

UM CURSO BÁSICO DE CIRCUITOS ELÉTRICOS COM UM ENFOQUE DE ENGENHARIA DE SISTEMAS

Karl Heinz Kienitz – kienitz@ieee.org

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Eletrônica.

Praça Marechal Eduardo Gomes, 50.

12.228-900 – São José dos Campos - SP

Resumo: *Um curso básico de circuitos elétricos é parte fundamental do currículo dos cursos de engenharia elétrica e da maioria dos cursos relacionados. A apresentação do material usualmente se restringe aos circuitos lineares e segue uma seqüência histórico-cronológica. Este artigo discute uma apresentação mais abrangente utilizada no Instituto Tecnológico de Aeronáutica, que trata dos circuitos de uma forma geral e segue uma seqüência baseada num enfoque de engenharia de sistemas. A discussão dos diversos elementos de circuito sempre se inicia com o caso geral (não-linear), concentrando-se a seguir nos casos mais comuns na prática. Torna-se natural discutir com os alunos sobre a qualidade, complexidade e utilidade de modelos. A modelagem de dispositivos específicos, no entanto, não faz parte do escopo do curso. Práticas de laboratório e uma simulação de circuito não-linear permitem verificar na prática o funcionamento dos circuitos mais comuns e conduzem à assimilação da problemática do trabalho com modelos de diferente granularidade, simulações e aproximações em geral na grande área de circuitos elétricos. Finalmente um enfoque de engenharia de sistemas na apresentação de circuitos elétricos prepara o aluno para lidar de forma mais sistemática com circuitos complexos, seja pela dimensão do próprio circuito e / ou pela natureza dos dispositivos / elementos de circuito que o compõe.*

Palavras-chave: *Graduação, Currículo, Engenharia elétrica, Circuitos elétricos, Engenharia de sistemas.*

1. INTRODUÇÃO

Um curso básico de circuitos elétricos é parte fundamental do currículo de todos os cursos de engenharia elétrica e da maioria dos cursos relacionados (engenharia eletrotécnica, eletrônica, mecatrônica, etc.), bem como de currículos de outros cursos como engenharia da computação. A apresentação do material de um curso básico de circuitos usualmente se restringe aos circuitos lineares e segue uma seqüência histórico-cronológica. Esta forma de apresentação pode ser constatada na grande maioria dos livros-texto, tais como ALEXANDER e SADIKU (2003) e HAYT *et al.* (2002).

No Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) tem-se, desde longa data buscado uma apresentação mais abrangente que trata dos circuitos de uma forma geral e, portanto, dos lineares como caso particular. A forma de exposição por vários anos seguiu a linha proposta no livro texto de CHUA *et al.* (1987), bastante abrangente. Este texto ainda conserva resquícios da seqüência de apresentação histórico-cronológica. Por ser muito detalhista em diversos tópicos, o livro é muito volumoso e pode conduzir o estudante desavisado a se perder no estudo, o que pode ser particularmente grave em semestres com currículo denso e / ou para estudantes que precisam investir seu tempo com grande eficiência.

A partir de notas de aula, foi produzido um livro-texto (KIENITZ, 2002) durante 2000-2001, que traduz o enfoque tradicional do ensino de circuitos dados no ITA, com a contribuição adicional da adoção de uma seqüência de apresentação baseada num enfoque de engenharia de sistemas. Em tal enfoque uma discussão dos diversos elementos de circuito sempre se inicia com o caso geral (não-linear), concentrando-se a seguir nos casos mais comuns na prática, em sua grande parte circuitos lineares ou modelos linearizados de circuitos não-lineares. Torna-se natural discutir com os alunos sobre a qualidade, complexidade e utilidade de modelos de diferentes granularidades. A modelagem de dispositivos específicos, no entanto, não é discutida, pois não faz parte do escopo de um curso básico de circuitos.

A adoção de uma ótica de sistema leva a uma seqüência diferente da seqüência histórico-cronológica. Assim, por exemplo, a discussão do uso da transformada de Laplace em circuitos, da função de transferência e do regime permanente senoidal antecedem (nesta ordem) a apresentação de fasores. Com tal apresentação a compreensão destes dois últimos assuntos é particularmente facilitada, pois se reduz à discussão de circuitos dinâmicos particulares operando em condições particulares.

Práticas de laboratório e uma simulação de circuito não-linear permitem verificar na prática o funcionamento dos circuitos mais comuns e conduzem à assimilação da problemática do trabalho com modelos de diferente granularidade, simulações e aproximações em geral na grande área de circuitos elétricos.

Finalmente um enfoque de engenharia de sistemas na apresentação de circuitos elétricos prepara o aluno para lidar de forma mais sistemática com circuitos complexos, seja pela dimensão do próprio circuito e / ou pela natureza dos dispositivos / elementos de circuito que o compõe.

Este artigo possui a seguinte estrutura: a seção 2 trata dos objetivos para um curso básico de circuitos; na seção 3 discorre-se sucintamente sobre algumas opções de realização; a seção 4 apresenta a realização utilizada no ITA; a seção 5 contém comentários finais.

2. OBJETIVOS PARA UM CURSO BÁSICO DE CIRCUITOS

Os objetivos fundamentais de um curso básico de circuitos elétricos são a revisão, o aprofundamento e extensão e a sistematização de assuntos e técnicas de análise apresentadas nos cursos de Física da área de Eletricidade e Magnetismo. O diferencial mais importante em relação aos cursos de Física é a agregação do interesse pelo circuito elétrico do ponto de vista engenharia, que enfatiza a preocupação com o fenômeno físico apenas na medida em que sua compreensão é relevante para a solução do problema prático proposto. Esta preocupação pragmática no curso básico de circuitos não desmerece a preocupação mais fundamental da Física com os fenômenos elétricos e eletromagnéticos. A contrário, vale-se do conhecimento desta na síntese e análise de alternativas de solução a problemas práticos que envolvem circuitos elétricos, possivelmente como subsistemas de sistemas de engenharia maiores.

A capacitação a ser desenvolvida no estudante é, portanto, a de lidar com o circuito elétrico como um (sub)sistema de engenharia. No curso básico de circuitos a ênfase está geralmente na atividade de análise de circuitos já existentes e não na síntese de circuitos que normalmente é objeto de cursos mais avançados.

Atividades práticas são imprescindíveis. Estas atividades podem ser do tipo prática de laboratório ou de simulação.

3. SOBRE AS OPÇÕES DE REALIZAÇÃO DE UM CURSO BÁSICO DE CIRCUITOS

Um curso básico de circuitos é tipicamente realizado como um curso na modalidade presencial, com práticas de laboratório e / ou de simulação de circuitos usando um dos simuladores disponíveis para computadores pessoais (exemplos: PSPICE, EWB). A

realização de ambos os tipos de atividades práticas é vantajosa, pois na prática de engenharia uma análise inicial é sempre seguida de algum tipo de simulação e depois de um experimento em bancada (laboratório) com algum protótipo.

Uma realização de um curso básico de circuitos no modelo de ensino à distância é possível, mas pouco vantajosa para este tipo de curso, pois perde-se a possibilidade de interação com o professor que, nas disciplinas básicas de engenharia, atua de forma intensiva como formador de engenheiros também pelo seu exemplo. Nesta altura do curso de engenharia o estudante é, em grande parte, um assimilador crítico dos métodos e atitudes de trabalho que observa.

Uma realização no modo semi-presencial pode ser uma alternativa interessante.

A apresentação do material de um curso básico de circuitos usualmente se restringe aos circuitos lineares e segue uma seqüência histórico-cronológica. Esta forma de apresentação pode ser constatada na grande maioria dos livros-texto, tais como ALEXANDER e SADIKU (2003) e HAYT *et al.* (2002). Existem apresentações mais abrangentes que não se limitam a circuitos lineares, como a de CHUA *et al.* (1987), que é bastante abrangente.

As vantagens de se usar uma seqüência histórico-cronológica são:

- a maior facilidade de se comentar o histórico do desenvolvimento da análise de circuitos; e
- a grande abundância de livros-texto que trabalham com esta seqüência.

Em contrapartida, uma seqüência histórico-cronológica do conteúdo não é a mais acessível ao estudante. É observação do autor que especialmente o conceito de fasor é muito difícil de ser transmitido “naturalmente” nesta seqüência.

A alternativa é a concepção de uma seqüência de apresentação definida prioritariamente por outros critérios, por exemplo, didáticos.

Como o circuito elétrico é o subsistema dinâmico do dia-a-dia do engenheiro (elétrico), é plausível a adoção de uma seqüência de apresentação que incorpore, além da melhor didática, um enfoque de engenharia de sistemas. Em tal enfoque uma discussão dos diversos elementos de circuito sempre se inicia com o caso geral (não-linear), concentrando-se a seguir nos casos mais comuns na prática, em sua grande parte circuitos lineares ou modelos linearizados de circuitos não-lineares. Torna-se natural discutir com os alunos sobre a qualidade, complexidade e utilidade de modelos. A modelagem de dispositivos específicos, no entanto, não faz parte do escopo de um curso básico de circuitos.

Finalmente um enfoque de engenharia de sistemas na apresentação de circuitos elétricos prepara o aluno para lidar de forma mais sistemática com circuitos complexos, seja pela dimensão do próprio circuito e / ou pela natureza dos dispositivos / elementos de circuito que o compõe.

4. O CURSO BÁSICO DE CIRCUITOS DO ITA

No Instituto Tecnológico de Aeronáutica tem-se, desde longa data buscado uma apresentação mais abrangente que trata dos circuitos de uma forma geral e, portanto, dos lineares como caso particular. A forma de exposição por vários anos seguiu a linha proposta no livro texto de CHUA *et al.* (1987), que é bastante abrangente, embora seja muito detalhista em diversos tópicos e ainda conserve resquícios da seqüência de apresentação histórico-cronológica.

Durante 2000-2001 foi produzido um livro-texto (Kienitz, 2002) que traduz o enfoque do ensino de circuitos dados no ITA com a contribuição adicional da adoção de uma seqüência de apresentação baseada num enfoque de engenharia de sistemas. A discussão dos diversos elementos de circuito sempre se inicia com o caso geral (não-linear), concentrando-se a seguir nos casos mais comuns na prática, em sua grande parte circuitos lineares ou modelos linearizados de circuitos não-lineares. Torna-se natural discutir com os alunos sobre a qualidade, complexidade e utilidade de modelos. A modelagem de dispositivos específicos, no entanto, não faz parte do escopo de um curso básico de circuitos.

A adoção de uma ótica de sistema leva a uma seqüência diferente da histórico-cronológica. Assim, por exemplo, a discussão do regime permanente senoidal a apresentação e de fasores. Com tal apresentação a compreensão destes dois últimos assuntos é particularmente facilitada, pois se reduz a discussão de circuitos dinâmicos particulares operando em condições particulares.

Os tópicos apresentados em 16 semanas com quatro aulas semanais e seis horas de estudo autônomo por semana, são os seguintes:

Leis de Kirchhoff: grafos, forma matricial. Elementos resistivos de circuitos: resistores, fontes controladas, amplificador operacional, elementos não lineares, ponto de operação, reta de carga, linearização, equivalência. Análise “tableau”. Circuitos de 1ª ordem: capacitores e indutores, constante de tempo, análise por inspeção, solução geral. Circuitos de 2ª ordem: equações de estado, sistemas mecânicos análogos, tipos de resposta à entrada zero, comportamento qualitativo. Circuitos dinâmicos de ordem superior: indutores acoplados. Análise “tableau” para circuitos dinâmicos. Transformada de Laplace em análise de circuitos, funções de transferência, respostas de circuitos lineares, teorema fundamental do regime permanente senoidal, convolução. Análise nodal e nodal modificada. Diagramas de Bode. Critério de Nyquist. Regime permanente senoidal: fasores, potência e energia, circuitos trifásicos. Multi-portas, reciprocidade.

Um total de 16 aulas de laboratório e uma simulação de um circuito não-linear com MOSFETs permitem verificar na prática não somente o funcionamento dos circuitos mais comuns, mas a perfeita assimilação da problemática do trabalho com diferentes qualidades de modelos, simulações e aproximações em geral na grande área de circuitos elétricos.

As práticas de laboratório, de duas aulas cada uma, utilizadas em 2003, foram:

1. Medida de tensão
2. Amplificador operacional na região linear
3. Amplificador operacional em região não-linear (conversor de resistência negativa)
4. Resposta a degrau de circuitos de 1ª e 2ª ordem
5. Oscilador a relaxação
6. Oscilador a deslocamento de fase
7. Fasores, impedâncias e curvas de Bode
8. Ressonância e fator de mérito

Cada experiência é organizada na forma de um estudo dirigido conduzido na bancada de laboratório, de forma que neste curso o aluno investe pouco tempo na confecção de relatórios de laboratório.

Nos últimos anos o exercício de simulação tem contemplado algum circuito MOSFET translinear (WIEGERINK, 1993) simples. Desta forma o aluno pode praticar os conceitos estudados num contexto de circuitos para implementação em circuito integrado. O exercício de simulação consiste basicamente na análise, via simulação, do “envelope de operação” do circuito dado, ou seja, a determinação das faixas de valores para as variáveis relevantes, dentro das quais o circuito cumpre sua função. A problemática de análise proposta é tal que se torna possível aos estudantes verificar as limitações práticas dos simuladores de circuitos mais comuns.

5. COMENTÁRIOS FINAIS

A realização de um curso básico de circuitos conforme descrito é densa. Os conteúdos apresentados e as capacitações desenvolvidas pelos estudantes são apropriados como fundamento para um curso de síntese de circuitos e para o primeiro curso de sistemas de controle.

A compreensão e simulação de um circuito MOSFET translinear tem sido bastante motivante para os alunos. Se de um lado o circuito a ser analisado e simulado parece sofisticado à primeira vista, o princípio translinear MOSFET (WIEGERINK, 1993), de fácil entendimento, permite também um entendimento fácil do circuito a ser simulado.

Agradecimentos

O autor agradece aos Professores Takashi Yoneyama e Roberto Kawakami Harrop Galvão, ambos do ITA, pelas discussões sobre o assunto deste artigo e pelo trabalho conjunto proveitoso na condução de diversas edições do curso ELE-03 Análise de Circuitos Elétricos, no Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, C.K. e SADIKU, M.N.O. **Fundamentos de circuitos elétricos**, Bookman, 2003.

CHUA, L. O. *et al.* **Linear and nonlinear circuits**, McGraw-Hill, 1987.

HAYT, W.H. *et al.* **Engineering circuit analysis**, 6ª Edição, McGraw-Hill, 2002.

KIENITZ, K.H. **Análise de circuitos: um enfoque de sistemas**, Manole, 2002.

WIEGERINK, R.J. **Analysis and synthesis of MOS translinear circuits**, Kluwer, 1993.