

INTRODUÇÃO AO CAOS: CONTRIBUIÇÃO METODOLÓGICA DO DAFIS PARA A PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

Mário Sérgio Teixeira de Freitas¹

Resumo: Descrevemos a metodologia inovadora para ensino de Engenharia que foi desenvolvida no DAFIS, da UTFPR, referente ao conteúdo de Dinâmica Não-Linear e Caos, e também apresentamos alguns aspectos históricos desta ciência. Tal metodologia tem sido adotada com sucesso desde 2003 no programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI), da UTFPR, e é baseada em princípios mais construtivistas do que instrutivistas.

Palavras-chave: Dinâmica não-linear, caos, pós-graduação.

Abstract: In this paper we describe an innovative methodology for engineering which was developed at UTFPR by a professor from DAFIS, concerning Nonlinear Dynamics and Chaos contents, and we also present some historical features of this science. Such methodology has been successfully adopted since 2003 at the Post-Graduation Program in Electric Engineering and Industrial Informatics (CPGEI) of UTFPR, and it is based on constructivist principles rather than instructivist ones.

Keywords: Nonlinear dynamics, chaos, post-graduation.

1. A CIÊNCIA DO CAOS NO CONTEXTO DA ENGENHARIA NA UTFPR

Uma metodologia de ensino inovadora vem sendo aplicada com sucesso desde 2003 na disciplina “Tópicos de Dinâmica Não-Linear e Caos”, ofertada pelo CPGEI (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial), da UTFPR, destinada a estudantes de pós-graduação, e extensiva a estudantes de graduação interessados. A metodologia foi concebida pelo professor

¹ Doutor em Física pela UFPR, área de Fluidos, Plasmas e Sistemas Complexos. Professor nos cursos superiores da UTFPR desde 1983, professor convidado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI). Atua no Grupo de Estudos e Pesquisas em Ensino de Física (GEPEF). *msergio58@yahoo.com.br*

Mário Sérgio T. de Freitas, do DAFIS, que atua esporadicamente no CPGEI como docente convidado, e foi objeto de apresentação de um trabalho no XXXV COBENGE, realizado em Curitiba em 2007 (FREITAS, 2007).

As aulas, que têm lugar num laboratório apropriado, envolvem exposição teórica e a aplicação de instrumentos de aprendizagem centrada no estudante, incluindo atividades experimentais. A metodologia é apoiada em bases mais construtivistas do que instrutivistas, visando à aquisição de um saber mais consolidado e que seja consistente com o perfil individual de cada estudante (CARVALHO, 2004). São incentivadas iniciativas de apresentação de trabalhos, de preferência explorando a criatividade e a imaginação do estudante, como recurso motivador na área de Ciências Exatas (PIETROCOLA, 2004).

O Grupo de Estudos e Pesquisas em Ensino de Física (GEPEF) do Departamento Acadêmico de Física (DAFIS), da UTFPR, congrega docentes atuantes na área de Ensino de Física nos níveis secundário e superior. Recentemente, alguns doutores formados em diferentes áreas da Física Teórica e Experimental se integraram ao GEPEF tendo, então, iniciado estudos sistemáticos sobre pesquisa em ensino de Física e participado de eventos da área, visando a uma qualificação que possa levar a uma melhor estruturação, sistematização e divulgação do trabalho que vem sendo conduzido. Uma das linhas de trabalho envolve a adaptação de metodologias ao ensino de graduação em Engenharia, estendida também para o ensino de pós-graduação. Além do ensino de Física, a área de Divulgação Científica também tem sido objeto de estudo e pesquisa, inclusive no âmbito da Astronomia para o público leigo.

Uma enorme diversidade de comportamentos dinâmicos é verificada nos sistemas não-lineares, o que tem sido objeto de extensos estudos nas últimas décadas, aplicados a diversas áreas da Ciência e da Tecnologia (STROGATZ, 1994). Por exemplo, o comportamento estatístico conhecido como “invariante de escala” conduz aos ditos sistemas complexos, nos quais as interações não-lineares geram a “auto-organização” (CIÊNCIA HOJE, 1992), (FLAKE, 1998). E modelos matemáticos de relativa simplicidade levam a comportamentos espaço-temporais cheios de aspectos interessantes, como as redes neurais e autômatos celulares (FLAKE, 1998), (KAPLAN & GLASS, 1995), (WOLFRAM, 2002). É nesse sentido que emergiu a necessidade de um curso introdutório para os estudantes do CPGEI.

2. UMA CIÊNCIA RECENTE

A formulação de um conceito rigoroso para “caos” representou, historicamente, uma mudança de paradigma no determinismo de Laplace do século XIX, que interpretava o universo inteiro como um mecanismo de relojoaria, ou seja, bastaria conhecer as leis da Física e os valores numéricos das variáveis em um

dado instante, para que se pudesse prever os valores assumidos no futuro, ou reconstituir os valores passados (FLAKE, 1998), (SCHUSTER, 1984). Assim, a propriedade chamada “dependência sensível às condições iniciais” levou aos métodos para controle de caos, aplicáveis a áreas tão diversas como a Astronáutica, a Eletrotécnica e a Neurologia (SHINBROT et al., 1993) e, posteriormente, ao controle de complexidade, exemplificável por um sistema mecânico (MACAU & GREBOGI, 1999).

No âmbito do de laboratório, por muito tempo houve uma confusão entre “caos” e “ruído”, que até algumas décadas atrás era justificada pelas limitações computacionais, que não permitiam o confronto entre resultados obtidos em laboratório e simulações teóricas: sistemas de equações diferenciais com termos não-lineares não admitem, em sua maioria, resolução analítica, devido à perda da integrabilidade (LICHTENBERG & LIEBERMAN, 1997). E resultados de medições que indicassem comportamento irregular eram normalmente descartados, sendo atribuídos, por equívoco, a imperfeições no processo de medida, que estariam introduzindo ruído externo no sistema (PEAK & FRAME, 1994).

Nessa Ciência, um recurso poderoso é o paralelo entre o comportamento dinâmico e a estrutura de entes geométricos no espaço de fase, como por exemplo os atratores caóticos (WIGGINS, 1997).

Além da construção de modelos, a Dinâmica Não-Linear também abrange o processamento de sinais: dispendo-se da série temporal de valores de uma única variável medida é reconstruída a dinâmica que gerou essa série, ou seja, entre outros aspectos, levanta-se quantas variáveis estão envolvidas no sistema (KAPLAN & GLASS, 1995). Nesse sentido, muitos métodos estatísticos vêm sendo desenvolvidos. Essa ciência é aplicável a qualquer área de pesquisa que envolva a evolução de variáveis inter-relacionadas por equações não-lineares. Além dos casos mais conhecidos, do âmbito da Física e das Ciências da Engenharia, podem ser igualmente citadas como exemplos a Meteorologia, a Ecologia, a Fisiologia, a Bioquímica, a Economia, a Astronomia, etc (STROGATZ, 1994).

3. SOLUÇÕES PARA OS PRINCIPAIS PROBLEMAS INSTRUACIONAIS

Para que um estudante possa aproveitar devidamente o conteúdo ministrado nesta disciplina, é importante que tenha noções básicas de Cálculo Diferencial e Integral, Álgebra Linear, Fundamentos de Métodos Numéricos, vivência com recursos de informática e compreensão de textos científicos em língua inglesa.

Tendo em vista estabelecer um conteúdo programático, tópicos de maior interesse foram selecionados, de forma que a teoria pudesse ser aplicada a múltiplas linhas de pesquisa. Também foi planejado que se adotasse um único livro-texto que incluísse os itens desejados, compatível com um curso de 12 semanas. Nesse

período, são totalizadas 22 horas de aula teórica, mais 23 de aprendizagem centrada no estudante. No caso, as aulas são ministradas uma vez por semana, sempre no período da manhã, consistindo em 2 horas de apresentação da teoria, mais 2 horas extras para que os estudantes exercitem, na presença do professor e em ambiente apropriado, as simulações computacionais, que são fundamentais em sistemas não-lineares. As aulas teóricas são enriquecidas com freqüentes exemplos de referência, nos quais a contextualização dos conceitos apresentados pelo professor podem ser discutidos na seqüência pelos estudantes, ainda no espaço de aula. Com o recurso de um projetor multimídia, são acessadas imagens gráficas de alta complexidade, assim como a demonstração de simulações computacionais durante a explanação teórica. Simultaneamente, um retroprojetor com cópias em transparência das figuras do livro-texto adotado ajuda a referenciar o texto das notas de aula. Das 23 horas de atividades de aprendizagem centrada no estudante, uma envolve um seminário ao qual os estudantes devem comparecer em horário extraclasse, e as demais são realizadas na sala especial B303, disponibilizada pelo Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN), da UTFPR, Campus Curitiba, a qual conta com 12 microcomputadores distribuídos em bancadas compartilhadas por 2 usuários. São distribuídos instrumentos de aprendizagem impressos, elaborados especialmente para a disciplina, que desafiam o estudante a investigar um determinado sistema dinâmico, tirando conclusões sobre vários aspectos do seu comportamento, sempre remetendo a conceitos expostos em aula teórica. Não é exigido dos estudantes o desenvolvimento de algoritmos de programação propriamente ditos, para integração numérica de equações diferenciais: opta-se por usufruir de programas já disponíveis gratuitamente na Internet, inclusive de aplicativos em Java que oferecem uma visualização direta do espaço de fase, focalizando o interesse na interpretação desses resultados em termos dinâmicos (SUN MICROSYSTEMS, 2005). Apenas exercícios modestos de programação são propostos, como o método de Euler (FLAKE, 1998), executável numa planilha do Microsoft Excel. Uma aula destina-se à medição experimental da dimensão fractal: são fornecidos materiais reaproveitáveis, como papel vegetal milimetrado para levantar a dimensão do atrator de Ikeda pelo método de contagem de caixas (SCHUSTER, 1984), e também uma experiência com bolas de papel amarrotado (PEAK & FRAME, 1994). Além disso, alguns materiais são trazidos pelo professor para as exposições teóricas, com a finalidade de exemplificar fenômenos naturais que envolvem os processos matemáticos descritos, como uma espécie rara de couve-flor cujo padrão geométrico se assemelha ao espaço de parâmetros do conjunto de Mandelbrot (FLAKE, 1998), um conjunto de 4 esferas metalizadas no qual o espalhamento caótico de luz visível pode ser percebido por observação direta (SWEET et al., 1999), e uma demonstração ao vivo da formação de um padrão de fractalidade, usando gel dental vermelho e duas transparências de acetato (PEAK & FRAME, 1994). Houve estudantes que chegaram a produzir material didático, como programas computacionais interativos para que o usuário possa conduzir

simulações referentes a sistemas dinâmicos, ou um algoritmo para cálculo de dimensão fractal, ou ainda a sistematização de programas interativos livres em um arquivo permanente. Essas atividades passaram recentemente a ser documentadas com relatos diários e registros fotográficos, estando a documentação disponibilizada numa página de internet mantida pelo professor (FREITAS, 2007a).

Para apoio bibliográfico de grande parte do conteúdo programático, a metodologia adota um único livro-texto, para viabilizar um ágil acompanhamento das aulas (KAPLAN, 1995). A avaliação continuada se baseia nos próprios trabalhos realizados pelos estudantes em tempo de aula, e em três provas que envolvem questões teóricas e problemas. Todo o desenvolvimento da metodologia descrita foi idealizado a partir dos interesses da Coordenação do CPGEI-UTFPR, não tendo sido baseado em modelos pré-existentes.

4. UMA IMPLEMENTAÇÃO BEM-SUCEDIDA

“Tópicos de Dinâmica Não-Linear e Caos” foi oferecida pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI), da UTFPR, nos anos de 2003 (terceira fase), 2005 (terceira fase), 2006 (segunda fase), e 2007 (segunda fase). A frequência média dos participantes nas aulas e atividades tem sido, em média, de 90%, e o índice de aprovação é elevado, a grande maioria atingindo os graus A ou B nas avaliações. As aulas também costumam ser freqüentadas por profissionais não submetidos à avaliação, que já possuem título de doutor, o que faz enriquecer as discussões entre os estudantes. A implementação tem sido bem sucedida, inclusive conduziu a uma monografia de projeto final da Engenharia Eletrotécnica, sobre caos em um circuito com diodo não-linear (PARANÁ, 2004), e uma tese de doutoramento do próprio programa de pós-graduação, sobre modelos de tráfego em servidores web (PEDROSO, 2006), contando, respectivamente, com a orientação e a co-orientação do autor deste trabalho. Outro aspecto a ser ressaltado quanto à abrangência da metodologia foi a participação de um estudante de ensino técnico integrado, da UTFPR, no ambiente das aulas, que por iniciativa própria procurou o professor por se interessar por investigações matemáticas nesta área. No momento, o referido estudante está desenvolvendo um trabalho de iniciação científica com orientação do professor da disciplina (GAMA e FREITAS, 2008). Outro trabalho atualmente em andamento é uma tese de doutoramento envolvendo autômatos celulares, já tendo passado pela fase de qualificação (WEINERT, 2008).

Desde a primeira vez em que foi aplicada no CPGEI-UTFPR, a metodologia desenvolvida para “Tópicos de Dinâmica Não-Linear e Caos” foi alvo de discussões abertas no próprio espaço de aula, nas quais os estudantes matriculados manifestaram, de maneira informal, sua aprovação quanto à eficiência em termos de aproveitamento do conteúdo. Outro indicador do êxito alcançado é o fato de a

disciplina receber uma procura significativa nas fases do programa em que é ofertada. O conteúdo tem sido aproveitado em projetos de pesquisa que envolvem sistemas não-lineares. Espera-se que haja continuidade desse processo, permitindo um crescente aperfeiçoamento.

Agradecemos ao professor Heitor Silvério Lopes, do CPGEI-UTFPR, pelo seu apoio, por ter sido de fundamental importância na implementação da disciplina pela primeira vez em que foi ofertada, em 2003.

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, A. M. P. Critérios estruturantes para o ensino de Ciências. In: Carvalho, A. M. P. (org.). *Ensino de Ciências*. São Paulo: Thomson, 2004. p. 1-17.
- CIÊNCIA HOJE, número especial sobre Caos, março e abril de 1992.
- FLAKE, G. *The computational beauty of nature*. Cambridge, Massachusetts: Bradford, 1998.
- FREITAS, M. S. T. *Caos em sistemas não-lineares: metodologia numa disciplina introdutória para pós-graduação*. In: Anais do XXXV COBENGE, Curitiba, 2007.
- FREITAS, M.S.T. *Tópicos em dinâmica não-linear e caos*: Registro de Algumas Atividades. Página de internet disponível no endereço:http://www.pessoal.cefetpr.br/msergio/caos_disc_2007_2.htm, acesso em 2/6/2008.
- GAMA, A. L.; FREITAS, M. S. T. Aplicação do algoritmo do Jogo do Caos a um mapa determinístico com variável contínua. *Projeto PIBIC-Junior*, Fundação Araucária e UTFPR, em andamento, 2008.
- KAPLAN, D.; GLASS, L. *Understanding nonlinear dynamics*. New York: Springer, 1995.
- LICHTENBERG, A.; LIEBERMAN, M. *Regular and chaotic dynamics*. New York: Springer, 1997.
- MACAU, E. E. N.; GREBOGI, C. Driving trajectories in complex systems. *Physics Review E*, 59, 9, p. 4062-4070, 1999.
- PARANÁ, R. F. *Dinâmica não-linear e caos em retificadores monofásicos meia-onda carga RL*. Curitiba, 88p., 2004. Monografia (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- PEAK, D.; FRAME, M. *Chaos under control*. New York: Freeman, 1994.
- PEDROSO, C. M. *Desenvolvimento de modelo de tráfego e método para melhoria de desempenho de servidores web*. Curitiba, 82 p., 2006. Tese (Doutorado) – CPGEI, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- PIETROCOLA, M. Curiosidade e Imaginação – Os caminhos do conhecimento nas Ciências, nas Artes e no ensino. In: Carvalho, A. M. P. (org.). *Ensino de Ciências*. São Paulo: Thomson, p. 119 – 133, 2004.
- SCHUSTER, H. *Deterministic chaos*. Weinheim: Physik-Verlag, 1984.
- SHINBROT, T.; OTT, E.; GREBOGI, C.; YORKE, J. A. Using small perturbations to control chaos. *Nature*, 363, p. 411-417, 1993.
- SUN MICROSYSTEMS, *Software Java para Windows*, 2005. Disponível para download em <http://www.java.com/pt_BR/>, acesso em 2/6/2008.
- STROGATZ, S. *Nonlinear dynamics and chaos*. Reading, Massachusetts: Perseus Books, 1994.
- SWEET, D.; OTT, E.; YORKE, J. A. Topology in chaotic scattering. *Nature* 399, p 315-316, 1999.
- WEINERT, W.R. *Computação evolucionária para indução de regras de autômatos celulares multidimensionais*. Tese de doutorado, CPGEI, UTFPR, orientação de H.S. Lopes, em andamento, 2007.
- WIGGINS, S. *Introduction to applied nonlinear dynamics and chaos*. New York: Springer, 1997.
- WOLFRAM, S. *A new kind of science*. Wolfram Media, Inc, 2002. Disponível na íntegra em <<http://www.wolframscience.com/nksonline/toc.html>>, acesso em 2/6/2008.