



## • **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO COM ABORDAGEM EM DINÂMICA DE SISTEMAS**

**Paulo I. Koltermann** – koltermann@del.ufms.br

**Valmir M. Pereira** – valmir@del.ufms.br

**Jéferson M. Ortega** – jmortega@del.ufms.br

**Murilo Frigo** – murilo\_frigo@hotmail.com

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Curso de Engenharia Elétrica

Campus Universitário – Cx Postal 549

79070-900 - Campo Grande - MS

**Resumo:** *A metodologia de dinâmica de sistemas é apresentada como uma alternativa para a visualização e de aprendizagem da operação dos sistemas físicos. O objetivo deste artigo é mostrar a aplicabilidade desta metodologia em simulação computacional envolvendo um contator eletromagnético. Um modelo de simulação com base em laços causais e diagramas de fluxo foi desenvolvido com Powersim<sup>®</sup> Studio Enterprise 2003, tendo os parâmetros do dispositivo levados em consideração. A exibição da saída gráfica torna-se oportuna pois é fundamental na metodologia, para o auxílio do processo ensino-aprendizagem, destacando a importância da simulação de modo que os alunos possam repensar os seus modelos envolvendo modelagem matemática de processos dinâmicos.*

**Palavras-chave:** *Dinâmica de sistemas, Contator eletromagnético, Modelagem*

### 1. INTRODUÇÃO

A atuação do engenheiro está condicionada à necessidade de adaptar o seu conhecimento à nova realidade social, cujo desempenho será dependente de sua capacidade de adaptação que assegurarão a sua sobrevivência, mas cada ação está precedida por uma percepção da realidade que por sua vez é resultado de uma ação anterior. Neste processo cíclico de percepção-ação do profissional, cria-se em sua mente uma nova apreensão de modelo da realidade, e estas apreensões são os resultados das experiências vividas, com relação à sua formulação dos problemas que retratam a realidade, e que é diferente em cada indivíduo.

Utilizando estas apreensões, muitas vezes representadas como modelos mentais, o engenheiro utiliza estas representações para servir de ponto de partida para a compreensão dos novos desafios que envolvem a realidade social. Cada pessoa tem então modelos mentais para cada um dos tipos de problemas que se colocam a sua frente, sendo estes modelos mentais estão estruturados com maior ou menor complexidade de acordo com a profundidade do conhecimento que o engenheiro tenha de tal problema.

Os modelos mentais não são unívocamente comunicáveis e sua limitação e imprecisão os fazem ineficazes para a tomada de decisões, do que se faz necessário então sua formalização a

Realização:



Organização:



**O ENGENHEIRO  
PROFESSOR E O  
DESAFIO DE EDUCAR**



través de uma linguagem, por exemplo, a Dinâmica de Sistemas e, esta formalização recebe o nome de modelo formal, e desta maneira outros podem conhecer a interpretação do fenômeno que foi realizada por um indivíduo e compará-la com a sua, questionando-a, e deste questionamento pode-se obter novos modelos mentais ou a reformulação dos já existentes.

Diante de uma realidade social, os atores que atuam no processo de intervenção dessa realidade, constroem seus próprios modelos mentais sobre os problemas ou fenômenos envolvidos. No caso do ensino de engenharia, os atores podem ser tanto os professores quanto os estudantes, mas é de se esperar que os primeiros assumam a responsabilidade de promoverem a elucidação da realidade social (problemas) para então através da dialética, proporcionar a aprendizagem dos estudantes, favorecendo o entendimento, a partir da permanente confrontação e reconstrução desses modelos mentais (VYGOTSKY, 1993).

No caso de modelos mentais formulados a partir da metodologia de Dinâmica de Sistemas, os mesmos podem ser simuláveis por computador, permitindo algo que não é possível unicamente com a mente, à medida que podem representar os comportamentos no tempo, resultantes da interação entre os diferentes componentes do sistema ou problema, que em geral a mente humana não está capacitada para projetar no tempo estas interações. Uma possível razão desta incapacidade é que o modelo educativo de engenharia atual predomina a tendência a pensar em termos de relações de causa-efeito unidirecional, contrariando a estrutura de realimentação que se manifesta nos fenômenos e situações problemas reais.

A importância dos modelos mentais nesta proposta educativa, consiste na consciência que deve ter o transmissor desse conhecimento traduzido em experiência, com o qual o estudante possa compartilhar mediante o processo de expressão e comunicação desse conhecimento, estimulando a racionalização e reconstrução a partir da análise do objeto ou situação-problema em estudo. Portanto, permite enriquecer os modelos mentais iniciais e assim promover uma formalização que permita, com a utilização desses modelos formalizados, uma posterior simulação e experimentação, adaptando-se a uma nova realizada presente.

A aprendizagem é um processo ativo em que o aprendiz constrói seu conhecimento através de interações com pessoas mais experientes e com o meio ambiente e também, do resultado do conflito cognitivo que ocorre entre suas expectativas e observações. Conseqüentemente, procura-se relacionar situações-problemas desconhecidos a partir de analogias com resultados e experiências já vivenciadas.

A questão da modelagem no ensino pode ser abordada a partir de pelo menos 3 perspectivas: construção do conhecimento; explicitação e refinamento das representações mentais sobre um conhecimento; e percepção do mundo a partir de uma visão de dinâmica de sistemas.

### **1.1. Construção do Conhecimento**

O objetivo primeiro da engenharia é o de tentar entender e explicar fenômenos que ocorrem no mundo real. Os modelos têm papel fundamental neste processo, sendo utilizados pelos cientistas como importantes "ferramentas do pensamento" no auxílio ao desenvolvimento de suas atividades. Este processo requer a manipulação de um conjunto de habilidades cognitivas tais como formulação e teste de hipóteses; abstração; idealização; etc. Permitir aos estudantes tornarem-se "aprendizes ativos" é essencialmente dar-lhes a oportunidade de pensar de forma crítica sobre conceitos científicos e questioná-los. O importante então não é o de fazê-los encontrar respostas corretas pela simples aplicação de



fórmulas, mas engajá-los em atividades através das quais podem desenvolver seu próprio conhecimento ou interpretações.

## **1.2. Explicitação e refinamento das representações mentais**

Os computadores – e em particular as ferramentas de modelagem - permitem os estudantes irem mais além, na exploração destes conhecimentos, investigando as relações entre diferentes objetos, formulando e testando hipóteses, etc. Na verdade o que se estará proporcionando em tais ambientes é a reconstrução dos modelos mentais dos estudantes sobre um determinado conhecimento. No momento em que os estudantes se confrontam com as inadequações de seus modelos mentais, abre-se a oportunidade para que eles procurem formas alternativas de entendê-los, ou seja, a busca por modelos mentais alternativos (VON BERTALANFFY, 1968).

## **1.3. Percepção do mundo a partir de uma visão de Dinâmica de Sistemas**

A teoria geral sobre sistemas pode ser entendida como uma "nova" forma de entender fenômenos dinâmicos que ocorrem no nosso dia-a-dia, levando-se em conta não apenas as relações causais entre pares de variáveis, mas o comportamento do sistema como um todo. Suas origens estão na engenharia de sistemas de controle e comunicação onde se procura, principalmente, entender o funcionamento dos sistemas servomecânicos.

Dois importantes conceitos estão associados a esta idéia: relações de causa e efeito, ciclos de retroalimentação ("feedback, loops"). Do ponto de vista educacional, o entendimento e aplicação destes conceitos abre aos estudantes a possibilidade de entender sistemas dinâmicos complexos, focando tanto as formas de um determinado sistema, quanto também o como e o porque tais sistemas mudam com o passar do tempo.

A Dinâmica de Sistemas é uma metodologia usada no estudo de sistemas complexos e dinâmicos. Suas qualidades pedagógicas tem sido aproveitadas em vários países e tem como objetivo fornecer aos estudantes uma ferramenta que permita o desenvolvimento dos aspectos cognitivos, de modo a influenciar significativamente a sua forma de pensar.

Um modelo é um substituto para um objeto ou sistema. Qualquer conjunto de regras e relações que descrevem algo pode ser considerado um modelo. Todo o nosso pensamento depende de modelos. Conceitos mentais são abstrações em nossa experiência. Essa experiência é filtrada e modificada por nossa percepção individual e processos de organização, para produzir modelos mentais que representam o mundo ao nosso redor. Modelos de simulação matemática pertencem à ampla classe dos modelos abstratos que incluem imagens mentais. Neste trabalho, o software POWERSIM<sup>®</sup> foi utilizado na construção e exploração do modelo de um contator eletromagnético.

## **2. DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO - CONTATOR**

Os contadores são dispositivos empregados no comando local ou à distância de motores de indução, ou a partir de sistemas de velocidade variável, Controladores Lógicos Programáveis (CLP's) e outros sistemas de controle microprocessados tornando-se muito importantes para a confiabilidade de operação dos processos produtivos.

Para tanto, torna-se imprescindível o domínio de seu funcionamento dinâmico para se promover a confiabilidade de operação de cargas a ele interligadas.



## 2.1. Sistemas e Modelos

Sistemas de modelagem que permitem a construção de modelos que se modificam (evoluem) com o tempo são conhecidos como ferramentas de modelagem dinâmica. Os modelos quantitativos são fortemente baseados numa formulação matemática das variáveis e relações existentes entre as mesmas para descrever (ou modelar) uma determinada situação do mundo representado. Um sistema é constituído de um conjunto de elementos (ou componentes) que interagem para um propósito. O contator eletromagnético, tipicamente utilizado nos processos industriais, se constitui num equipamento, o qual é responsável pelo chaveamento de motores de indução. Assim, as peças de um contator formam um sistema; sendo que seus componentes isolados nem sequer se parecem com o sistema que constituem. Entretanto, na falta de um desses componentes, o sistema é incapaz de desempenhar as funções que o conjunto como um todo deve desempenhar.

A palavra modelo tem diferentes significados para diferentes áreas do conhecimento tais como lógica, engenharia ou biologia. No entanto quando alguém fala do modelo de um contator eletromagnético, o que o estudante está certamente interessado é num sistema simplificado capaz de simular algumas características significativas do contator que pertence ao mundo real.

Um outro importante aspecto dos modelos e do processo de modelagem é que uma mesma realidade pode ser modelada de diferentes maneiras, representando diferentes aspectos do problema ou diferentes visões do modelador.

Um modelo de simulação envolvendo fenômenos associados a um dispositivo deve responder às seguintes questões:

- a) Quais variáveis contribuem para explicar os fenômenos e quais processos existentes que interagem por trás dos fenômenos (tensão, corrente, impedâncias)?
- b) Como os processos evoluem (movimento, aceleração)?
- c) Onde ocorrem os fenômenos (efeito joule, fricção)?

Estas questões-chaves podem ser identificadas como as clássicas “Porquê”, “Quando” e “Onde ocorrem”. Um modelo que responde a estas questões é capaz de descrever quantitativamente um fenômeno e prever sua evolução, integrando suas escalas temporal e espacial.

## 2.2. Modelagem dinâmica do Contator de Corrente Alternada

Para cálculo e análise do comportamento do contator CA, equações diferenciais são formuladas. A descrição do sistema de equações inclui o movimento mecânico (posição, velocidade e aceleração) e correntes do circuito, sendo resolvido por método de integração numérica (BASTOS, 2004).

A Figura 1(a) apresenta o circuito magnético, cujo circuito elétrico equivalente referido à bobina principal é mostrado na Figura 1(c). Nestes circuitos, “ $R_1$  e  $R_2$ ” representam as resistências da bobina e do anel de curto-circuito, “ $L_{d1}$ ,  $L_{md1}$  e  $L_{d2}$ ” representam as indutâncias de dispersão da bobina e do anel de curto-circuito e “ $L_{m1}$ ” representa a indutância mútua (KOLTERMANN, 1992).

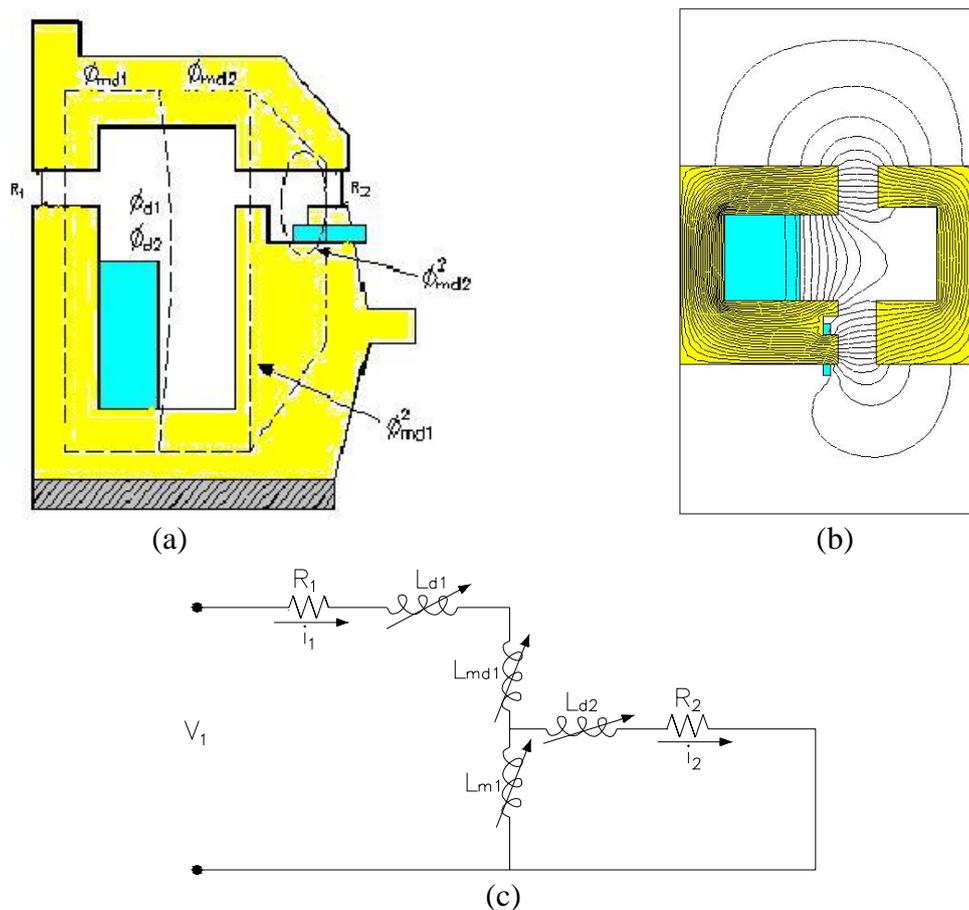


Figura 1. Contator de Corrente Alternada: (a) Circuito Magnético, (b) Diagrama de campos, (c) Circuito Elétrico Equivalente

Nessa análise, a tensão da bobina é assumida como sendo senoidal, com a forma da equação (1):

$$V_1 = V_m \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

Todas as indutâncias, nesta modelagem, são encontradas por Software de elementos finitos – EFCAD (Figura 1.b), reproduzindo o comportamento não linear do fluxo (indutância).

De acordo com o tensor de Maxwell [4] a força eletromagnética instantânea que produz o movimento de fechamento do contator pode ser expressa em Newton/pólo, pela Equação (2):

$$F = \frac{(B_m \text{sen}\omega t)^2}{2\mu_0} = \frac{(\phi_m \text{sen}\omega t)^2}{2\mu_0 S} \quad (2)$$

Onde “ $B_m$ ” e “ $\phi_m$ ” são a indução magnética máxima e fluxo magnético máximo no entreferro respectivamente, “ $S$ ” é a área da face do pólo do núcleo magnético e “ $\mu_0$ ” a permeabilidade magnética do ar.



Na face do pólo 1 a força instantânea é obtida pela Equação (3):

$$F_1 = \frac{\phi_1^2 \text{sen}^2 \omega t}{2\mu_0 S_1} \quad (3)$$

A força instantânea produzida pela face do pólo do anel de curto-circuito é obtida pela Equação (4):

$$F_2 = \frac{\phi_{21}^2 \text{sen}^2 \omega t}{2\mu_0 S_{21}} + \frac{\phi_{m1}^2 \text{sen}^2(\omega t - \alpha)}{2\mu_0 S_{22}} \quad (4)$$

Onde “ $\phi_{md1}$ ” e “ $\phi_{m1}$ ” são os fluxos na seção externa e interna ( $S_{21}$  e  $S_{22}$ ) do anel respectivamente; “ $\alpha$ ” é o ângulo entre os dois fluxos (bobina e anel de curto-circuito).

A força eletromagnética instantânea total é dada por  $F_e = F_1 + F_2$ .

O fluxo magnético resultante produz a força eletromagnética que impele a parte móvel a se movimentar contra a força restritiva imposta pelas molas, fechando os contatos elétricos.

Assume-se que o contator trabalha fora da região de saturação, sendo os fluxos obtidos das correntes “ $i_1$  e  $i_2$ ” calculadas a partir do circuito elétrico equivalente.

Aplicando a lei das malhas de Kirchoff, obtêm-se o sistema de Equações (5):

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_d & -j\omega L_{m1} \\ -j\omega L_{m1} & R_2 + j\omega L_d' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde  $L_d = L_{d1} + L_{md1}$

Fazendo algumas transformações algébricas no sistema de Equações (5), obtêm-se o sistema de Equações (6) e (7) para as correntes  $i_1$  e  $i_2$  ( $x_1$  e  $x_2$ ) respectivamente:

$$\begin{bmatrix} L_{m1} + L_d & -L_{m1} \\ -L_{m1} & L_{m1} + L_d' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_1 & 0 \\ 0 & -R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

e,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

No sistema de Equações (7) a matriz [A] é a inversa da matriz de indutâncias [L] multiplicada pela matriz de resistência [R]. A cada passo de tempo uma nova matriz de indutâncias é calculada.

A partir da 2ª Lei de Newton, tem-se a Equação (8) do movimento, dada por:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{el} - F_m - B \frac{dx}{dt} \quad (8)$$



Onde, “ $F_{el}$ ” e “ $F_m$ ” representam a força eletromagnética e mecânica resultantes (bobina e molas) respectivamente; “ $B$ ” é o coeficiente de amortecimento; “ $M$ ” é a massa da parte móvel e “ $x$ ” o deslocamento.

Da 2ª lei de Newton, Equação (8), são determinadas as equações de estado para o deslocamento e velocidade. O sistema de Equações (9) é resolvido por integração passo-a-passo no tempo (Runge-Kutta de 4ª ordem).

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{M}(F_{el} - F_m - Bx_4) \end{cases} \quad (9)$$

A força mecânica ( $F_m$ ) é obtida pela resultante da soma de todas as forças devidas às molas de curso, principal, normalmente aberta (NA) e normalmente fechada (NF).

### 3. DINÂMICA DE SISTEMAS

O Ambiente de Modelagem Computacional POWERSIM<sup>®</sup> é um ambiente baseado nos Princípios de Sistemas e projetado para o estudo e construção de modelos através de uma representação gráfica baseada em ícones.

A possibilidade de se utilizar o ambiente de modelagem de dinâmica de sistemas, envolvendo resolução de equações diferenciais se deve ao fato do ambiente ser apropriado para resolução por métodos de integração numérica. Em cada simulação pode-se alterar parâmetros do modelo e imediatamente observar as conseqüências decorrentes dessas alterações. Este procedimento consiste na análise de sensibilidade do modelo as mais variadas perturbações, permitindo que o estudo propicie uma maior interpretação dos resultados.

#### 3.1. Diagramas Causais – Níveis e Taxas

O pensamento causal é a chave para organizar as idéias num estudo de dinâmica de sistemas. Os diagramas causais são também chamados de diagramas de influências. A técnica permite ao estudante expressar seu nível de entendimento de uma situação.

Os diagramas causais representam apenas qualitativamente as relações de causa e efeito que ocorrem num sistema complexo.

A atividade de modelagem ajuda o estudante a entender os diagramas causais e a desenvolver tanto o pensamento sistêmico como o senso crítico com relação a problemas propostos.

O primeiro passo na mudança de uma representação por diagrama causal para uma simulação no computador é a identificação de níveis e taxas do sistema. Um nível é uma quantidade que acumula no tempo, e uma taxa ou fluxo é uma atividade, ou movimento, que contribui para a mudança por unidade de tempo num nível. Para isso, é analisado na figura 2 uma situação-problema, como forma de visualização de aplicação da metodologia.

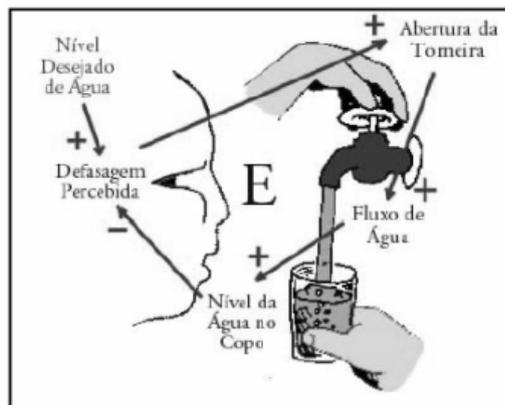


Figura 2 Diagrama de Laços causais – Sistema controle nível água copo

Os diagramas de laços causais representam as relações de causa entre as variáveis envolvidas no sistema. De uma forma qualitativa as variáveis principais de efeito são postadas e interpretadas nos laços causais. A indicação do sinal mais (+) entre duas variáveis mostra que a relação entre elas é diretamente proporcional conforme a variação no tempo, enquanto que o sinal menos (-) é inversamente proporcional.

Para uma representação quantitativa usa-se os Modelos de Estoque (níveis) e Fluxo (taxas), que são semelhantes aos modelos causais, com a diferença de que as relações são expressas através de fórmulas lógico-matemáticas.

Após a identificação das variáveis como níveis e taxas, transforma-se a representação do sistema da Figura 1 na forma de um diagrama conforme a Figura 3 (FORRESTER, 1973).

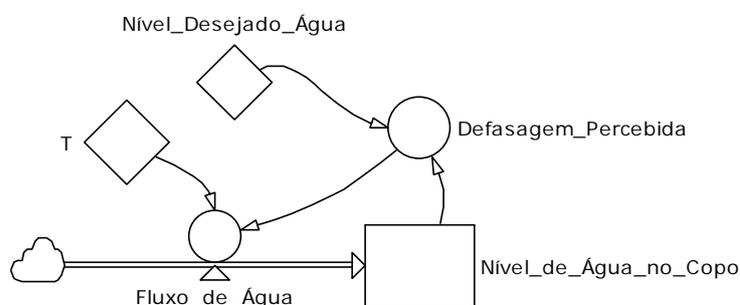


Figura 3. Diagrama de Fluxo – Sistema controle nível água copo

#### 4. RESULTADOS

O contator analisado possui molas das quais assumimos obedecer a lei de Hooke com a condição que a força da mola varia conforme o deslocamento “x”.

Pode-se observar através do modelo da Figura 4 que as variáveis de posição (x) e velocidade (vx) estabelecem na representação em dinâmica de sistema, o estoque ou nível do modelo, sendo dx\_dt e dvx\_dt as taxas ou fluxos.

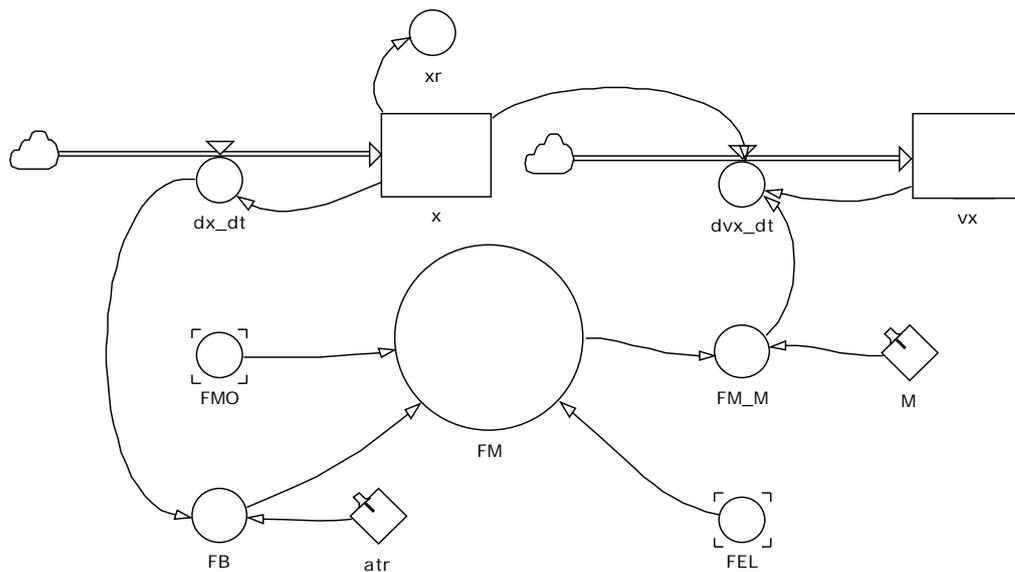


Figura 4. Diagrama de estoque-fluxo – Interação das forças do contator.

O diagrama de estoque e fluxo, ilustrado através da Figura 5, mostra a relação das variáveis de estado das correntes com os elementos das matrizes definidas anteriormente, quando aplicado uma tensão senoidal. É a partir dessas correntes que será gerada a força eletromagnética no contator, observando sua variação conforme o instante da sua simulação.

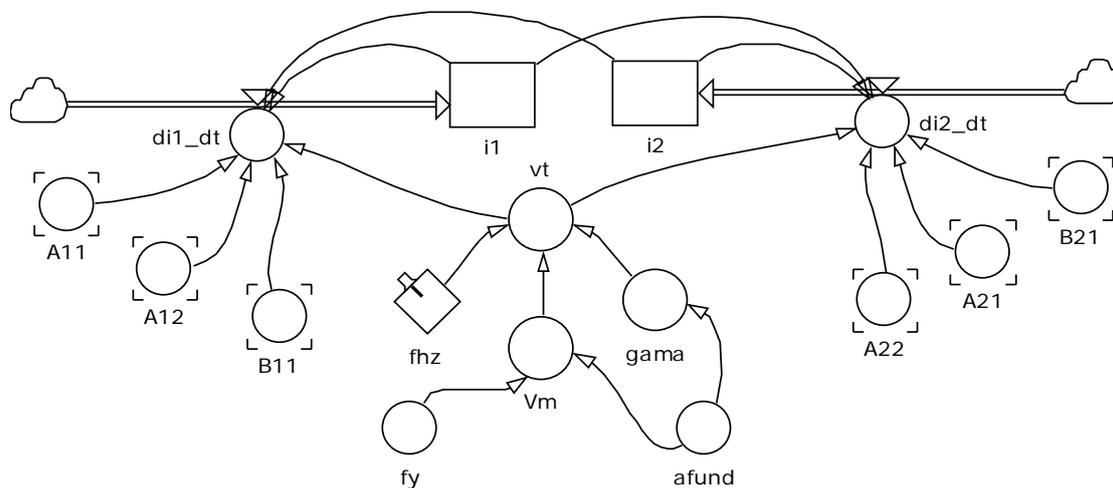


Figura 5. Diagrama de estoque-fluxo – Variável de estado das correntes.

As Figuras 6 e 7 ilustram o comportamento da força mecânica e da corrente durante a energização do contator.

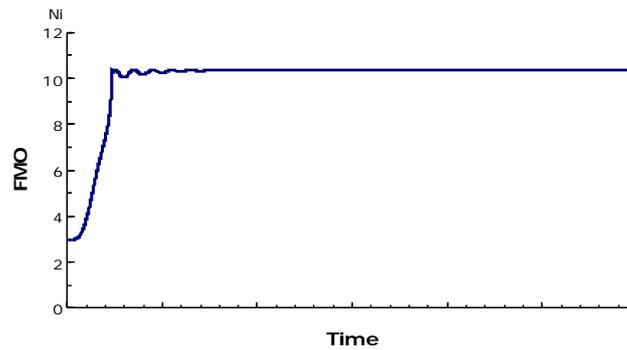


Figura 6. Força mecânica x tempo

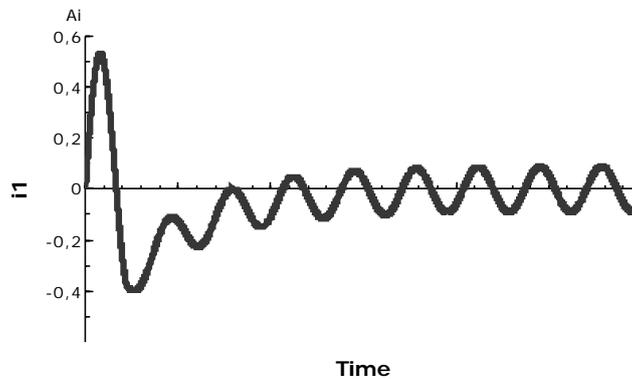


Figura 7. Corrente de partida x tempo

A Figura 7 ilustra o comportamento da força eletromagnética total, obtida pelo efeito simultâneo das correntes da bobina principal e do anel de curto-circuito. Percebe-se que a força é sempre positiva e maior que zero, permitindo com que o contator se mantenha sempre na condição fechada, quando da passagem da corrente ou fluxo pelo zero.

Os resultados contemplam qualitativamente e quantitativamente o comportamento esperado das variáveis, configurando a boa performance da modelagem.

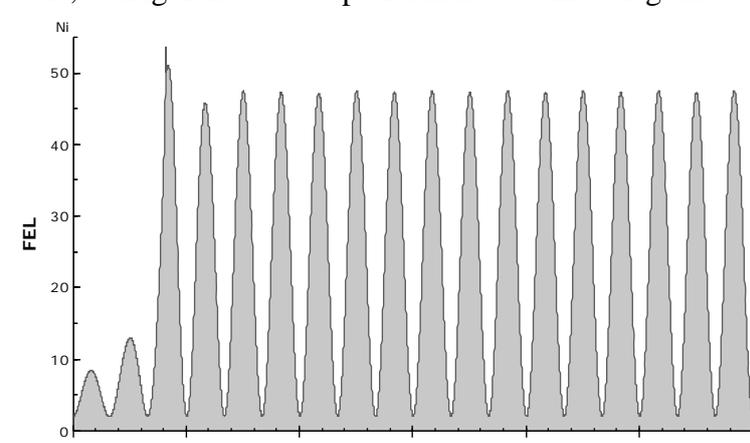


Figura 7. Força Eletromagnética x tempo



Com isso, atribui-se à ferramenta de dinâmica de sistemas uma forte opção para estudo de sistemas físicos complexos, na presença de fenômenos transitórios, formulados através de equações diferenciais. A visão qualitativa do comportamento de um sistema físico é muito importante no processo de ensino-aprendizado, pela representação mental necessária na adequação dos laços causais e pela montagem do sistema de equações e respectiva resolução por métodos numéricos.

## 5. OBSERVAÇÕES FINAIS

Simular um modelo pode ser cognitivamente exigente. A interpretação da dinâmica do movimento requer do estudante além da representação física mental, um conhecimento matemático bastante profundo, domínio de análise de circuitos e de métodos numéricos. A dinâmica de sistemas, através de Softwares aplicativos, permite ao estudante a interação com estes conceitos e estabelece a possibilidade de uso de uma interface amigável, para simulação e apresentação de saídas gráficas.

A utilização da modelagem computacional é extremamente pedagógica, pois permite ao estudante estruturar determinados conceitos ou conjunto de conceitos e dentro da concepção do fenômeno estabelecer um padrão alternativo de ensino organizado. Isso faz com que ele possa colocar em prática seus conhecimentos com maior facilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FORRESTER, J. W., *World Dynamics*, Cambridge, MA, Wright-Allen Press, 1973

BASTOS, J. P. A., *Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática*, Editora da UFSC, 2004, Florianópolis, Brasil.

VYGOTSKY, L. S., *Pensamento e Linguagem*, São Paulo, Ed. Martins Fontes, 1993.

BERTALANFFY, L. von, *A Teoria Geral dos Sistemas*. Rio de Janeiro, Ed. Vozes, 1968.

KOLTERMANN, P. I. , J. P. Assumpção Bastos and S. R. Arruda, "A model for Dynamic Analysis of AC Contactor," *IEEE Trans. on Mag.*, vol. 28, No. 2, pp. 1348-1350, March. 1992.

## MODELING AND SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC DEVICE WITH DYNAMIC SYSTEMS APPROACH

**Abstract:** *The methodology of Systems Dynamics is presented as an alternative to visualizing and learning the operation of physical systems. The objective of this article is to show the applicability of this technology in computer simulation involving an Electromagnetic Contactor. A simulation model based on causal loops and flow diagrams was developed with*



*Powersim® Studio Enterprise 2003, taking the device parameters into consideration. The timely graphical output display becomes a tool in aiding the teaching-learning process, highlighting the importance of the simulation so that students can rethink their models of certain dynamic processes.*

**Key-words:** *Systems dynamics, Electromagnetic Contactor, Modelling*