

A contribuição da teoria da complexidade à modelagem de sistemas

Maria Silene Alexandre Leite (UFSC) leite@eps.ufsc.br

Antonio Cesar Bornia (UFSC) cesar@eps.ufsc.br

Christianne Coelho de S. R. Coelho (UFSC) CCSRC@uol.com

Resumo

Este artigo discute algumas questões pertinentes a modelagem de sistemas. Aborda-se diferenças essenciais entre os distintos tipos de sistemas e a intervenção apropriada, diante das características particulares de cada um. Para isso, descreve-se a abordagem cartesiana, a abordagem holística, a abordagem dos sistemas complicados e a abordagem dos sistemas complexos. O objetivo é evidenciar as diferenças entre as abordagens apresentadas e mostrar que a modelagem aplicada ao sistema deve considerar as peculiaridades de cada abordagem. Palavras-chave: modelagem, sistema, complexidade.

1. Introdução

É comum a afirmação de que a sociedade atual possui um funcionamento mais complexo do que as sociedades que a antecederam. A percepção do acelerado aumento de problemas nas relações individuais, sociais e culturais associado à crescente incerteza do ambiente, leva a busca de novas alternativas de intervenção neste ambiente mais complexo e mutável.

As alternativas de intervenção começam pelo seguinte questionamento: Como o observador percebe o sistema analisado? O observador é o sujeito que intervêm no sistema, delimitando-o e determinando-lhe objetivos. Assim, de acordo com sua visão o sistema será modelado.

A modelagem, por sua vez, assume, mais freqüentemente, o caráter analítico não respondendo, eficientemente, as necessidades dessa sociedade mais complexa.

Os modelos analíticos subdividem os problemas para dominá-los. A modelagem analítica busca explicar os problemas, isolando-os da realidade global. Só assim é possível controlar as interferências externas e conseguir resultados precisos e certos. Esta abordagem proporcionou o desenvolvimento da ciência e possibilitou ao homem avançar seus conhecimentos sobre o funcionamento do universo. Contudo, os modelos analíticos desconsideram a interferência do global no particular e vice-versa, o que impede o completo entendimento dos mecanismos reguladores e das repercussões alcançadas pelo sistema estudado. Isto reduz a riqueza do sistema a uma visão cartesiana da realidade.

Sendo assim, os modelos sistêmicos, da mesma forma que os sistemas analíticos, também subdividem os problemas para estudá-los, mas consideram a parte subdividida integrada ao contexto global da qual foi recortada. A abordagem sistêmica busca compreender o contexto do problema para, a partir disto, criar uma realidade inteligível. Esta abordagem entende que o risco e a incerteza fazem parte do contexto e que a intervenção humana apenas a reduz. É importante ressaltar, que, o mundo civilizado ocidental foi construído a partir de modelos analíticos. Por isso, a própria educação desintegra as áreas da ciência umas das outras, dando a impressão errônea, de que são separadas e sem comunicação.

O objetivo desse artigo é mostrar as diferentes abordagens para modelar um sistema e apresentar a importância da teoria da complexidade neste processo.

2. Breve abordagem da teoria da complexidade

O termo complexidade é de difícil conceituação. Existem muitas definições de complexidade, algumas enfatizam a complexidade do comportamento do sistema, outras enfatizam a estrutura interna do sistema, seu funcionamento. Por outro lado, o conceito *complexidade* pode ser encontrado em vários campos, desde os sistemas naturais, representados pelos sistemas biológicos, físicos e químicos aos sistemas artificiais, tais como sistemas computacionais e estruturas organizacionais.

Gell-Mann (1996) discute a questão da simplicidade e da complexidade relacionadas respectivamente a **complicação** e a **complexidade**. Ele diz que simplicidade se refere à ausência (ou quase ausência) de complexidade. Enquanto a primeira palavra é derivada de uma expressão que significa “que já foi dobrado”, a última vem de uma expressão que significa “trançados juntos”. Nota-se que *plic* para dobrar e *plex* para trançado vem da mesma raiz indo-européia *plek*.

A palavra original *complexus* significa “entrelaçado”, “torcido junto”. Segundo Heylighen(1988) para ter a complexidade é necessário que o sistema possua: (1) duas ou mais partes ou elementos diferentes; (2) que as partes ou elementos sejam conectadas. Pode-se perceber que a definição básica de complexidade apresenta um aspecto dual, ao mesmo tempo em que apresenta partes diferentes são unidas pelas interações.

Os termos teoria da complexidade, teoria do caos, teoria das catástrofes, geometria fractal e a física quântica são chamadas de novas ciências. Elas apresentam em comum o conceito de complexidade como guia de seu funcionamento. São, também, denominadas de novas ciências por considerarem a incerteza e imprevisibilidade que conectam os fenômenos. Esta abordagem se opõe à visão tradicional do pensamento organizacional, que pressupõe relações lineares de causa e efeito aplicando os conceitos da física de Newton à gestão das empresas.

No entanto, o limite entre uma teoria e outra, nem sempre, é apresentado com clareza na literatura. Todas elas estão ligadas, de certa forma, pela essência do conceito de complexidade.

A história da teoria da complexidade no decorrer do século XX pode ser descrita, segundo Abraham(2002), pela associação de três campos da ciência: a cibernética, a teoria dos sistemas e os sistemas dinâmicos.

A cibernética é um campo interdisciplinar, surgido oficialmente em 1946 em New York, por um grupo de oito cientistas que vinham de áreas diferentes. Da matemática: Norbert Wiener, Jonh Von Neumann, Walter Pitts. Da engenharia: Julian Bigelow e Claude Shannon. Da Neurobiologia: Rafael Lorente de No, Arturo Rosenbluenth e Warren McCulloch. Mais adiante, se juntaram a este grupo antropólogos e cientistas sociais. Alguns dos assuntos estudados pelo grupo foram: redes de feedback, inteligência artificial, comunicação, entre outros.

A teoria geral dos sistemas foi reconhecida, no meio científico, como o contraponto europeu ao movimento cibernético americano. Seu surgimento oficial ocorreu em 1956, com a criação por Ludwig Von Bertalanffy da sociedade para a pesquisa do sistema geral, em Stanford. Ele

migrou, em 1950, de Vienna para América do Norte, tendo como principais idéias: holismo, organicismo e sistemas abertos.

A teoria dos sistemas dinâmicos é um amplo ramo da matemática criado por Isaac Newton e atualizado por Poincaré em 1880. Após 1975, tornou-se conhecida como teoria do Caos, seguindo o impacto da revolução dos computadores e a descoberta dos atratores caóticos. A aplicação da teoria dos sistemas dinâmicos engloba a matemática, a biologia, a medicina e as ciências sociais. Deste o surgimento dos computadores analógicos e digitais, no século XX, sua aplicação se expandiu e ganhou importância. Sua difusão deve-se, principalmente, aos trabalhos de Jay Forrester e seu grupo no M.I.T.

Entre os três campos anteriormente descritos, podem existir várias e diferentes conexões de acordo com os objetivos do estudo. As ligações entre as comunidades interdisciplinares crescem em número e intensidade, difundido a importância de usar as *teorias da complexidade*, como foram denominadas as conexões criadas entre a cibernética, a teoria geral dos sistemas e a teoria dos sistemas dinâmicos, no estudo dos sistemas complexos.

A teoria da complexidade pode apresentar importante contribuição ao estudo dos sistemas complexos. Ela dispõe de esquemas apropriados à representação de sistemas que convivem com a dialógica partes distintas - unidas pelas interações.

3. O conceito de Sistema

Definir o termo sistema não é uma tarefa fácil. Existem muitos conceitos e usos do termo. Inicia-se a discussão pela dissertação feita por Morin(1977) a respeito da co-existência dos sistemas. Ele busca disseminar o conceito de sistema, mostrando que o ser humano é um sistema constituído por vários sub-sistemas e integrante de outros sistemas maiores.

A maioria das definições de sistema, do século XVII até o surgimento da teoria geral dos sistemas com Von Bertalanffy (1956), reconhecia como características para identificação de um sistema o aspecto global e o aspecto da inter-relação dos elementos. Isto, devido a influência recebida dos matemáticos que consideravam o sistema como um conjunto de elementos em interação. Morin (1977) diz que estes dois aspectos se complementam e se sobrepõem sem jamais realmente se contradizer. Assim, cita-se alguns conceitos de sistemas para exemplificar.

Um sistema “ é um conjunto de partes” (LEIBNIZ,1666 apud MORIN,1977); um sistema “ é todo conjunto definível de componentes” (MATURANA e VARELA, 1997); um sistema “é um conjunto de unidades em inter-relações mútuas”(VON BERTALANFFY, 1968);um sistema “é a unidade resultando das partes em interação mútuas”(ACKOFF,1960 apud MORIN,1977); um sistema “ é um todo que funciona como todo em virtude dos elementos que o constituem” (RAPPORT,1968 apud MORIN,1977). Um sistema “ é um conjunto de elementos em interação.” (THOM,1974). Um sistema “ é uma representação de um recorte da realidade que se possa analisar como uma totalidade organizada, no sentido de ter um funcionamento característico”(GARCÍA,2002).

Observando os conceitos citados anteriormente, pode-se notar que o conceito de organização não aparece em nenhum deles. Morin (1977) diz que a incorporação da organização ao conceito de sistema foi introduzido por Saussure, em 1931, na seguinte definição: “ o sistema é uma totalidade organizada, feita de elementos solidários só podendo ser definidos uns em relação aos outros em função de seu lugar nesta totalidade.”

Assim, podemos conceber um sistema como uma unidade global organizada de inter-relações entre elementos, ações e indivíduos. (MORIN,1977)

Por outro lado, não basta somente conhecer os *conceitos de Sistema* é necessário conhecer, também, os *tipos de sistemas*. Os sistemas lineares foram os mais desenvolvidos e utilizados, dado a sua facilidade de intervenção e o desenvolvimento e difusão dos princípios da ciência clássica, tendo seu apogeu com a física de Newton, da qual derivou todas as metodologias cartesianas, determinísticas e reducionistas. Esses sistemas são baseados em hipóteses reducionistas da realidade, tais como: a previsibilidade, a otimização global e a precisão dos dados. Já os sistemas dinâmicos representados por equações diferenciais não-lineares são baseados na diversidade, na imprevisibilidade e na incerteza presentes na realidade. Eles Consideram a complexidade existente em todos os sistemas vivos. Assim, segundo Capra (1996) alguns cientistas começaram a perceber que as soluções dadas pelas equações de Newton estavam restritas a fenômenos simples, regulados e complicados, enquanto a complexidade de várias áreas pareciam esquivar-se de qualquer modelagem mecanicista ou reducionista. Para Prigogine (1997) iniciava-se, um questionamento sobre a aplicação da mecânica Newtoniana ao desenvolvimento dos seres vivos.

A visão Newtoniana do mundo, apesar de suas limitações comprovadas, resiste até hoje dentro de determinados graus de intervenção. Contudo, sabe-se que, diante da incerteza do mercado, da concorrência crescente, do rápido fluxo de informações e das novas formas de organizações empresariais, é preciso incorporar à gestão aspectos como: a incerteza, a imprevisibilidade, a não linearidade e a complexidade inerente aos sistemas.

Nesse sentido, a teoria da complexidade pode contribuir com uma base científica mais apropriada às novas tendências organizacionais. As abordagens determinísticas e cartesianas são apropriadas aos sistemas complicados, mas apresentam muitas limitações quando aplicadas aos sistemas complexos. Segundo Snowden(2003), um sistema complicado é constituído de inúmeros componentes que podem ser identificados e definidos. As relações entre esses componentes também podem ser identificadas e definidas. Dessa forma, as causas e os efeitos podem ser separados e, compreendendo suas ligações, é possível controlar os resultados. O sistema pode ser melhorado pela otimização de suas partes, uma vez que o todo não é mais nem menos que a soma delas.

Já os sistemas naturais e humanos são complexos. Um sistema complexo inclui muitos agentes que interagem entre si. Axerold e Cohen(2000) tratam os agentes como sistemas que possuem a habilidade de interagir com seu ambiente, incluindo outros agentes. Um agente pode responder ao que acontece em sua volta e realizar ações com maior ou menor propósito. É natural que, ao se pensar em agente, imagine-se uma pessoa. Contudo, observando esta definição, pode-se perceber que um agente não é necessariamente uma pessoa. A família, os negócios, ou um país inteiro pode, também, ser um agente. Mesmo um computador interagindo com outro pode ser considerado um agente.

Nota-se a necessidade de observar o sistema, buscando perceber suas características, suas partes, as propriedades de cada parte e as conexões que as unem. Após, equacionar as peculiaridades do sistema estudado à forma de intervenção mais adequada.

4. Os sistemas, a complexidade e os métodos de modelagem

A complexidade de um sistema é, freqüentemente, relacionada a seu número de componentes, seus relacionamentos e os diversos fatores associados ao observador. Para ser complexo o sistema precisa possuir duas ou mais partes diferentes com conexões entre as partes que dificulte a sua separação. O conceito de sistema complexo traz a dualidade distinto-conexo.

Esta dualidade estimulou o estudo dos tipos de intervenções adequadas a sistemas com tais características.

Heylighen (1988) diz que não é possível analisar um sistema complexo separando seus componentes em elementos independentes, sem que este sistema seja destruído. Logo, o método reducionista não pode ser usado para compreender um sistema complexo.

O *método reducionista* não é adequado a modelagem de *sistemas complexos* por que não considerar as conexões entre os componentes, desconsidera-as para simplificar o problema. Esta constatação conduziu ao desenvolvimento do *método holístico*, o qual se opõe ao reducionismo, por considerar o sistema complexo como um todo, desconsiderando as partes distintas que o compõe, vendo o sistema como um todo único, sem, portanto diferir em suas partes. A abordagem holista, também não é adequada a modelagem dos sistemas complexos, por desconsiderar uma característica essencial: as partes distintas.

Outras abordagens podem ser citadas como a e Weaver(1948) apud Wu (1999) que identificou três escalas da complexidade: simplicidade organizada, complexidade organizada e complexidade desorganizada que corresponde a classificação de Weinberg's, de 1975, em sistema com pequeno número de elementos, médio número de elementos e grande número de elementos.

A simplicidade organizada caracteriza sistemas com pequeno número de significativos componentes que interagem de forma determinística e podem ser analisados pelos métodos reducionistas, cartesianos. *A complexidade desorganizada* ocorre quando o sistema possui um grande número de significativos componentes que demonstram alto grau de comportamento aleatório, podendo ser analisados por métodos estatísticos. *A complexidade organizada* caracteriza sistemas que envolvem muitos componentes, mas somente um limitado número de componentes são significativos ao objetivo do sistema. Para estes sistemas os métodos reducionistas e estatísticos são inadequados à sua análise, no primeiro caso por possuírem mais componentes do que os métodos reducionistas podem analisar, no segundo caso por possuírem poucos componentes para alimentar os métodos estatísticos e, ainda, comportamento não aleatório impossibilitando o uso de métodos estatísticos tradicionais.

A abordagem apresentada por Le Moigne (1977) diz que a complexidade implica imprevisibilidade, a emergência do novo e da mudança no interior do sistema. Para um observador o fenômeno é complexo quando apresenta uma certa imprevisibilidade potencial dos comportamentos. Já a complicação pode ser determinada, prevista e extinta.

Snowden(2003) diz que num sistema complicado seus milhares de componentes e relações são passíveis de identificação e definição e podem ser catalogados. Causa e efeito podem ser separados e, pela compreensão de suas ligações, é possível controlar os resultados. Em um sistema complexo, os componentes e suas interações estão em constante mudança e nunca é possível estabelecê-los completamente. O sistema não pode ser reduzido. Causa e efeito não podem ser separados porque estão fortemente interligados.

Complementando, Iarozinski(2001) diz que um aspecto chave da percepção do complexo reside na diferença entre a variedade do observador e a variedade do fenômeno observado. Se esta diferença é igual a infinito (todo o estado é possível) o fenômeno será percebido como complexo. Se esta diferença é finita (nem todos os estados são conhecidos, mas podem ser descritos) o fenômeno será percebido como complicado. Se ela é igual a zero (o observador conhece todos os estados) o fenômeno será percebido como simples.

Pode-se perceber que enquanto os sistemas foram considerados lineares, com relações diretas de causa e efeito os métodos cartesianos de intervenção eram adaptáveis. No momento em que houve a percepção dos diferentes tipos de sistema, observou-se que determinados tipos,

os complexos, necessitavam, de um método que considerasse a sua dualidade partes distintas-conexões. Para os sistemas complexos é adequado método sistêmico.

Apesar, dessa percepção a visão cartesiana dos fenômenos continua se sobrepondo como método intelectual de análise e intervenção dos fenômenos. Isto ocorre devido a maior facilidade de intervenção oferecida pelos métodos cartesianos. Eles consideram os problemas como sistemas complicados que podem ser simplificados e explicados. Enquanto as metodologias sistêmicas consideram os problemas como sistemas complexos, sendo modelados e compreendido ao mesmo temp. A compreensão ocorre por meio da construção e do conhecimento da inteligibilidade do problema.

Os métodos cartesianos são adequados à pesquisa em sistemas complicados, como as máquinas e os computadores, mais insuficientes para pesquisar os sistemas caracterizados pela complexidade, como os sistemas sociais e humanos.

Iarozinski(2001) diz que nos sistemas simples ou complicados o controle pode ser total. Estes sistemas podem ser controlados a partir de uma base de regras programada, já que a sua evolução é conhecida e previsível. O funcionamento e a evolução destes sistemas estão limitados pelo grau de sofisticação do sistema de controle.

Nesse sentido, Le Moigne (1977) diz que a passagem da complicação à complexidade implica um limiar, uma mudança de método intelectual. Os sistemas que precisam ser representados e operacionalizados, já não são apenas tecidos por redes complicadas que ligam elementos identificáveis. A diferenciação e a diferença estão no mundo real e a variedade dos sistemas a conhecer torna-se incomensurável.

Simon (1981) diz que os sistemas complexos apresentam uma estrutura hierárquica em forma de caixas-dentro-de-caixas ou de múltiplos níveis. Os níveis são formados por sistemas e subsistemas interligados por interações. Pode-se distinguir as fronteiras do sistema pela intensidade das interações dentro dos subsistemas e entre os subsistemas. Assim, as ligações entre os componentes dos subsistemas são, geralmente, mais fracas que as ligações dentro dos subsistemas. Esta é denominada por Simon como arquitetura quase decomponível.

A esse respeito, Snowden (2003) diz que é necessário uma nova ciência para lidar com os sistemas complexos. O paradigma atual do pensamento empresarial tem suas origens nas idéias de Frederick Taylor, que aplicou os conceitos da física de Newton à gestão das empresas. A atual complexidade das relações e conexões exigem métodos mais apropriados, flexíveis e adaptáveis à realidade.

Nessa exposição apresentou-se a necessidade de conhecer a interligação entre as partes do sistema, sua complexidade e suas interações para modelá-lo de forma mais adequada.

5. Conclusão

O argumento inicial deste artigo, foi o de que a sociedade atual apresenta problemas mais complexos do que os problemas das sociedades que o antecederam. A percepção do aumento da complexidade é um bom sinal, para a percepção de que nem todos os problemas podem ser solucionados pelos mesmos métodos.

Os sistema podem ser complicados ou complexos. Os complicados podem ser modelados pelos métodos cartesianos, com relações de causa-efeito lineares, pois suas conexões podem ser desconsideradas sem destruir o sistema. Os complexos não podem ser modelados por métodos cartesianos, pois suas relações são dinâmicas e as conexões entre suas diferentes

partes, se desativadas, destroem o sistema. Resumidamente, o quadro 5.1 apresenta os principais tipos de sistema e a forma de intervenção adequada a suas características.

Principais tipos de sistema vs Formas de intervenção	
Modelagem Analítica ou Cartesiana	<p>Sistemas complicados</p> <p><u>Características:</u></p> <p>Relações lineares de causa-feito</p> <p>Causa-efeito podem ser separadas sem comprometer o sistema</p> <p>Relações entre as partes podem ser desconsideradas</p> <p>Comportamento previsível</p> <p>Pode ser reduzido</p> <p>Pode ser controlado</p>
Modelagem Sistêmica	<p>Sistemas complexos</p> <p><u>Características:</u></p> <p>Relações dinâmicas</p> <p>Relações não entre as partes podem ser desconsideradas</p> <p>Comportamento imprevisível</p> <p>Constante mudança</p> <p>Não pode ser completamente controlado</p>

Quadro 5.1. Principais tipos de sistema vs Tipos de modelagem

Apresentou-se, também, outras abordagens consideradas na literatura, tais como: o método holístico, a simplicidade organizada, a complexidade desorganizada e a complexidade organizada. A abordagem holística desconsidera as partes diferentes do sistema por vê o sistema como um todo único indissociável. A simplicidade organizada pode ser representada pelos métodos cartesianos, por reduzir o sistema a um pequeno número de componentes. A complexidade desorganizada é representada por métodos estatísticos por ser composta de grande número de componentes e possuir comportamento aleatório. A complexidade organizada necessita de modelagem sistêmica, por apresentar comportamento não aleatório e possuir partes distintas em conexão.

Por fim, buscou-se mostrar a importância da compreensão da complexidade para identificar um sistema complexo e procurar a forma mais adequada de modelagem.

Referências

- ABRAHAM, Ralph. The gênesis of Complexity. Advances in Systems Theory, complexity and the human sciences. 2002.
- AXELROD, Robert, COHEN, Michael. Harnessing Complexity: organizational implications of a scientific frontier. New York: 1999.
- CAPRA, Fritjot. A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos. São Paulo: Cultrix, 1996.
- GARCÍA, Rolando. O conhecimento em construção. Tradução: Valério Campos. Porto Alegre: Artmed, 2002.
- GELL-MANN, Murray. O Quark e o Jaguar: as aventuras no simples e no complexo: Tradução: Alexandre Tort. Rio de Janeiro: Rocco, 1996

- HEYLIGHEN, Francis. Building a science of complexity. Annual Conference of the Cybernetics society. London, 1988.
- IAROSINSKI, A. N. Proposta de um modelo conceitual de gestão da produção baseado na teoria da complexidade: O modelo IMPLEXE. Monografia, Universidade Católica do Paraná, 2001.
- LE MOIGNE, Jean-Louis. La théorie du système general: Théorie de la Modélisation. Paris, 1977.
- MATURANA, H., VARELA, F. De máquinas e seres vivos: autopoiese - a organização do vivo. Porto Alegre: Artes Médicas, 1997.
- MORIN, Edgar. O Método I: a natureza da natureza. Tradução: Ilana Heineberg. Porto Alegre: Sulina, 1977.
- PRIGOGINE, Ilya. STENGERS, Isabelle. A nova aliança. Tradução: Miguel Faria e Maria Joaquina Machado Trancheira. Brasília: UNB, 1984.
- SIMON, H. As ciências do artificial. Tradução: Luís Moniz Pereira. Coimbra: Sucessor, 1981.
- SNOWDEN, Dave. A nova forma de ser simples. HSM Management, julho-agosto, número 39, volume 4, São Paulo, 2003.
- STACEY, Ralf D. Complexity and Creativity in Organizations. San Francisco, CA: Berrett-Koehler Publishers, 1996.
- THOM, R. Stabilité culturelle et morphogénèse. Essai d'une théorie génétique des modes, Paris, 1972.
- VON BERTALANFFY, Ludwig. Teoria Geral dos Sistemas. Tradução: Francisco M. Guimarães. Petrópolis: Vozes, 1968.
- WU, Jianguo. Hierarchy and Scaling: Extrapolating information along a scaling ladder. Canadian Journal of remote sensing. Vol 25. N.4, 1999, pp.367-380.