



GAE/024

21 a 26 de Outubro de 2001  
Campinas - São Paulo - Brasil

**GRUPO VI**  
**GRUPO DE ESTUDOS DE ASPECTOS EMPRESARIAIS**

**SIMULADOR DE UMA EMPRESA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA UM AMBIENTE DE NEGÓCIOS**

Raimundo C. G. Teive

Rafael H. Pinotti

**RESUMO**

Os desafios impostos pelo novo modelo do setor elétrico brasileiro às empresas de energia elétrica, estão relacionadas principalmente às incertezas inerentes ao processo de tomada de decisão no novo modelo. Além disto, este novo ambiente, impossibilita a construção de um modelo analítico, pois estamos diante de um problema não-estruturado. Assim, é importante além do desenvolvimento de sistemas de informação executiva e suporte à decisão, desenvolvimento de modelos computacionais apropriadas para alimentar estes sistemas, a nível de simulação de políticas empresariais e estratégias de negócios. Desta forma, neste trabalho é apresentado um simulador computacional de uma empresa geradora de energia elétrica, baseado na técnica de dinâmica de sistemas, o que permite representar, de forma apropriada, o comportamento dinâmico da empresa e análises do tipo *what-if*.

**PALAVRAS-CHAVE** : Simulação, Dinâmica de Sistemas, Geração de Energia Elétrica

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Dentro do novo modelo do setor de energia elétrica brasileiro, as empresas de geração de energia em particular, vão enfrentar situações nunca antes experimentadas, no que se refere aos aspectos técnicos, comerciais e gerenciais.

Os desafios que surgirão são decorrentes das incertezas inerentes ao processo de tomada de decisão, tais como: crescimento da carga do mercado consumidor, cronograma e custo de construção das obras e preços dos combustíveis, somada às novas incertezas relacionadas com o ambiente econômico e regulatório no qual a empresa operará.

A novidade da introdução da competição nos setores de geração, comercialização e distribuição de energia elétrica e as particularidades do sistema elétrico brasileiro, fazem com que não seja possível a utilização de modelos analíticos, já que este problema mostra ser não-estruturado.

Segundo [01], um problema pode ser de três tipos: estruturado, não-estruturado e semi-estruturado. Um problema é dito ser estruturado quando todas as variáveis do problema podem ser identificadas e quantificadas. Por outro lado, um problema é dito ser não-estruturado quando existem variáveis que não podem ser quantificados e outras que não podem ser até mesmo identificadas. Um problema semi-estruturado contém características dos dois problemas.

Desta forma, o uso de ferramentas computacionais de simulação é indicado para simular cenários, políticas e estratégias empresariais, podendo ser integrada com sistemas de suporte à decisão (*DSS – Decision Supporting Systems*) e sistemas de informação executiva (*EIS – Executive Information Systems*).

O simulador desenvolvido é constituído de vários módulos, representando de forma simplificada, as principais áreas da empresa: módulo econômico, módulo de expansão, módulo das capacidades de geração, módulo de produção de energia elétrica, além dos módulos representando agentes externos à empresa, como o módulo regulatório e o módulo de demanda de energia.

**2.0 DINÂMICA DE SISTEMAS**

Dinâmica de Sistemas é uma técnica para análise, modelagem e simulação de sistema, cujas idéias foram

desenvolvidas por Jay Forrester em 1968 [03]. Esta metodologia foi o resultado do cruzamento de idéias da área da teoria geral de sistemas e engenharia de controle. A adaptação dos métodos de engenharia de controle objetivou permitir sua aplicação para problemas econômicos e sociais de alta complexidade e é caracterizado por dois aspectos: uma representação visual das equações algébricas e diferenciais, que representam a estrutura dos sistemas, e a possibilidade de visualização do comportamento do sistema através de métodos de simulação.

A técnica de dinâmica de sistemas, diferente das técnicas de simulação tradicionais que enfatizam a modelagem dos fluxos físicos, procura representar não somente fluxos físicos, os quais podem ser armazenados, mas fluxos de informação que podem ser apenas observados. Por isso, aspectos como por exemplo, a influência da taxa de juros sobre empréstimos e vice-versa, pode ser modelado através de relações causais entre o fluxo monetário (físico) e índices de desempenho econômico-financeiro das empresas.

Existem duas razões básicas para usar este modelo:

- 1) este tipo de problema não é viável ser tratado com modelos analíticos por causa da falta de informação para construir o modelo (é um problema não estruturado), apontando para a necessidade de simplificações que podem invalidar a solução obtida;
- 2) o conhecimento envolvido nestes modelos é composto de, na maior parte, por conhecimento tácito [02].

O conhecimento tácito é diferente do conhecimento explícito. O último refere-se ao conhecimento articulado (as palavras que falamos, os livros que escrevemos, etc), enquanto que o primeiro é relacionado como o conhecimento não-articulado, incluindo intuição, perspectivas, crenças e valores que as pessoas adquirem como resultado de suas experiências.

Um especialista em uma empresa, por exemplo, necessita lidar com este tipo de conhecimento para realizar o seu trabalho e toma as suas decisões baseados em seus modelos mentais [06], o qual ele leva anos para construir. O modelo mental é formado quando o observador de um sistema real, cria uma imagem mental de uma relação causa-efeito e abstrai inferências [04].

Na maioria das organizações sociais, nos utilizamos modelos mentais, particularmente em situações de tomada de decisão mal-estruturadas. Infelizmente, os

homens são limitados por sua racionalidade e os modelos mentais sofrem de muitas deficiências.

Assim, quanto maior o número de relações causa-efeito envolvidas no problema, mais inviável é para tratar o problema com modelos mentais. Em outras palavras, os modelos mentais são pobremente definidos e existe a necessidade de representar apropriadamente estes modelos mentais em um computador.

Um modelo é uma representação simplificada (uma abstração) de um sistema real. Os objetivos gerais de construir um modelo de um sistema real são [04]:

- para compreender como um sistema real trabalha;
- para determinar que fatores exercem as maiores influências sobre o comportamento do sistema;
- para avaliar conseqüências de aplicação de políticas e controles;
- para obter funções de realimentação viáveis que garantam a satisfação dos objetivos.

Em outras palavras, como dito em [06], modelos podem ser vistos como mapas que capturam e ativam o conhecimento ou como plataformas que filtram e organizam o conhecimento.

A técnica de modelagem por dinâmica de sistemas combina as características de modelos matemáticos e descritivos, construídos através de modelos mentais, com processos de simulação via computador. Em alguns casos, o estado de um sistema pode também ser obtido através de uma solução analítica. Contudo, a maioria dos sistemas dinâmicos pode ser somente representado por modelos não-lineares, cujas soluções analíticas, quando possível, são complexas. Nestes casos, somente a simulação por métodos numéricos fornece uma forma viável de análise.

A principal característica da modelagem de dinâmica de sistemas é a identificação das malhas de realimentação, as quais representam uma vantagem em relação aos métodos de análise tradicionais que tratam partes de um sistema separadamente, sem levar em consideração as interações entre os componentes do sistema.

O uso de dinâmica de sistemas tem importantes vantagens adicionais:

- é possível incorporar aspectos de curto e longo prazo no mesmo modelo;
- é permitido incorporar relações causais não-lineares;

- é possível representar os efeitos de variáveis sociais e padrões de comportamento (via regras);
- facilita a análise de sensibilidade dos índices de desempenho das empresas, considerando políticas de gerenciamento alternativas.

A estrutura básica de uma malha de realimentação é mostrada na Figura abaixo, baseada de [05]. Uma malha de realimentação é um caminho fechado que conecta três elementos básicos: o nível do sistema (estado ou condição do sistema), a informação sobre o nível do sistema, a decisão que controla a ação, a qual por seu lado afeta o nível do sistema, fechando o ciclo de realimentação.

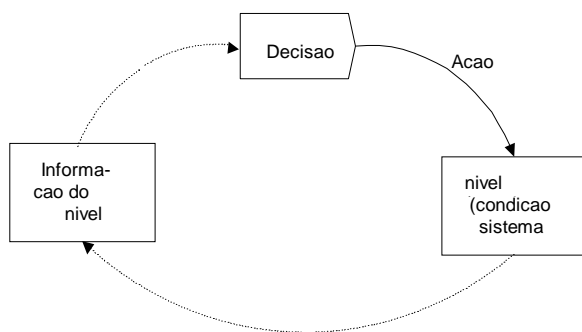


FIGURA 1 – Malha de Re-alimentação

O nível do sistema (nível real) é o gerador de informação (nível visual), o qual pode ser diferente do nível real devido a atrasos e /ou ruídos. Contudo, pode ser observado que a base do processo de tomada de decisão é a informação e não o nível real.

A estrutura mostrada na Figura 1 é a forma mais simples de sistema realimentado, o qual contém, em geral, além de atrasos, distorções e múltiplas malhas de realimentação interconectadas.

Uma malha de realimentação é formada por dois tipos de elementos: variáveis de nível e variáveis de fluxo. As variáveis de nível (ou estados) descrevem condições do sistema em qualquer momento. As variáveis de nível acumulam ou integram as diferenças entre os fluxos de entrada e de saída (discrepâncias) que então sofrem uma influência pelas ações sobre o sistema.

As variáveis de fluxo (ou ação) informam quão rápido os níveis estão mudando no sistema. Uma variável de fluxo não determina o valor atual de uma variável de nível, mas a velocidade que um nível muda seu valor. As variáveis de fluxo são associadas com ações, ou, a equação de fluxo define a ação a ser feita em um ponto de decisão, considerando a informação disponível.

### 3.0 – RELAÇÕES CAUSA-EFEITO

As variáveis de fluxo permitem representar uma grande variedade de relações funcionais e lógicas, que determinam o comportamento do sistema. As principais relações usadas na técnica de modelagem por dinâmica de sistemas são as seguintes: relações causais, atrasos, respostas não-lineares e malhas de realimentação. O significado de algumas implicações no contexto da modelagem de empresas de energia elétrica são apresentadas abaixo, baseadas de [07]:

- Relações causa-efeito, relacionando por exemplo, mudanças de preço e demanda de eletricidade. Este exemplo é mostrado na Figura 2;



FIGURA 2 – Relações Causa-efeito

- O atraso de tempo entre uma ação e o seu efeito final: por exemplo, o atraso entre a implementação de políticas de conservação de energia e mudanças no hábito de consumo dos consumidores (Figura 3);

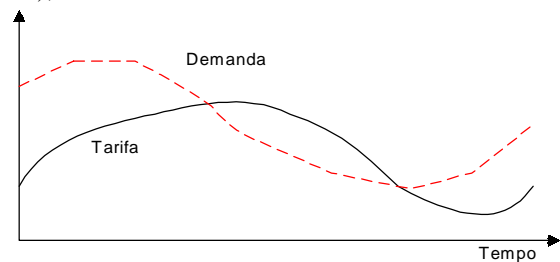


FIGURA 3 – Atrasos nas respostas gerenciais

- Respostas não-lineares para ações, como mostrado na Figura 4: pequenas reduções no preço não aumentam significativamente o consumo de energia, mas depois de um determinado ponto, pequenas reduções podem indicar relevantes aumentos de consumo, até atingir um ponto de saturação, além do qual o consumo torna-se insensível à mudanças de preço;

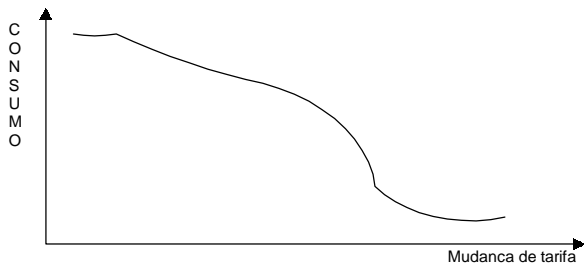


FIGURA 4 – Respostas Não-lineares

- Regras de decisão que produzem ações; como por exemplo, a definição do nível de preço baseado nos custos de produção, condições competitivas e restrições regulatórias;
- Malhas de realimentação positivas (malhas de realimentação auto-reforçante), como é mostrado na Figura 5. Neste exemplo, reduções de preço aumentam o consumo de energia que por sua vez sinalizam para reduções no custo de produção e conseqüentemente tornando viável uma nova redução de preço, considerando outros fatores que afetam o crescimento da demanda como constantes;

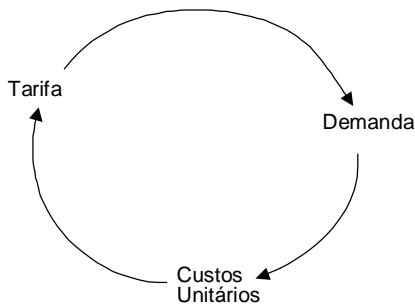


FIGURA 5 – Malha de realimentação auto-reforçante

- Malhas de realimentação negativas, como mostrado na Figura 6. Neste caso, o aumento de consumo acaba por exaurindo a capacidade disponível do sistema, diminuindo o nível de confiabilidade de fornecimento. A redução de confiabilidade tende a diminuir a taxa de crescimento da demanda, ou pela redução do consumo dos consumidores cativos ou pela ação de grandes consumidores comerciais ou industriais através da migração ou auto-produção. Então, esta malha de realimentação (-) tende a manter a demanda dentro de nível que o sistema pode suprir.

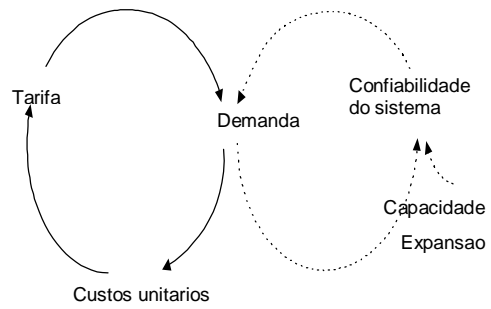


FIGURA 6 – Malha de realimentação negativa

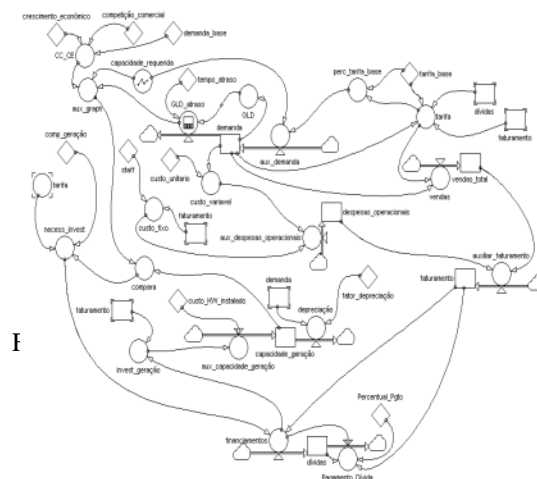
- ♦ Ferramentas de gerenciamento corporativo : podem ser representadas por malhas de realimentação adicionais. Por exemplo, a capacidade pode ser expandida a medida que a demanda aumenta, procurando evitar a redução do nível de confiabilidade (FIGURA 6). O aumento da capacidade por sua vez, aumenta os custos unitários, causando um efeito contrário da tendência de declínio das tarifas e conseqüentemente, uma redução no crescimento da demanda.

4.0 – ESTRUTURA DO SIMULADOR

A utilização de simulação via técnica de dinâmica de sistemas é apropriada para este problema, devido as seguintes peculiaridades do mesmo:

- Ausência de relações bem definidas entre as variáveis, ou mesmo as variáveis não são bem definidas;
- Inexistência de um modelo analítico para a solução;
- Necessidade da simulação do comportamento dinâmico das variáveis do sistema;
- Necessidade de representação de iterações complexas, dinâmicas e não lineares.

Os módulos da empresa, colocados na forma de dinâmica de sistemas está representado na Figura 7, mostrada abaixo. Esse modelo é baseado de [7].



O simulador desenvolvido representa setores da empresa de energia como: módulo econômico, módulo de expansão, módulo das capacidades de geração, módulo de produção de energia elétrica, além dos módulos representando agentes externos à empresa, como o módulo regulatório e o módulo de demanda de energia.

O simulador foi construído inicialmente, através dos diagramas de laço causal, os quais forma cosntruídos para cada módulo da empresa. Um exemplo do diagrama de laço causal criado está representado na Figura 8, abaixo.

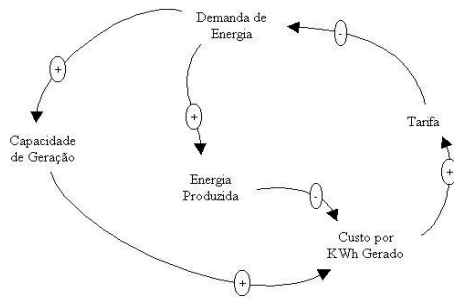


FIGURA 8 – Diagrama de laço causal

## 5.0 – RESULTADOS

O simulador, representado na Figura 7, se encontra em fase de calibração dos parâmetros, mas já se pode vislumbrar o tipo de análise what-if que poderá ser feita com ele.

Com a curva de carga considerada (Figura 9), fez-se algumas simulações envolvendo o custo variável e tarifa, por exemplo. Devido ao problema de calibração das variáveis em progresso, os resultados ainda não são confiáveis, pois o modelo deve ser ainda validado com dados reais. A título de exemplo, a saída desta simulação é apresentada na Figura 10, mostrada abaixo.

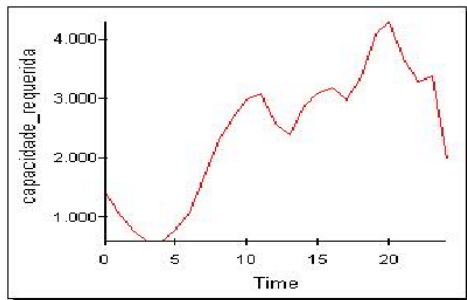


FIGURA 9 – Curva de carga considerada

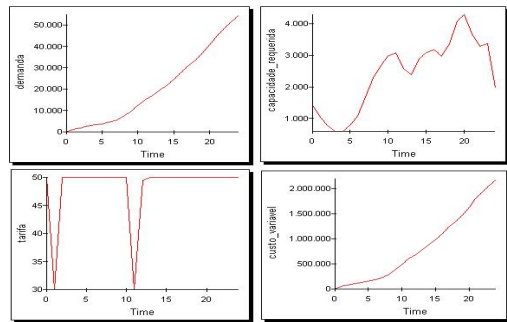


FIGURA 10 – Simulações iniciais

## CONCLUSÕES

Dentro do novo modelo do setor de energia elétrica brasileiro, as empresas de geração de energia em particular, vão enfrentar situações nunca antes experimentadas, no que se refere aos aspectos técnicos, comerciais e gerenciais.

O desenvolvimento e o uso de ferramentas computacionais de simulação, podendo ser integrada com sistemas de suporte à decisão (*DSS – Decision Supporting Systems*) e sistemas de informação executiva (*EIS – Executive Information Systems*), será extremamente importante. Para as empresas do setor, para simulação de cenários, políticas e estratégias empresariais.

O simulador desenvolvido é constituído de vários módulos, representando de forma simplificada, as principais áreas da empresa: módulo econômico, módulo de expansão, módulo das capacidades de geração, módulo de produção de energia elétrica, além dos módulos representando agentes externos à empresa, como o módulo regulatório e o módulo de demanda de energia.

O modelo construído, apesar ainda de estar em fase de validação e calibração dos parâmetros, se mostra ser muito promissor, principalmente devido a sua grande flexibilidade e facilidade em realização de análises do tipo *what-if*.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, pelo apoio financeiro a nível de bolsa de iniciação científica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) R. J. Thierauf, *Decision Support Systems for Effective Planning and Control – A case Study Approach.*, USA, Prentice Hall Inc., 1982.
- (2) H. Saint-Onge, 'Tacit Knowledge – The key to the Strategic Aligment of Intellectual Capital'. *Strategy & Leadership*, March/April 1996.
- (3) J. W. Forrester; 'Industrial Dynamics', *Management Science*, Vol. 14, No 7, May, 1968.
- (4) P. K. J. Mohapatra, P. Mandal, M. C. Bora, *Introduction to System Dynamics Modeling*, India, Universities Press Limited, 1994.
- (5) J. Forrester, 'Policies, decisions and informations sources for modeling', *European Journal of Operational Research*, 59, 1992.
- (6) J. D. W. Morecroft, 'Executive Knowledge, Models and Learning', *European Journal of Operational Research*, 59, 1992.
- D. W. Bunn, E. R. Larsen, *Systems Modelling for Energy Policy*, UK, John Wiley & Sons Ltd, 1997.