na implementação de estratégias de sustentabilidade. Ao mesmo tempo, nos permite realizar simulações diferentes tipos de comportamento de acordo com o parâmetro a .

O parâmetro c representa a intensidade da influência das outras unidades na dinâmica da unidade i ($0 < c < 1$). Tal parâmetro permite-nos regular o processo decisório da unidade quanto a sua disposição de acatar a opinião da maioria (quando $c = 1$) ou descartá-la, mantendo sua posição atual (quando $c = 0$). Dessa forma, é possível simular cenários para diferentes níveis de influência dos pares.

A intensidade de interação entre as unidades é definida para cada ligação e altera-se no tempo de acordo com a similaridade entre os nós conectados. Tal intensidade é considerada na dinâmica através do parâmetro w_n^{ij} , que representa intensidade da unidade j para i na iteração n .

A definição da intensidade de interação é realizada considerando os valores x_n^i e x_n^j para conexão entre as unidades i e j e a existência de um recurso limitado no sistema utilizado para estabelecer tais ligações. Como resultado, há competição entre as conexões por esse recurso. Esse efeito é incorporado no modelo através da normalização das intensidades de conexão, conforme a equação:

$$w_{n+1}^{ij} = \frac{[1 + \delta \cdot g(x_n^i, x_n^j)]w_n^{ij}}{\sum_{j=1}^N [1 + \delta \cdot g(x_n^i, x_n^j)]w_n^{ij}}$$

Devido a normalização, w_n^{ij} geralmente não é igual a w_n^{ji} , ou seja, a rede é assimétrica.

O parâmetro δ representa a plasticidade da intensidade das interações e $g(x_n^i, x_n^j)$ é uma função monotonicamente decrescente do valor absoluto da diferença entre seus argumentos, definida como $g(x_n^i, x_n^j) = 1 - 2|x_n^i - x_n^j|$.

O valor inicial de intensidade de interação é definido como $1/(N - 1)$ para todas as conexões, obedecendo a restrição da normalização. As variáveis de estado das unidades são selecionadas do intervalo $(0,1)$ com uma medida de amostragem uniforme.

As simulações realizadas por Ito e Kaneko utilizam diferentes valores de a (que controla a dinâmica de cada unidade e pode levar o sistema ao caos) e c , que determina a força global das interações entre as unidades. Os autores fixaram o parâmetro δ (que governa a dinâmica das conexões) em 0,1, pois o comportamento do sistema demonstrou-se qualitativamente semelhante para $\delta > 0,01$ e a fixação de tal parâmetro permitiu estudar como o comportamento do sistema evolui em função dos valores dos parâmetros a e c .

Diversas características desse modelo foram introduzidas nessa pesquisa. Primeiramente, a utilização de um valor contínuo para definir as variáveis de estado das unidades permite-nos aproximar o modelo da realidade, considerando diferentes níveis de êxito da implantação de estratégias de sustentabilidade.

A utilização de intensidades de interação variáveis também permite considerar que empresas tendem a intensificar sua relação com empresas que dão a mesma importância para sustentabilidade. Ou seja, empresas que julgam sustentabilidade desimportante para o desenvolvimento de seus negócios tendem a intensificar suas ligações com outras empresas do mesmo tipo, que fornecem menores custos ao invés de menores impactos. Da mesma forma, empresas que já consolidaram suas estratégias de sustentabilidade tendem a intensificar suas ligações com outras empresas que também demonstram implantar esse tipo de estratégia, para cumprir suas metas e diminuir o risco de imagem de associar-se com empresas de alto impacto. A utilização de intensidade de interação variável também permite a introdução posterior de algoritmo de reorganização dos vértices.

Além disso, o parâmetro c permite definir qual a importância da vizinhança no processo de tomada de decisão. Para, $c = 0$ as empresas desprezam sua vizinhança, para $c = 1$ a decisão é tomada apenas com base do estado de seus vizinhos. Isso nos permite utilizar diversas outras configurações. Por exemplo, com $c = 0,5$, 50% da decisão é baseada no estado da vizinhança e o restante pelos processos internos.

Embora Ito e Kaneko utilizem uma rede em que inicialmente todos estão conectados entre si, tais característica são implantados em uma rede livre de escala pelos motivos expostos anteriormente.

Assim, avançando-se na modelagem, o modelo de Ito e Kaneko é implementado utilizando-se a intensidade de conexão variável no modelo criado no passo anterior, constituído por uma rede livre de escala em que a variável do estado das unidades é definida pelo modelo de Ising. Ou seja, ao invés de consideramos a intensidade de interação como um J fixo, passamos a considerar interação variável w_n^{ij} , em que há limite do recurso utilizado para estabelecer as conexões e que as conexões entre unidades com estados semelhantes são intensificadas. Os resultados dessa implementação são exibidos na seção 6.3.

7 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos segundo cada etapa de modelagem: (1) implementação do modelo de Ising, (2) adoção de uma rede livre de escala, e (3) implementação de intensidade de conexões variável conforme modelo de Ito e Kaneko.

Para cada etapa de modelagem foram realizadas ao menos 10.000 simulações para cada conjunto de parâmetros. Os resultados de cada etapa de modelagem permitiram a elaboração de diferentes hipóteses que são abaixo apresentadas e posteriormente discutidos.

7.1 ETAPA 1 –MODELO INICIAL BASEADO EM ISING

O modelo inicial foi elaborado utilizando o software Netlogo, utilizando um plano de 33×33 , compondo um *Toro* de 1089 vértices. Cada vértice representa uma empresa que pode implementar estratégias de sustentabilidade ($spin +1$) ou não ($spin -1$).

Em um primeiro momento, as empresas selecionam aleatoriamente se desenvolverão estratégias de sustentabilidade ou não. A cada iteração, as empresas podem reavaliar seu

comportamento, considerando sua vizinhança, o campo externo e a parcela autônoma de seu processo decisório.

A vizinhança utilizada é do tipo Von Neumann, ou seja, as empresas consideram seus quatro vizinhos ortogonalmente adjacentes. Cada rede social pode preferir a implementação ou não de estratégias de sustentabilidade, influenciando o agente central. Caso haja dois agentes de cada tipo, a rede não influencia na tomada de decisão do agente central.

Para analisar a influência da temperatura no comportamento do sistema, cada valor de temperatura foi simulado variando-se os parâmetros J (intensidade de interação) e B (campo externo), mantidos fixos durante cada simulação.

Para J , foram utilizados os valores de 1 , que reflete a intensidade de interação padrão do modelo de Ising, e $0,5$, em que a influência de um vértice sobre outro é computada pela metade. Para B foram utilizados 0 , que denota ausência de campo externo, $0,5$ e 1 . A temperatura foi variada de 0 a 10 , simulando cada conjunto de parâmetros a cada acréscimo de $0,01$ por 10.000 iterações.

O resultado do experimento consiste na média da magnetização m das 100 últimas iterações para cada conjunto de parâmetros. Os resultados para $J = 0,5$ são exibidos no Gráfico 1, enquanto os resultados para o modelo original de Ising, com $J = 1$, são exibidos no Gráfico 2.

Gráfico 1 – Resultado da simulação para rede Von Neumann com $J = 0,5$

Gráfico 2 – Resultado da simulação para rede Von Neumann com $J = 1$

A diferença entre os resultados para diferentes valores de J é o deslocamento do ponto de transição de fase, definido como temperatura crítica. Para o modelo original, a temperatura crítica é dada por:

$$T_c = \frac{2|J|}{\ln(1 + \sqrt{2})}$$

Portanto, para $J = 1$, a temperatura crítica é $2/\ln(1 + \sqrt{2}) \approx 2,27$, enquanto para $J = 0,5$, a temperatura crítica torna-se $1/\ln(1 + \sqrt{2}) \approx 1,13$. Destarte, os resultados apresentados pelas simulações mostram-se consistentes.

Para baixas temperaturas e ausência de campo externo, os vértices tendem a alinhar-se com a maioria. Ou seja, abaixo da temperatura crítica, o sistema é determinístico em relação às suas condições iniciais. Como inicialmente as empresas (representadas pelos vértices) escolham aleatoriamente se empregam ou não estratégias de sustentabilidade (se assumem valor -1 ou +1) e há um número ímpar de empresas (1089), sempre haverá uma maioria, ainda que pequena. Após um número suficiente de iterações, o sistema atinge o equilíbrio apresentando magnetização $m = 1$ ou $m = -1$, de acordo com as condições iniciais.

Por exemplo, se 570 (52,34%) das empresas decidem implementar estratégias de sustentabilidade no instante t_0 , o sistema caminhará para o equilíbrio $m = 1$ após um número suficiente de iterações.

Por essa razão, para $T < T_c$ e $B = 0$, o sistema atinge o equilíbrio em $m = -1$ ou $m = +1$ (de acordo com suas condições iniciais) após 10.000 iterações, como apresentado nos gráficos 1 e 2. Aumentando-se a temperatura para o limite de T_c , o sistema demora mais para atingir o equilíbrio. Ou seja, não é possível atingir $m = -1$ ou $m = +1$ após 10.000 iterações para valores próximos de T_c .

Esse conjunto de parâmetros nos permite definir a hipótese:

Hipótese 1a: quando a parcela autônoma do processo decisório é muito pequena ($T < T_c$) e não há qualquer constructo social que influencie as empresas a adotarem estratégias de sustentabilidade ($B = 0$), todas as empresas do sistema tendem a ter a mesma opinião quanto a adoção ou não de estratégias de sustentabilidade após período satisfatório, segundo a maioria inicial.

Com a introdução do campo externo B , o sistema tende a alinhar-se ao campo independentemente de suas condições iniciais, para baixas temperaturas. Assim, para $T < T_c$, o sistema atinge o equilíbrio em $m = -1$ ou $m = +1$, de acordo com a polarização do campo, independentemente de suas condições iniciais. Como a proporção de *spins* positivos e negativos é considerada nesse modelo sempre próxima de 50%, as 10.000 iterações são suficientes para que o sistema atinja tal equilíbrio. Dessa forma, para $T < T_c$ o sistema resultante após 10.000 iterações é o mesmo para qualquer $B > 0$. Destarte, tal conjunto de parâmetros define nova hipótese:

Hipótese 1b: quando a parcela autônoma do processo decisório é muito pequena ($T < T_c$) e há constructo social que influencie as empresas a adotarem estratégias de sustentabilidade em qualquer escala ($B > 0$), todas as empresas passam a implementar estratégias de sustentabilidade após período satisfatório.

Quando $T = T_c$ temos o ponto em que ocorre a transição de fase. Assim, para $T > T_c$ o sistema altera seu padrão de comportamento.

Gráfico 3 – Resultado de simulação acima de T_c para $B = 0$ e $J = 1$, iniciando-se com 0%, 25%, 50% e 75% de vértices com $spin +1$

Quando $T > T_c$ e $B = 0$, o sistema não tende a uma maioria, sendo caracterizado após 10.000 iterações por magnetização m próxima a zero. Para melhor analisar tal conjunto de parâmetros foi realizada nova série de simulações para quatro condições iniciais diferentes. Iniciando-se com 0%, 25%, 50% e 75% das empresas desenvolvendo estratégias de sustentabilidade, o sistema alcançou equilíbrio com $m \approx 0$. Tal resultado é apresentado no Gráfico 3. Isso nos permite inferir:

Hipótese 1c: quando a parcela autônoma do processo decisório é preponderante ($T > T_c$) e não há constructo social que influencie as empresas a adotarem estratégias de sustentabilidade ($B = 0$), aproximadamente metade das empresas passam a desenvolver estratégias de sustentabilidade, independente das condições iniciais.

Gráfico 4 – Resultado de simulação acima de T_c para $B = 0,5$ e $J = 1$, iniciando-se com 0%, 25%, 50% e 75% de vértices com $spin +1$

Já para $T > T_c$ e $B \neq 0$, o sistema tende a ordenar-se de acordo com o campo externo. Nesse conjunto de parâmetros, quanto menor a parcela autônoma de decisão (mais próximo da temperatura crítica), menor é a diferença entre a magnetização m do sistema e o campo externo B . Uma série de simulações com 0%, 25%, 50% e 75% das empresas desenvolvendo estratégias de sustentabilidade inicialmente apresentou aproximadamente o mesmo resultado, demonstrando insensibilidade do modelo às condições iniciais, conforme apresentado no Gráfico 4. Isso nos permite expor a quarta hipótese:

Hipótese 1d: quando a parcela autônoma do processo decisório é preponderante ($T > T_c$) e há constructo social que influencie as empresas a adotarem estratégias de sustentabilidade em qualquer escala ($B > 0$), o conjunto das empresas tende a seguir a influência social de forma inversamente proporcional a preponderância da parcela autônoma no processo decisório.

7.2 ETAPA 2 – UTILIZAÇÃO DE REDE LIVRE DE ESCALA

A segunda etapa do processo de modelagem consiste na implementação do modelo do passo anterior em uma rede livre de escala. Para tanto, foi utilizando o algoritmo de Barabási-Albert citado no capítulo anterior.

O processo de criação dos vértices e sua introdução na rede foi repetido até que o sistema fosse constituído de 1089 vértices e sua estrutura foi mantida fixa durante toda a simulação. As ligações entre os vértices são bidirecionais, sendo que a vizinhança de cada vértice considera todos os outros vértices a ele ligados. Cada vizinhança pode preferir a implementação ou não de estratégias de sustentabilidade, influenciando o agente central.

Da mesma forma, cada vértice representa uma empresa que pode implementar estratégias de sustentabilidade ($spin + 1$) ou não ($spin - 1$).

O modelo também foi estudado através da variação dos parâmetro J (intensidade de interação) e B (campo externo) mantidos fixos durante toda a simulação para temperaturas de 0 a 10. Para J foram utilizados os valores de 1 e 0,5. Para B foram utilizados 0 (ausência de campo externo), 0,5 e 1.

O resultado do experimento consiste na média da magnetização m das 100 últimas iterações para cada conjunto de parâmetros. Os resultados para $J = 0,5$ são exibidos no Gráfico 5, enquanto os resultados para o modelo original de Ising, com $J = 1$, são exibidos no Gráfico 6.

Gráfico 5 – Resultado da simulação para rede livre de escala com $J = 0,5$

Gráfico 6 – Resultado da simulação para rede livre de escala com $J = 1$

Para baixas temperaturas e ausência de campo externo, os vértices tendem a alinhar-se com a maioria em certa medida após um número suficiente de iterações. Todavia, o sistema não é capaz de atingir completa maioria com magnetização $m = 1$ ou $m = -1$, mesmo após 10.000 iterações. O número de empresas que segue a maioria aumenta na medida em que a parcela autônoma no processo decisório também aumenta.

A principal diferença apresentada pela utilização de uma rede livre de escala é o surgimento de ótimos locais, em que alguns clusters encontram estados de equilíbrio diferentes do equilíbrio do sistema (ótimo global).

Ou seja, ainda que a tendência seja o sistema alcançar equilíbrio com $m = \pm 1$, algumas unidades podem assumir valores opostos (escolha de um ótimo local diferente do ótimo global). Isso ocorre porque em alguns clusters a influência exercida pelos vértices entre si reforça o estado por eles escolhidos e é superior a influência do campo externo (que no caso é nulo) e outros agentes do sistema. Essa característica ocorre principalmente quando o cluster possui poucas ligações com o restante do sistema (sofrendo pouca influência dos outros vértices) e o campo externo B não é suficiente para contrastar com a intensidade de acoplamento J entre eles. Essa característica também é evidente na simulação utilizando $B = 0,5$ apresentada no Gráfico 6.

A utilização desse modelo em rede livre de escala permite, portanto, considerar a existência de setores econômicos em que suas empresas constituintes optam pelo

desenvolvimento de estratégias diferentes das escolhidas pela maioria do sistema. Ou seja, em um sistema denotado pela emergência de estratégias de sustentabilidade, alguns setores ainda optam por não adotá-las.

Esse conjunto de parâmetros nos permite definir a hipótese:

Hipótese 2a: quando a parcela autônoma do processo decisório é muito pequena ($T < T_c$) e não há qualquer constructo social que influencie as empresas a adotarem estratégias de sustentabilidade ($B = 0$), as empresas tendem a seguir a maioria inicial de seus vizinhos (ótimo local), sendo o número de empresas que adotam estratégias de sustentabilidade diretamente proporcional ao aumento da parcela autônoma do processo decisório.

Com a introdução do campo externo B , o sistema tende a alinhar-se ao campo independentemente de suas condições iniciais, para baixas temperaturas. Todavia, para que o sistema atinja o equilíbrio em $m = \pm 1$, a influência do campo externo deve sobrepor a tendência do sistema de alguns clusters apresentarem equilíbrios contrastantes. Para $B = 1$, todos os vértices assumem $spin +1$ mesmo quando não há parcela autônoma no processo decisório ($T = 0$). Já quando a influência do campo é menor ($B = 0,5$ por exemplo) o sistema exibe uma tendência a alinhar-se com o campo, mas alguns *clusters* decidem pela orientação oposta. Mantida a baixa influência do campo externo, é necessário considerar maior participação da parcela autônoma no processo decisório ($T \rightarrow T_c$) para que seja possível alguns vértices de tais *clusters* decidirem pelo alinhamento ao campo. Essa situação pode ser analisada através da comparação dos resultados das simulações com $B = 0,5$ e $B = 1$ no Gráfico 6.

Assim, para $T < T_c$, o sistema atinge o equilíbrio próximo a $m = \pm 1$ apenas quando a influência do campo externo é suficientemente alta, independentemente de suas condições iniciais.

Destarte, tal conjunto de parâmetros define nova hipótese:

Hipótese 2b: quando a parcela autônoma do processo decisório é muito pequena ($T < T_c$) e há constructo social que influencie as empresas a adotarem estratégias de sustentabilidade em qualquer escala ($B > 0$), a adoção massiva de estratégias de sustentabilidade pelas empresas fica condicionada a intensidade da influência do constructo social (B) pois alguns setores econômicos ainda rejeitam sua implementação.

Gráfico 7 – Resultado de simulação acima de T_c para $B = 0$ e $J = 1$, iniciando-se com 0%, 25%, 50% e 75% de vértices com $spin +1$

Quando $T = T_c$ temos o ponto em que ocorre a transição de fase. Assim, para $T > T_c$ o sistema altera seu padrão de comportamento.

Quando $T > T_c$ e $B = 0$, o sistema também não tende a uma maioria em redes livre de escala, sendo caracterizado após 10.000 iterações por magnetização m próxima a zero. Iniciando-se com 0%, 25%, 50% e 75% das empresas desenvolvendo estratégias de sustentabilidade, o sistema alcançou equilíbrio com $m \approx 0$, como apresentado no Gráfico 7. Esse quadro reforça a hipótese 1c:

Hipótese 1c: quando a parcela autônoma do processo decisório é preponderante ($T > T_c$) e não há constructo social que influencie as empresas a adotarem estratégias de sustentabilidade ($B = 0$), aproximadamente metade das empresas passam a desenvolver estratégias de sustentabilidade, independente das condições iniciais.

Gráfico 8 – Resultado de simulação acima de T_c para $B = 0,5$ e $J = 1$, iniciando-se com 0%, 25%, 50% e 75% de vértices com $spin +1$

Já para $T > T_c$ e $B \neq 0$, o sistema tende a ordenar-se de acordo com o campo externo. A introdução do campo externo desloca o equilíbrio do sistema para uma magnetização m mais próxima do campo externo utilizado B .

Assim como no experimento utilizando uma rede regular, a diferença entre a magnetização m do sistema e o campo externo B é menor quanto menor a parcela autônoma no processo decisório (mais próximo da temperatura crítica). Simulações realizadas com 0%, 25%, 50% e 75% das empresas inicialmente desenvolvendo estratégias de sustentabilidade apresentou aproximadamente o mesmo resultado, demonstrando insensibilidade do modelo às condições iniciais, conforme por ser visto no Gráfico 8.

Destarte, tal conjunto de parâmetros corrobora a hipótese 1d:

Hipótese 1d: quando a parcela autônoma do processo decisório é preponderante ($T > T_c$) e há constructo social que influencie as empresas a adotarem estratégias de sustentabilidade em qualquer escala ($B > 0$), o conjunto das empresas tende a seguir a influência social de forma inversamente proporcional a preponderância da parcela autônoma no processo decisório.

7.3 ETAPA 3 – UTILIZAÇÃO DE INTENSIDADES DE INTERAÇÃO VARIÁVEIS

A terceira etapa do processo de modelagem parte da premissa de que as empresas que desenvolvem estratégias de sustentabilidade tendem a buscar fornecedores que também adotem esse tipo de estratégia (em busca de menores riscos e impactos, por exemplo). As empresas de opinião oposta não são favorecidas pelo primeiro grupo e tendem a efetuar trocas comerciais entre si.

Para tanto, o modelo do passo anterior foi considerado utilizando intensidades de interação variáveis. Ao invés de fixar o valor para todas as conexões através do parâmetro J , é utilizada um valor para cada conexão considerando-se os valores dos vértices que a compõe.

A dinâmica da interação entre as unidades é dada pela formula apresentada por Ito e Kaneko (2002):

$$w_{n+1}^{ij} = \frac{[1 + \delta \cdot g(x_n^i, x_n^j)] w_n^{ij}}{\sum_{j=1}^N [1 + \delta \cdot g(x_n^i, x_n^j)] w_n^{ij}}$$

O valor inicial de intensidade de interação é definido como $1/(N - 1)$ para todas as conexões, obedecendo a restrição da normalização. O valor é utilizado na dinâmica de definição dos valores dos vértices (*spins*) através da substituição do parâmetro J . O resultado da simulação desse modelo é apresentada no Gráfico 10.

Gráfico 10 – Resultado de simulação utilizando-se intensidades de interação variável em rede livre de

escala

Os resultados apresentados por esse modelo são aproximadamente os mesmos resultados apresentados pela etapa anterior com $J = 0,5$ em rede livre de escala. Isso ocorre porque o valor médio da intensidade de interação do sistema torna-se aproximadamente 0,5. Ou seja, embora a variação do parâmetro possa definir o comportamento de uma empresa específica (tornando-a líder ou seguidora, por exemplo), não é um atributo que possa alterar o comportamento global do sistema.

Tal resultado ilustra um aspecto recorrente na literatura sobre o processo de modelagem, em que nem sempre um modelo mais complicado apresenta resultados mais relevantes. O esforço de modelagem deve ser voltado à tentativa de gerar resultados que se aproximem da realidade, sem que isso implique em fazer do modelo uma replicação fiel ao fenômeno em estudo.

Portanto, a utilização da dinâmica provida pelo artigo de Ito e Kaneko não apresenta novas propriedades que justifiquem a elaboração de novas hipóteses.

8 CENÁRIOS PARA A ADOÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE SUSTENTABILIDADE

Tendo como base os resultados apresentados, são elaborados quatro cenários prospectivos em relação à adoção de estratégias de sustentabilidade pelo empresariado. Para tanto, também são considerados os relatórios do IPCC em relação às mudanças climáticas.

8.1 CENÁRIO A

O Cenário A baseia-se na *Hipótese 1d* advinda dos resultados apresentados dos modelos:

Hipótese 1d: quando a parcela autônoma do processo decisório é preponderante ($T > T_c$) e há constructo social que influencie as empresas a adotarem estratégias de sustentabilidade em qualquer escala ($B > 0$), o conjunto das empresas tende a seguir a influência social de forma inversamente proporcional a preponderância da parcela autônoma no processo decisório.

No Cenário A, as mudanças climáticas apresentadas pelos relatórios do IPCC se confirmam e alterações no modo produtivo tornam-se imperativas na iminência de impactos mais pronunciados da mudança climática sobre o modo de produção contemporâneo. Nesse sentido, há uma intensificação da pressão governamental sobre o setor privado com vistas à mitigação de emissões de gases de efeito estufa e outros impactos socioambientais.

Não obstante, a nova conjuntura ambiental aumenta significativamente o risco socioambiental de grande parte dos empreendimentos privados, além de afetar a disponibilidade de utilização de recursos naturais. Com isso, a pressão de diversos *stakeholders* da empresa (como acionistas, bancos e fornecedores) intensifica-se, fomentando a adoção de estratégias de adaptação socioambiental para assegurar a perenidade do empreendimento.

O Cenário A, portanto, é caracterizado pela existência de um constructo social pronunciado que influencia a tomada de decisão das empresas. Assim, o conjunto amplo de *stakeholders*, como clientes, organizações não governamentais, mídias e outros atores sociais influenciam positivamente a administração a implementar estratégias e procedimentos que visem mitigar seus impactos socioambientais e adaptar-se à nova conjuntura.

Tal influência social é absorvida e considerada pelas empresas em um processo decisório denotado por uma razão ótima entre as pressões que sofre de outras empresas e sua

individualidade. Esse cenário, portanto, é factível quando a parcela autônoma do processo decisório é suficiente (acima da temperatura crítica).

Nota-se ainda que quanto maior é o peso da parcela autônoma no processo decisório, menor é o nível de adoção de estratégias de sustentabilidade do sistema. Ou seja, à medida que a individualidade cresce, o sistema se afasta do cenário mais favorável. Como a pressão realizada sobre as empresas aumenta com os impactos ambientais sentidos, tal parcela autônoma tende a diminuir no primeiro momento, pois adaptar-se implica na asseguuração de sua perenidade. Após a implantação inicial de tais estratégias, a individualidade cresce, pois as empresas já consideram questões socioambientais nos seus processos internos e sofrem menos pressões externas em relação ao tema. Ressalta-se que o crescimento da parcela autônoma na decisão ocorre apenas quando altos níveis de sustentabilidade são conquistados.

Portanto, o Cenário A é mais favorável (do ponto de vista de adoção massiva de estratégias de sustentabilidade) quanto maior a influência social e menor a parcela autônoma no processo decisório.

8.2 CENÁRIO B

O Cenário B baseia-se na *Hipóteses 1d e 2b* advinda dos resultados apresentados dos modelos:

Hipótese 1b: quando a parcela autônoma do processo decisório é muito pequena ($T < T_c$) e há constructo social que influencie as empresas a adotarem estratégias de sustentabilidade em qualquer escala ($B > 0$), todas as empresas passam a implementar estratégias de sustentabilidade após período satisfatório.

Hipótese 2b: quando a parcela autônoma do processo decisório é muito pequena ($T < T_c$) e há constructo social que influencie as empresas a adotarem estratégias de sustentabilidade em qualquer escala ($B > 0$), a adoção massiva de estratégias de sustentabilidade pelas empresas fica condicionada a intensidade da influência do constructo social (B) pois alguns setores econômicos ainda rejeitam sua implementação.

Em linha com o Cenário A, este cenário também considera que as mudanças climáticas apresentadas pelos relatórios do IPCC se confirmam e alterações no modo produtivo tornam-se imperativas. Com isso, torna-se grande a pressão efetuada sobre as empresas por seus diversos *stakeholders*.

Esse Cenário refere-se a um momento inicial após os efeitos das mudanças climáticas tornarem-se mais pronunciados e governos implementarem novas regulações. Como a pressão sobre as empresas torna-se muito alta, a parcela autônoma do processo decisório anula-se ou ao menos diminui. A adoção de estratégias de sustentabilidade com vistas à mitigação de impactos socioambientais e adaptação à nova conjuntura é maciça, exceto por alguns setores.

Apesar de grande aderência das empresas às pressões sofridas, algumas empresas ainda rejeitam sua implementação por estarem em setores (*clusters*) de pouca influência externa. Essas empresas referem-se a setores tradicionalmente necessários para a atividade econômica e altos impactos socioambientais, como empresas de energia e siderurgia.

O Cenário B, portanto, é o segundo mais favorável à implementação de estratégias de sustentabilidade, por prever uma adoção em larga escala de empresas e ainda considerar alguns setores refratários.

8.3 CENÁRIO C

O Cenário C baseia-se na *Hipótese 1c* advinda dos resultados apresentados dos modelos:

Hipótese 1c: quando a parcela autônoma do processo decisório é preponderante ($T > T_c$) e não há constructo social que influencie as empresas a adotarem estratégias de sustentabilidade ($B = 0$), aproximadamente metade das empresas passam a desenvolver estratégias de sustentabilidade, independente das condições iniciais.

O Cenário C considera que as mudanças climáticas apresentadas pelos relatórios do IPCC não se confirmam e, portanto, não há alteração na pressão sofrida por empresas em relação à implementação de estratégias de sustentabilidade.

Ainda que não haja aumento da influência social sobre o setor produtivo, algumas empresas implementam estratégias de diminuição de impactos socioambientais para reduzir seus riscos de imagem e melhor relacionar-se com seus *stakeholders*. Além de não sofrerem pressões mais intensas que as atuais, o Cenário C considera que há grande individualidade das empresas, ou seja: as empresas detêm processos decisórios mais rígidos e consideram a opinião de sua rede de contatos de maneira diminuta.

Essa configuração faz com que muitas empresas encontrem ganhos na adoção de estratégias socioambientais, enquanto outras decidem pelo direcionamento de recursos para outras operações.

O Cenário C, portanto, é menos favorável à implementação de estratégias de sustentabilidade em relação aos cenários anteriores ao evidenciar uma situação de manutenção das condições presentes.

8.4 CENÁRIO D

O Cenário D baseia-se nas *Hipóteses 1a e 2a* advinda dos resultados apresentados dos modelos:

Hipótese 1a: quando a parcela autônoma do processo decisório é muito pequena ($T < T_c$) e não há qualquer constructo social que influencie as empresas a adotarem estratégias de sustentabilidade ($B = 0$), todas as empresas do sistema tendem a ter a mesma opinião quanto a adoção ou não de estratégias de sustentabilidade após período satisfatório, segundo a maioria inicial.

Hipótese 2a: quando a parcela autônoma do processo decisório é muito pequena ($T < T_c$) e não há qualquer constructo social que influencie as empresas a adotarem estratégias de sustentabilidade ($B = 0$), as empresas tendem a seguir a maioria inicial de seus vizinhos (ótimo local), sendo o número de empresas que adotam estratégias de sustentabilidade diretamente proporcional ao aumento da parcela autônoma do processo decisório.

O Cenário D versa sobre a ausência de qualquer influência social sobre a atividade das empresas. Esse cenário, portanto, é factível com a total refutação dos modelos apresentados pelo IPCC. Ainda assim, ressalta-se que ainda haveriam pressões relativas a outros impactos socioambientais que não a emissão de gases de efeito estufa. Como o aquecimento global pressiona empresas e governos a implementarem estratégias de mitigação de diferentes impactos e para simplificação do modelo, tal característica não foi considerada.

Não havendo influência sobre as empresas e sendo a opinião da rede preponderante no processo decisório das empresas, o sistema tende a orientar-se conforme a maioria inicial de seus vizinhos. Esse Cenário, portanto, contempla a existência de setores em que a adoção de estratégias socioambientais é maciça, bem como setores que não empregam estratégias de mitigação de impactos socioambientais.

O Cenário D, portanto, é o menos favorável à implementação de estratégias de sustentabilidade em relação aos cenários anteriores ao evidenciar uma situação em que apenas alguns setores econômicos investem na mitigação de impactos socioambientais.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os cenários apresentados evidenciam como os modelos de sistemas complexos podem prover respostas quanto a questões econômicas, ao relacionarem diferentes variáveis na evolução do sistema em estudo.

Além de serem “janelas para o futuro”, os cenários elaborados a partir dos resultados do modelo também podem ser utilizados para explicar o crescimento hodierno da adoção de estratégias de sustentabilidade.

Apesar dos impactos ambientais da atividade produtiva serem conhecidos desde o início da Revolução Industrial, a teoria do Efeito Estufa desde 1824 e o conceito de externalidades ter sido elaborado em 1932, apenas recentemente os esforços com vistas à mitigação de impactos ambientais estão sendo incorporados na agenda empresarial.

Tal situação é muito semelhante à apresentada pelo Cenário D, em que todas as empresas tendem a seguir a maioria. Iniciando o sistema com nenhuma empresa implementado estratégias socioambientais e na ausência de influências sociais, o cenário permanece estável com nenhuma estratégia sendo implantada.

Quando os impactos socioambientais tornam-se mais pronunciados, cria-se um constructo social pró-sustentabilidade, aumentando a influência social sobre as empresas. Assim, algumas empresas iniciam a elaboração de estratégias de sustentabilidade, majoritariamente devido a pressões da sociedade e mídia ou após regulação governamental. Essa pressão acaba por estender-se a setores inteiros, fazendo com que haja setores com níveis mais altos de sustentabilidade em um sistema de altos impactos socioambientais.

Com um aumento da pressão regulatória de governos e uma maior percepção dos impactos socioambientais sofridos em decorrência da atividade produtiva, a influência social sobre a tomada de decisão das empresas intensifica-se. Com isso, o sistema caminha para uma situação semelhante aos cenários A e B, em que o nível de adoção desse tipo de estratégia é mais pronunciado.

Os resultados demonstram, portanto, como um sistema pode sair de um estado inercial e alterar-se drasticamente com a alteração de algumas variáveis. Ademais, possíveis mudanças repentinas na influência social podem ocorrer em virtude de mudanças na percepção sobre os impactos socioambientais, podendo originar choques no sistema (alteração abrupta de cenário) apresentado um estado de criticalidade auto-organizada.

Além disso, há de se considerar que diversas mudanças na sociedade proporcionam um crescimento mais rápido da influência social, visto que as pessoas estão se tornando mais aptas e acostumadas a utilizar diferentes ferramentas para estabelecer seus próprios juízos sobre questões socioambientais. Não obstante, também surgem novos meios e ferramentas para efetuar pressão sobre empresas e setores. Dessa forma, o Cenário A torna-se mais factível quando consideradas altas a probabilidade de ocorrência de mudanças climáticas e de aumento da influência social sobre as empresas.

Na análise dos cenários também há de se considerar que as mudanças climáticas também implicam em aumento de risco de investimentos de capital em decorrência do rareamento da biodisponibilidade de recursos para uso produtivo e intensificação das regulações para explorá-los. Com isso, o tema tende a ser introduzido nas estratégias das empresas quando essa situação mostrar-se relevante para que se adaptem a nova conjuntura. Como demonstrado, essa mudança em algumas empresas passa a deter efeitos sobre toda sua vizinhança.

Os cenários apresentados demonstram uma realidade futura genérica, cujas linhas gerais podem ser observadas e incluídas nos processos de prospecção de cenários e planejamento estratégico de diferentes organizações. A principal característica que os modelos gerados e analisados exibem é a caracterização do sistema como complexo, demonstrando sua capacidade de exibir padrões organizados de comportamento a partir de regras simples de interação entre agentes. Não obstante, também evidencia a pertinácia do conceito de criticalidade organizada para análise de alterações em variáveis utilizadas e sua capacidade de alteração da dinâmica do sistema.

Destarte, os modelos mostraram-se adequados para a análise de sistemas sociais, mesmo quando há pouca informação disponível, principalmente em relação a sua pertinácia para a elaboração de cenários prospectivos. Espera-se, pois, que tais modelos possam subsidiar a criação de novas ferramentas de análise de sistemas sociais, mormente econômicos, e auxiliem no desenvolvimento da aplicação dos conhecimentos gerados da área de sistemas complexos em pesquisas sociais.

REFERÊNCIAS

ALBERT, R.; BARABÁSI, A.-L. Statistical mechanics of complex networks. **Reviews of modern physics**, APS, v. 74, n. 1, p. 47–97, 2002.

ARORA, N.; NARAYANAN, B.; PAUL, S. Financial Influences and Scale-Free Networks. In: ALEXANDROV, V.; VAN ALBADA, G., *et al* (Ed.). **Computational Science – ICCS 2006**: Springer Berlin Heidelberg, v.3991, 2006. cap. 7, p.16-23. (Lecture Notes in Computer Science). ISBN 978-3-540-34379-0.

AYRES, R.; KNEESE, A. Production, Consumption, and Externalities. **The American Economic Review**. Vol. 59, No. 3.1969. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/1808958>>. Acesso em 13 jun. 2013.

BAK, P. **How nature works : the science of self-organized criticality**. New York, NY, USA: Copernicus, 1996.

BAK, P.; TANG, C.; WIESENFELD, K. Self-organized criticality: An explanation of the 1/f noise. **Physical Review Letters**, v. 59, n. 4, p. 381-384, 1987.

BARABÁSI, A.-L. **Scale-free networks**: a decade and beyond. *Science*, v. 325, n. 5939, p. 412–3, jul. 2009. ISSN 1095-9203. Disponível em: <[doi:10.1126/science.1173299](https://doi.org/10.1126/science.1173299)>.

BARABÁSI, A.-L.; ALBERT, R. **Emergence of Scaling in Random Networks**. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 286, n. 5439, p. 509–512, out. 1999. ISSN 00368075. Disponível em: <[doi:10.1126/science.286.5439.509](https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509)>.

BARABÁSI, A.-L.; BONABEAU, E. Scale-free networks. **Scientific American**, v. 288, n. 5, p. 60–9, maio 2003. ISSN 0036-8733.

BARBIERI, J. C.; CAJAZEIRA, J. E. R. **Responsabilidade social empresarial e empresa sustentável**: da teoria à prática. São Paulo, SP: Saraiva, 2009.

BARNES, P. **Capitalism 3.0**: a guide to reclaiming the commons. San Francisco: Berrett-Koehler Publishers, 2006.

BERGER, G. «**L’attitude prospective**». *L’Encyclopédie française*, tome XX, Société nouvelle de L’Encyclopédie française 1958.

BOLLOBAS, B.; NIKIFOROV, V. Books in graphs. **ArXiv Mathematics e-prints**, p. 5080, May 1, 2004. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2004math.....5080B>>.

BORGER, Fernanda Gabriela. **Considerações Teóricas sobre Gestão da Responsabilidade Social Empresarial**. 2009. Disponível em: <http://www.nesa.org.br/pdf/Artigos%20Cient%C3%ADficos/aula_Fernanda_03_04.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2013.

BORGER, F. G.; KRUGLIANSKAS, I. Corporate social responsibility and environmental and technological innovation performance: case studies of Brazilian companies. **Int. J. Technology, Policy and Management**, v. 6, n. 4, p. 399-412, 2006.

BRANCO, M. C.; RODRIGUES, L. L. Corporate social responsibility and resource-based perspectives. **Journal of Business Ethics**, n. 69, p. 111-132, 2006.

BUARQUE, S.C. **Metodologias e Técnicas de Construção de Cenários Globais e Regionais**. Brasília: IPEA, 2003

CECHIN, A. **Georgescu-Roegen e o desenvolvimento sustentável: diálogo ou anátema?** Dissertação de Mestrado. São Paulo: PROCAM/USP, 2009.

CETINKAYA, B. **Developing a Sustainable Supply Chain Strategy**. In: C. Tyssen et al., Sustainable Supply Chain Management. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011.

CHOPARD, B. **Cellular Automata Modeling of Physical Systems**. In: Encyclopedia of complexity and systems science. [S.l.]: Springer, 2009. p. 865–892. ISBN 978-0-387-30440-3.

COSTA, L. **O Modelo de Ising 2D**. Disponível em <<http://www.fig.if.usp.br/~lucmod/science/ising2d.pdf>>. Acesso em 05 set. 2012.

ERDOS, P.; RÉNYI, A. **On the evolution of random graphs**. Publications of the Mathematical Institute of Hungarian Academy of Sciences, CiteSeer, v. 5, p. 17–61, 1960

FAVA, J. A. Can ISO life cycle assessment standards provide credibility for LCA? **Building Design & Construction**, p. 17-20, nov. 2005.

GLOBAL REPORTING INITIATIVE. **About Sustainability Reporting**. 2012. Disponível em <<https://www.globalreporting.org/information/sustainability-reporting/Pages/default.aspx>>. Acesso em 10 out. 2012.

GODET, M. The Art of Scenarios and Strategic Planning: Tools and Pitfalls. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 65, n. 1, p. 3-22, 2000.

GODET, M.; DURANCE, P.; GERBER, A. (2008) **Strategic foresight: la prospective: use and misuse of scenario building**. Paris: LIPSOR, 143 pp.

GROSS, T; SAYAMA, H. **Adaptive networks: Theory, models and applications**. Cambridge: Springer. 2009.

GUDMUNDSSON, J. **Monte Carlo method and the Ising model**. Disponível em <<https://notendur.hi.is/jeg1/Ising.pdf>>. Acesso em 05 set. 2012.

HOUAISS, A.; VILLAR, M.S. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa** 2009. Rio de Janeiro: Objetiva, 2009. 1986.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007**. 2007. Disponível em:

<http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml#1>. Acesso em 12 set. 2012.

ISING, E. Beitrag zur Theorie des Ferromagnetismus. **Zeitschrift für Physik**, v. 31, n. 1, p. 253-258, 1925/02/01 1925.

ITO, J. KANEKO, K. Spontaneous Structure Formation in a Network of Chaotic Units with Variable Connection Strengths. **Physical Review Letters**. v. 88, n. 2. 2002. Disponível em <<http://prl.aps.org/pdf/PRL/v88/i2/e028701>>. Acesso em 10 jun. 2013.

JAMALI, D. The CSR of MNC subsidiaries in developing countries: global, local, substantive ou diluted? **Journal of Business Ethics**, v. 93, p. 181-200, 2010.

KIM, H.-J. et al. Scale-Free Network in Stock Markets. **J. Korean Phys.Soc.** v. 40, n. 6. 2002a.

KIM, H.-J. et al. Weighted Scale-Free Network in Financial Correlations. **Journal of the Physical Society of Japan**, v. 71, p. 2133, September 1, 2002b.

KITSACK, M. et al. Scale-free models for the structure of business firm networks. **Physical Review E**, v. 81, n. 3, p. 036117, 03/29/ 2010.

KOLK, A.; WALHAIN, S.; van de WATERINGEN, S. Environmental reporting by the Fortune 250: Exploring the influence of nationality and sector. **Business Strategy and the Environment**, 10, 15-28. 2001.

KONNO, T. Network Structure of Japanese Firms. Scale-Free, Hierarchy, and Degree Correlation: Analysis from 800,000 Firms. **Economics: The Open-Access, Open Assessment E-Journal**, v. 3, n. 2009-31, 07/01 2009.

KLEIN, P. **Why has corporate social responsibility stalled?** 2012. Disponível em: <http://www.forbes.com/sites/csr/2012/10/22/why-has-corporate-social-responsibility-stalled/?goback=%2Egde_82951_member_177660674>. Acesso em: 13 de jun. 2013.

KPMG. **KPMG International Survey of Corporate Responsibility Reporting 2011**. 2011. Disponível em < <http://www.kpmg.com/PT/pt/IssuesAndInsights/Documents/corporate-responsibility2011.pdf>>. Acesso em 10 jul. 2013.

NAVARRETE, C.; CASTAÑEDA, C.; ALFONSECA, M.; ORTEGA, A.; ANGUIANO, E. **Efficient parallel implementation of Potts model**. 2008. Disponível em <http://para08.idi.ntnu.no/docs/submission_13.pdf>. Acesso em 1 jul 2013.

MATTAROZZI, V.; TRUNKL, C. **Sustentabilidade no Setor Financeiro: Gerando Valor e Novos Negócios**. São Paulo: Annablume; Brasília: BNDES, 2007.

_____. **Sustentabilidade dos Negócios no Setor Financeiro: Um caso prático**. São Paulo: Editora SENAC São Paulo, 2008.

MOURA, P. C. **Construindo o futuro: o impacto global do novo paradigma**. MAUAD, 1994. ISBN 9788585756017.

NEWMAN, M.; BARABÁSI, A.-L.; WATTS, D. **The structure and dynamics of networks**. [S.l.]: Princeton University Press, 2006. ISBN 978-0-691-11356-2.

MAGEE, E. **As Idéias de Popper**. São Paulo: Cultrix, Editora da Universidade de São Paulo, 1974.

MILLER, J.; PAGE, S. **Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life**. Princeton University Press, 2007.

MITCHELL, M. **Complexity: A Guided Tour**. OUP USA, 2009.

PEATIE, K.; CRANE, A. Green marketing: legend, myth, farce or prophesy? **Qualitative Market Research**, v. 8, n. 4, p. 357-370, 2005.

POPPER, K. **A Lógica da Pesquisa Científica**. São Paulo: Editora Cultrix, 2006.

PORTER, M. A.; GLEESON, J. P. Dynamical Systems on Networks: A Tutorial. **ArXiv e-prints**, v. 1403, p. 7663, March 1, 2014 2014. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2014arXiv1403.7663P>>.

PORTER, M. E.; KRAMER, M. R. Strategy & society: the link between competitive advantage and corporate social responsibility. **Harvard Business Review**, n. 84, p. 78-92, 2006.

PORTER, M. E.; van der LINDE, C. Green and competitive. **Harvard Business Review**, v. 73, n.5, p. 120-134, set./out. 1995.

PORTO, R. P. Os bancos e a responsabilidade ambiental. **Revista da ESPM**, v. 17, ano 16, n. 1, p. 152-155, jan./fev. 2010.

RAILSBACK, S.; GRIMM, V. **Agent-Based and Individual-Based Modeling: a practical introduction**. Princeton University Press. 2012.

RICHARDSON, B. J. Keeping ethical investment ethical: regulatory issues for investing for sustainability. **Journal of Business Ethics**, n. 87, p. 555-572, 2009.

SATO, T. **Scale-Free Network Business Development Strategy** 2004. Disponível em: <<http://tomsato.jp/scalefree.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2014.

SCHROEDER, Jocimari; SCHROEDER, Ivanir. Responsabilidade social corporativa: limites e possibilidades. **RAE-eletrônica**, v. 3, n. 1, Art. 1, jan./jun. 2004. Disponível em: <<http://rae.fgv.br/rae-eletronica/vol3-num1-2004/responsabilidade-social-corporativa-limites-possibilidades>>. Acesso em: 03 jul. 2013.

SILVA, G. A.; KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida. In: VILELA JÚNIOR, A.; DEMAJOROVIC, J. (org.). **Modelos e ferramentas de gestão ambiental** – desafios e perspectivas para as organizações. 1 ed. São Paulo: Editora SENAC São Paulo, 2006.

SMITH, A. **A Riqueza das Nações**: investigação sobre sua natureza e suas causas, São Paulo, Nova Cultural, 2ª edição. 1985.

SMITH et al. **Recasting Paradigm Shift**: “True” Sustainability and Complex Systems. *Human Ecology Review*, Vol. 18, No. 1, 2011.

SOLOMONOFF, R.; RAPOPORT, A. Connectivity of random nets. **Bulletin of Mathematical Biology**, Springer, v. 13, n. 2, p. 107–117, 1951.

STEAD, J. G.; STEAD, E. Eco-enterprise strategy: standing for sustainability. **Journal of Business Ethics**, v. 24, p. 313–329, abr. 2000.

STERN REVIEW. **The economics of climate change** (Executive Summary). 2006. Disponível em: <tern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm - 20k>. Acesso em: 26 de jun. 2013.

THE EQUATOR PRINCIPLES ASSOCIATION. **The Equator Principles**. 2011. Disponível em < http://www.equator-principles.com/resources/equator_principles_all_languages.zip>. Acesso em 12 mai. 2013.

WATTS, D. J. A simple model of global cascades on random networks. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 99, n. 9, p. 5766–5771, April 30, 2002.

WATTS, D. J.; STROGATZ, S. H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 393, n. 6684, p. 440–2, jun. 1998. ISSN 0028-0836. Disponível em: <doi:10.1038/30918>.

WILENSKY, U. **NetLogo Preferential Attachment model**. 2005. Disponível em <<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/PreferentialAttachment>>. Acesso em 10 jun 2013.

_____. **NetLogo**. 1999. Disponível em <<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>>. Acesso em 10 jun 2013

ZAKLAN, G.; WESTERHOFF, F.; STAUFFER, D. Analysing tax evasion dynamics via the Ising model. **Journal of Economic Interaction and Coordination**. v. 4. 2009.