



DINÂMICA DE SISTEMAS: UMA FERRAMENTA PARA VISUALIZAÇÃO DE PROBLEMAS COMPLEXOS

William H. Yonenaga – yonenaga@terra.com.br

Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Departamento de Engenharia de Produção
Rodovia Washington Luiz, km 235
Cep: 13565-905

Ricardo C. C. Ferrari – rferrari@fai.com.br

Faculdades Adamantinenses Integradas – FAI, Departamento de Ciência da Computação
Rua Nove de Julho, 730/740
Cep: 17800-000

***Resumo:** Atualmente vivemos em um ambiente altamente complexo, que tem nos demandado uma nova abordagem na análise dos problemas que nos cercam. Neste novo padrão, temos que considerar as questões de forma sistêmica, considerando-se todas as partes envolvidas e as interações entre elas. O objetivo deste artigo é mostrar alguns fenômenos que surgem em diversas situações complexas e que muitas vezes não são percebidos pela nossa análise. Além disso, serão apresentadas a simulação baseada na dinâmica de sistemas, suas principais características e a importância deste tipo de simulação no processo de tomada de decisão e na compreensão de sistemas complexos.*

***Palavras-chave:** Simulação, Dinâmica de sistemas, Aprendizado*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente defrontamo-nos diariamente com problemas complexos. Eles podem ser locais e de fácil intervenção, como desajustes em uma pequena empresa, ou mais globais, como por exemplo, a deterioração da camada de ozônio. Os tomadores de decisão têm percebido que as ferramentas utilizadas para tratar tais questões não têm sido eficazes; elas acabam criando efeitos colaterais, piorando seu estado (STERMAN, 2001). A origem do insucesso destas técnicas reside no fato de elas não abordarem o problema de forma sistêmica.

Segundo SENGE (1990), para que haja uma melhor compreensão do problema, é preciso que, ao realizarmos uma análise, consideremos todas as variáveis presentes no sistema. Além disso, devemos nos atentar para as inter-relações entre estas variáveis. Porém, muitas vezes acabamos focando em apenas algumas variáveis que não se constituem no verdadeiro ponto de melhoria do sistema.

Neste trabalho serão apresentados os conceitos básicos da Teoria Geral dos Sistemas e os principais fenômenos que promovem a falta de visão sistêmica e dificultam a tomada de decisão.



Em seguida serão apresentados os principais conceitos da metodologia de Dinâmica de Sistemas e os motivos de ela ser eficaz na visualização e solução de problemas complexos.

2. TEORIA GERAL DOS SISTEMAS

Um dos paradigmas que emergiu no início do século XX foi a Teoria Geral dos Sistemas. Baseada nos estudos de Ludwig von Bertalanffy (BERTALANFFY, 1977), tal teoria já notava falhas na abordagem reducionista e mecanicista de se resolver os problemas e propunha estudos que considerassem as inter-relações entre os diversos elementos de um sistema. Essa afirmação se apóia no argumento de BERTALANFFY (1977):

"Entretanto, só recentemente se tornou visível a necessidade e a relevância da abordagem dos sistemas. A necessidade resultou do fato do esquema mecanicista das séries causais isoláveis e do tratamento por partes ter se mostrado insuficiente para atender aos problemas teóricos, especialmente nas ciências bio-sociais, e aos problemas práticos propostos pela moderna tecnologia".

Esta teoria afirma que ao analisar um problema devemos considerar todas as variáveis envolvidas e as inter-relações entre elas. Muitas vezes, tais inter-relações passam despercebidas sob nosso olhar, o que nos leva a tomar decisões equivocadas.

No campo empresarial, sistema define um conjunto de funções interdependentes, cuja interação, de acordo com o pensamento sistêmico, forma um todo unitário, e sua subdivisão em partes, não necessariamente produzirá valores parciais que, somados, sejam equivalentes ao total (ACCIOLY, 2001).

A definição de um sistema depende do interesse da pessoa que pretenda analisá-lo. Uma organização, por exemplo, poderá ser entendida como um sistema ou subsistema ou ainda supersistema dependendo da análise que se queira fazer, desde que o sistema tenha um grau de autonomia maior que o subsistema e menor que um supersistema. É, portanto, uma questão de abordagem.

3. DEFICIÊNCIAS COGNITIVAS

Todos nós apresentamos algumas deficiências cognitivas que dificultam a nossa compreensão do sistema. Muitas destas falhas se originam da não adaptação para analisarmos o problema sob o enfoque sistêmico. A seguir serão apresentados alguns destes problemas.

- **Retroalimentação:** muitas vezes, as causas e efeitos de um sistema se confundem. Devido ao fenômeno de retroalimentação, pode ocorrer do efeito de uma causa ser a causa de um efeito. Pensando em forma circular, uma variável pode provocar uma alteração em uma segunda variável; esta última influencia outras variáveis subseqüentes que por fim pode influenciar a primeira variável.



- **O efeito não é proporcional à causa:** analisando-se um problema de forma linear, podemos ser levados a pensar que causa e efeito são proporcionais. Este fato não é real na maioria das vezes, principalmente em se tratando de sistemas vivos ou sistemas mecânicos. Por exemplo, você pode obter um grande efeito com uma pequena entrada, como a força do pé no acelerador do carro, que é capaz de fazê-lo andar em alta velocidade.
- **Causa e efeito não estão próximos no tempo e no espaço:** Em sistemas, geralmente há um atraso de tempo entre o efeito e sua causa; além disso, o efeito pode aparecer em outra parte do sistema, longe de onde partiu a causa. Então, quando estamos lidando com sistemas, nós temos que estender nosso horizonte de tempo e alargar nosso campo de visão para que todas as variáveis realmente importantes do sistema sejam consideradas (O'CONNOR & McDERMOTT, 1997).
- **Mudanças Constantes:** um sistema sofre ações do ambiente e sempre tem que mudar para se adaptar a essas novas entradas.
- **Complexidade Dinâmica:** ocorre quando os elementos de um sistema podem se relacionar entre si de diferentes maneiras, pois cada parte tem diversos estados possíveis. Qualquer alteração em uma parte provoca mudanças no sistema inteiro, pois as relações entre as peças são alteradas.

4. A METODOLOGIA DE DINÂMICA DE SISTEMAS

A Dinâmica de Sistemas foi criada nos anos 50 pelo professor Jay W. Forrester. Esta metodologia usa a simulação computacional para relacionar a estrutura de um sistema com o seu comportamento no tempo (FORRESTER, 1961).

Devido às características de nosso cérebro, nós temos dificuldade em fazer uma análise holística de um sistema. Devido a este fato, muitas vezes tomamos decisões equivocadas, pois analisamos o sistema de forma fragmentada.. Além disso, nós apresentamos dificuldade em relatar nossos modelos mentais de forma compreensível. A dinâmica de sistemas supre essas deficiências, na medida em que ela capta as informações da estrutura de um sistema, formaliza-as em um modelo computacional e, a partir disso, a simulação retorna o comportamento gerado pela estrutura (COVER, 1996).

Atualmente, os pacotes de simulação baseados na dinâmica de sistemas são fáceis de usar, como será demonstrado nas próximas seções.

4.1. Componentes do modelo

Em SD, um modelo é construído com basicamente quatro componentes: estoques, fluxos, auxiliares e conectores.

Os estoques são variáveis de estado e podem ser considerados como repositórios onde algo é acumulado, armazenado e potencialmente passado para outros elementos do sistema (DEATON e WINEBRAKE, 2000). Eles fornecem uma visão de como está o sistema em qualquer instante do tempo. E quaisquer mudanças nos estoques, que ocorrem devido à ação dos fluxos, demandam um certo tempo, ou seja, não são instantâneas (COVER, 1996). No pacote de simulação Stella, os estoques podem também exercer a função das estruturas de fila, esteira rolante e forno.

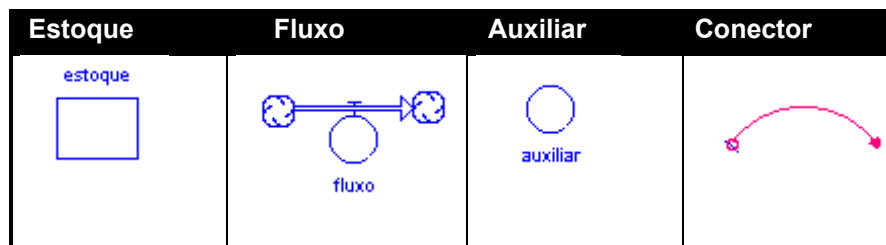
Os fluxos, por sua vez, são variáveis de ação, e podem alterar os estoques, aumentando ou diminuindo seus volumes (POWERSIM, 1996).

Os auxiliares servem para formular os dados para definir as equações dos fluxos. Eles servem para combinar, através de operações algébricas, os fluxos, estoques e outros auxiliares. São usados para modelar as informações, e não o fluxo físico, sendo capazes de se alterar instantaneamente, sem atrasos (COVER, 1996).

Os conectores representam as inter-relações entre todos os componentes do sistema. São essas inter-relações que ligam os componentes que formarão uma expressão matemática (DEATON e WINEBRAKE, 2000).

A seguir, na Figura 1, são apresentados os símbolos referentes a cada um dos componentes citados acima.

Figura 1. Componentes utilizados na simulação em System Dynamics



Fonte: DEATON e WINEBRAKE, 2000.

Ao se modelar com estes quatro componentes em um simulador, deve-se seguir as seguintes regras (FLOOD & JACKSON, 1991):

- Um estoque pode somente ser precedido por um fluxo.
- Um estoque pode ser seguido por um auxiliar ou um fluxo.
- Um auxiliar pode ser seguido por outro auxiliar ou por um fluxo.
- Um fluxo deve ser seguido por um estoque.
- Um estoque não pode ser diretamente afetado por outro estoque.

4.2. Exemplo de modelo que utiliza Stella

O simulador Stella aborda os conceitos de Dinâmica de Sistemas. Por meio dele é possível criar modelos que ilustram fenômenos sistêmicos que, ao serem utilizados pelo usuário, auxilia-o no processo de tomada de decisão, pois mostra comportamentos que são contra-intuitivos. O pacote fornece várias funções matemáticas para estabelecer as relações entre as variáveis. Os resultados das simulações são mostrados em forma de gráficos ou tabelas.

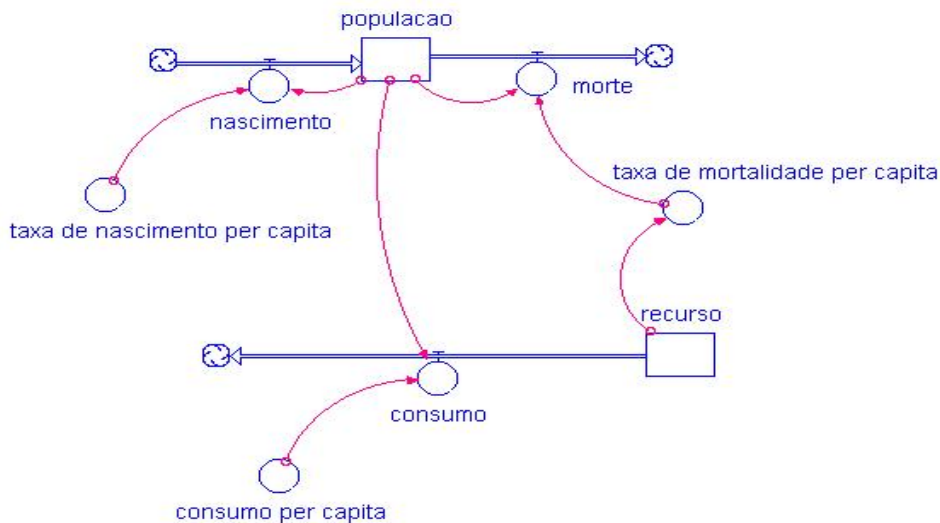
A seguir, é apresentado um modelo feito no software Stella. De uma forma geral, o processo de construção do modelo é fácil e intuitiva. O próprio pacote gera as equações diferenciais que serão utilizadas na simulação. Estas equações são geradas em uma camada distinta da camada onde é modelado o diagrama de estoque e fluxo. Ainda há uma terceira camada onde é possível construir um painel de controle.

Como citado anteriormente, os modelos criados em pacotes baseados em programas de computador baseados na Dinâmica de Sistemas são construídos a partir de quatro componentes: estoque, fluxo, auxiliar e conector. Tendo a estrutura do modelo em mente e seguindo-se as regras de combinação dos componentes citadas acima, obtém-se um modelo como mostrado na Figura 2.

Os nomes de cada um dos componentes são definidos pelo usuário. Este modelo ilustra o comportamento de uma população que, para sobreviver, possui uma quantidade limitada de recursos (alimentos, por exemplo). Ela tem uma determinada taxa de nascimento per capita, que influencia o fluxo de novos elementos que são acrescentados à população (nascimento) e uma taxa de mortalidade, que influencia o fluxo de elementos que são retirados da população (morte).

A taxa de mortalidade varia de acordo com os recursos disponíveis. No início, quando há abundância de recursos, a taxa de mortalidade é praticamente nula. Mas à medida que a quantidade de recursos decresce, a taxa de mortalidade aumenta. Além disso, o fluxo que faz a quantidade de recursos diminuir é influenciado pela quantidade de elementos da população. Ou seja, quanto maior a população, maior o consumo.

Figura 2. Diagrama de estoque e fluxo de um modelo no STELLA



Fonte: DEATON e WINEBRAKE, 2000.

A taxa de mortalidade varia de acordo com os recursos disponíveis. No início, quando há abundância de recursos, a taxa de mortalidade é praticamente nula. Mas à medida que a quantidade de recursos decresce, a taxa de mortalidade aumenta. Além disso, o fluxo que faz a quantidade de recursos diminuir é influenciado pela quantidade de elementos da população. Ou seja, quanto maior a população, maior o consumo.

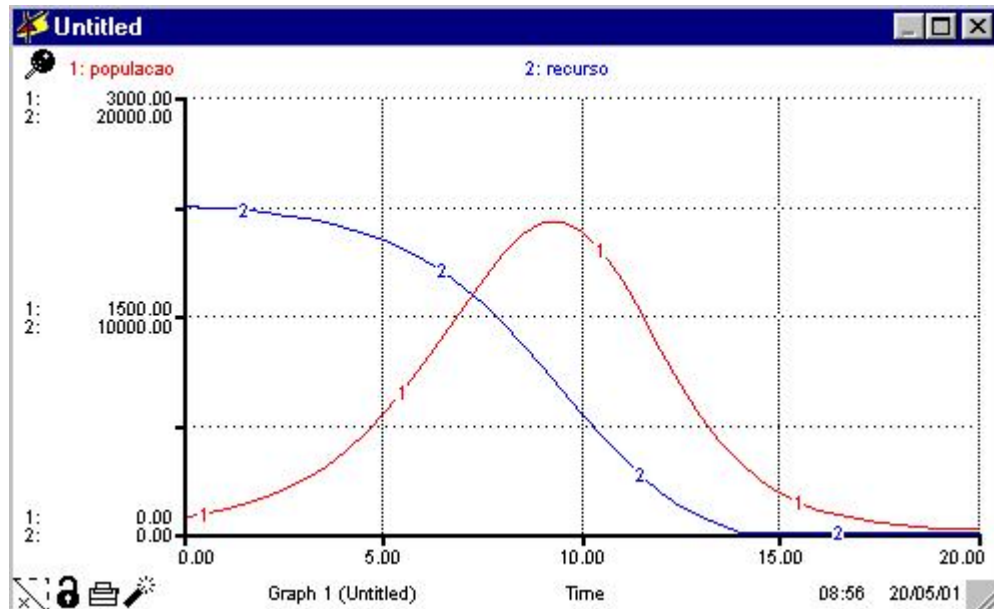
Depois de feito o diagrama de estoque e fluxo, o usuário deve definir os valores iniciais dos estoques e as operações algébricas dos auxiliares e fluxos. A Figura 3 mostra o conjunto de equações definidas pelo usuário e no qual a simulação será baseada.

Figura 3. Equações diferenciais geradas pelo pacote a partir do diagrama de estoque e fluxo

```
populacao(t) = populacao(t - dt) + (nascimento - morte) * dt
INIT populacao = 100
INFLOWS:
nascimento = taxa_de_nascimento_per_capita*populacao
OUTFLOWS:
morte = pop*taxa_de_morte_per_capita
recursos(t) = recursos(t - dt) + (- consumo) * dt
INIT recursos = 15000
OUTFLOWS:
consumo = populacao*consumo_per_capita
consumo_per_capita = 1
taxa_de_morte_per_capita = 1-recursos/15000
taxa_de_nascimento_per_capita = 0.5
```

Ao se simular o modelo por um período de 20 unidades de tempo, obtém-se o gráfico da Figura 4. Neste exemplo, o estoque “população” atinge um pico quando ainda há muito recurso disponível e, à medida que os recursos vão diminuindo, a população também sofre um decréscimo. Este tipo de comportamento é conhecido como “subida e descida rápidas”. Outros tipos de comportamentos visíveis em Dinâmica de Sistemas são: oscilação, crescimento e decréscimo exponenciais e curvos em S. Os simuladores como Stella fornecem, além de saídas gráficas, saídas em forma de tabelas.

Figura 4. Gráfico gerado na simulação do modelo.



Como pode ser observado, a simulação mostra os padrões de comportamento que o sistema produz. Segundo SENGE et al. (1997), os modelos computacionais são utilizados para:

- Mostrar como estruturas sistêmicas produzem diretamente padrões de comportamento;
- Testar se uma estrutura reproduz o desempenho que foi observado no mundo real;
- Explorar como o comportamento mudará quando aspectos diferentes da estrutura forem alterados;
- Revelar pontos de melhoria que, de outro modo, poderiam ser ignorados;
- Empenhar equipes num conjunto mais profundo de aprendizados sistêmicos e permitir que elas experimentem as conseqüências do seu pensamento.

4.3. Dinâmica de Sistemas e o processo de aprendizado

A metodologia de Dinâmica de Sistemas também se mostra eficaz no processo de aprendizado. Segundo SENGE et al. (1997), o uso de simulação computacional torna os aprendizes ativos ao invés de passivos. Promove-se o “aprender fazendo”. As simulações, também conhecidas como micro-mundos, permitem que os alunos testem diferentes estratégias e construam um entendimento melhor dos aspectos do mundo real. Elas ajudam nos a desbloquear nossos modelos mentais “óbvios” que impedem que as pessoas ajam de uma forma correta. De posse de um modelo que contenha as principais características do sistema real, elaborado pelo aluno com o auxílio de um especialista no assunto (no caso o professor), o aprendiz pode tirar conclusões valiosas da execução das simulações. De acordo com FORD(1999), as simulações cumprem o papel de catalisadoras do aprendizado quando trabalhadas aos pares.. Quando o aluno executa duas simulações, com diferentes valores de variáveis e compara os resultados, ele melhora a compreensão sobre o sistema abordado no modelo. Disciplinas como engenharia econômica, custos e gerenciamento da cadeia de suprimentos podem ser tratadas sob o enfoque da Dinâmica dos Sistemas.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a metodologia da Dinâmica de Sistemas é possível estreitar as incertezas presentes em um ambiente organizacional complexo e com mudanças constantes. A Dinâmica de Sistemas se constitui em uma boa opção quando houver fenômenos complexos, com comportamentos contra-intuitivos. Tais fenômenos são comuns nas mais diversas áreas do conhecimento, como ciências sociais, biologia, engenharia, física, ecologia, etc. Cabe ao usuário identificar a aplicabilidade da metodologia ao problema estudado e ter a criatividade para modelá-lo no simulador. Novas tecnologias de ensino-aprendizagem como a Dinâmica de Sistemas, que promovam o auto-aprendizado e desbloqueiem certos modelos mentais, devem ser incentivadas e postas em prática nos cursos de graduação de engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, R.C. **Análise da influência do mercado de suco pasteurizado sobre o comportamento da oferta de laranjas utilizando a metodologia system dynamics**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

BERTALANFFY, L. V. **Teoria Geral dos Sistemas**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Vozes, 1977.

COVER, J. **Introduction to System Dynamics**. Reston: Powersim Press, 1996.

DEATON, M. L.; WINEBRAKE, J. J. **Dynamic Modelling of Environmental Systems**. New York: Springer-Verlag, 2000.

FLOOD, R.L.; JACKSON, M. C. **Creative Problem Solving: Total Systems Intervention**. London: John Wiley & sons, 1991.

FORD, A. **Modelling the Environment**. Washington: Island Press, 1999.

FORRESTER, J. W. **Industrial Dynamics**. Cambridge, Massachusetts: Productivity Press, 1961.

O'CONNOR, J.; McDERMOTT, I. **The Art of Systems Thinking: Essential Skills for Creativity and Problem Solving**. London: Thorsons, 1997.

POWERSIM, A. S. **Powersim 2.5 Reference Manual**. Reston: Powersim Press, 1996.

SENGE, P. **A Quinta Disciplina**. 2. ed. São Paulo: Editora Best Seller, 1998.

SENGE, P.; et all. **A Quinta Disciplina: caderno de campo: estratégias e ferramentas para construir uma organização que aprende**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997.



STERMAN, J. D. System dynamics modeling: tools for learning in a complex world
California Management Review. Berkeley, v. 43, n. 4, p. 8-25, 2001.

SYSTEM DYNAMICS: A TOOL FOR THE VISUALIZATION OF COMPLEX PROBLEMS

***Abstract:** Nowadays we live in a highly complex environment, which has demanded from us a new approach in the analysis of the problems that surround us. In this new pattern, we have to consider the questions in a systemic way, considering every part involved and the interactions among them. The objective of this article is to show some phenomena that appear in several complex situations and that many times are not realized by our analysis. In addition, it will be presented the simulation based on system dynamics, its main characteristics and the importance of this type of simulation in the process of decision support and in the understanding of complex systems.*

***Keywords:** Simulation, System dynamics, Learning process.*