

Análise Básica de Circuitos para Engenharia

12ª edição

J. DAVID IRWIN

Auburn University

R. MARK NELMS

Auburn University

Tradução e Revisão Técnica

J. R. Souza, PhD

**Professor Associado da
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)**



LTC

- Os autores deste livro e a editora empenharam seus melhores esforços para assegurar que as informações e os procedimentos apresentados no texto estejam em acordo com os padrões aceitos à época da publicação. Entretanto, tendo em conta a evolução das ciências, as atualizações legislativas, as mudanças regulamentares governamentais e o constante fluxo de novas informações sobre os temas que constam do livro, recomendamos enfaticamente que os leitores consultem sempre outras fontes fidedignas, de modo a se certificarem de que as informações contidas no texto estão corretas e de que não houve alterações nas recomendações ou na legislação regulamentadora.
- Data do fechamento do livro: 30/06/2023
- Os autores e a editora se empenharam para citar adequadamente e dar o devido crédito a todos os detentores de direitos autorais de qualquer material utilizado neste livro, dispondo-se a possíveis acertos posteriores caso, inadvertida e involuntariamente, a identificação de algum deles tenha sido omitida.
- **Atendimento ao cliente: (11) 5080-0751 | faleconosco@grupogen.com.br**
- Traduzido de
BASIC ENGINEERING CIRCUIT ANALYSIS, TWELFTH EDITION
Copyright © 2021, 2015, 2011, 2008, 2005 by John Wiley & Sons, Inc.
All Rights Reserved. This translation published under license with the original publisher John Wiley & Sons, Inc.
ISBN: 978-1-1195-7067-7
- Direitos exclusivos para a língua portuguesa
Copyright © 2023 by
LTC | Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda.
Uma editora componente do GEN | Grupo Editorial Nacional
Travessa do Ouvidor, 11
Rio de Janeiro – RJ – CEP 20040-040
www.grupogen.com.br
- Reservados todos os direitos. É proibida a duplicação ou reprodução deste volume, no todo ou em parte, em quaisquer formas ou por quaisquer meios (eletrônico, mecânico, gravação, fotocópia, distribuição pela Internet ou outros), sem permissão, por escrito, da LTC | Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda.
- Capa: Wendy Lai
- Adaptação de Capa: Rejane Megale
- Imagem da capa: © Viaframe/Getty Images
- Editoração eletrônica: FQuatro Editoração
- Ficha catalográfica

CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ

172a
12. ed.
Irwin, J. David, 1939-
Análise básica de circuitos para engenharia / J. David Irwin, R. Mark Nelms ; tradução e revisão técnica J. R. Souza. - 12. ed. - Rio de Janeiro : LTC, 2023.

Tradução de: Basic engineering circuit analysis
Apêndice
Inclui índice
ISBN 978-85-216-3862-9

1. Engenharia elétrica. 2. Circuitos elétricos - Análise. I. Nelms, R. Mark. II. Souza, J. R. III. Título.

23-84331

CDD: 621.3192
CDU: 621.3



Meri Gleice Rodrigues de Souza - Bibliotecária - CRB-7/6439

1 Conceitos Básicos 1

- 1.1 Sistema de Unidades 1
- 1.2 Grandezas Básicas 1
- 1.3 Elementos de Circuitos 6
- Resumo 14

2 Circuitos Resistivos 15

- 2.1 Lei de Ohm 15
- 2.2 Leis de Kirchhoff 19
- 2.3 Circuitos de Malha Única 26
- 2.4 Circuitos com um Único Par de Nós 31
- 2.5 Combinações de Resistores em Série e em Paralelo 35
- 2.6 Circuitos com Combinações Série-Paralelo de Resistores 39
- 2.7 Transformações Estrela $\longleftrightarrow$ Delta 45
- 2.8 Circuitos com Fontes Dependentes 48
- 2.9 Tecnologias de Resistores para Fabricação Eletrônica 52
- 2.10 Exemplos de Aplicação 55
- 2.11 Exemplos de Projeto 56
- Resumo 61

3 Técnicas de Análise Nodal e de Malhas 62

- 3.1 Análise Nodal 62
- 3.2 Análise de Malhas 78
- 3.3 Exemplo de Aplicação 90
- 3.4 Exemplo de Projeto 91
- Resumo 92

4 Amplificadores Operacionais 93

- 4.1 Introdução 93
- 4.2 Modelos de Amp-Ops 93
- 4.3 Circuitos Básicos que Utilizam Amp-Ops 98
- 4.4 Comparadores 106
- 4.5 Exemplos de Aplicação 107
- 4.6 Exemplos de Projeto 110
- Resumo 112

5 Técnicas Adicionais de Análise 113

- 5.1 Introdução 113

- 5.2 Superposição 115
- 5.3 Teoremas de Thévenin e de Norton 119
- 5.4 Máxima Transferência de Potência 135
- 5.5 Exemplo de Aplicação 139
- 5.6 Exemplos de Projeto 140
- Resumo 144

6 Capacitância e Indutância 145

- 6.1 Capacitores 145
- 6.2 Indutores 151
- 6.3 Combinações de Capacitores e Indutores 159
- 6.4 Circuitos Amplificadores Operacionais RC 165
- 6.5 Exemplos de Aplicação 167
- 6.6 Exemplos de Projeto 170
- Resumo 172

7 Circuitos Transientes de Primeira e de Segunda Ordens 173

- 7.1 Introdução 173
- 7.2 Circuitos de Primeira Ordem 174
- 7.3 Circuitos de Segunda Ordem 191
- 7.4 Exemplos de Aplicação 200
- 7.5 Exemplos de Projeto 207
- Resumo 213

8 Análise de Estado Estacionário CA 214

- 8.1 Senoides 214
- 8.2 Funções Forçantes Senoidais e Complexas 217
- 8.3 Fasores 219
- 8.4 Relações Fasoriais para Elementos de Circuito 221
- 8.5 Impedância e Admitância 224
- 8.6 Diagramas Fasoriais 229
- 8.7 Análise Básica Usando as Leis de Kirchhoff 232
- 8.8 Técnicas de Análise 234
- 8.9 Exemplos de Aplicação 246
- 8.10 Exemplos de Projeto 248
- Resumo 250

9 Análise de Potência em Regime Permanente 251

- 9.1 Potência Instantânea 251

9.2	Potência Média	252
9.3	Máxima Transferência de Potência Média	256
9.4	Valores Eficazes ou rms	260
9.5	Fator de Potência	263
9.6	Potência Complexa	265
9.7	Correção do Fator de Potência	269
9.8	Circuitos Monofásicos com Três Condutadores	272
9.9	Considerações de Segurança	274
9.10	Exemplos de Aplicação	281
9.11	Exemplos de Projeto	284
	Resumo	286

10 Circuitos Magneticamente Acoplados 287

10.1	Indutância Mútua	287
10.2	Análise de Energia	297
10.3	Transformador Ideal	299
10.4	Considerações de Segurança	307
10.5	Exemplos de Aplicação	308
10.6	Exemplos de Projeto	312
	Resumo	315

11 Circuitos Polifásicos 316

11.1	Circuitos Trifásicos	316
11.2	Conexões Trifásicas	320
11.3	Conexões Fonte/Carga	321
11.4	Relações de Potência	329
11.5	Correção do Fator de Potência	332
11.6	Exemplos de Aplicação	334
11.7	Exemplos de Projeto	336
	Resumo	339

12 Resposta de Frequência de Circuitos 341

12.1	Análise de Resposta no Domínio da Frequência	341
12.2	Análise no Domínio da Frequência de Excitações Senoidais	347
12.3	Circuitos Ressonantes	358
12.4	Escalamento	373
12.5	Circuitos de Filtros	374
12.6	Exemplos de Aplicação	394
12.7	Exemplos de Projeto	397
	Resumo	402

13 Transformada de Laplace 403

13.1	Definição	403
13.2	Duas Importantes Funções Singulares	404
13.3	Pares de Transformadas	406
13.4	Propriedades da Transformada	407
13.5	Cálculo da Transformada Inversa	409
13.6	Integral de Convolução	412
13.7	Teoremas dos Valores Inicial e Final	415
13.8	Resolução de Equações Diferenciais com Transformadas de Laplace	416
	Resumo	418

14 Aplicação da Transformada de Laplace à Análise de Circuitos 420

14.1	Resolução de Circuitos com a Transformada de Laplace	420
14.2	Modelos de Elementos de Circuitos	421
14.3	Técnicas de Análise	423
14.4	Função de Transferência	432
14.5	Relação entre Diagramas de Polos e Zeros e Diagramas de Bode	446
14.6	Resposta de Estado Estacionário	449
	Resumo	451

15 Técnicas de Análise de Fourier 453

15.1	Série de Fourier	453
15.2	Transformada de Fourier	472
15.3	Exemplo de Aplicação	480
15.4	Exemplos de Projeto	481
	Resumo	485

16 Circuitos de Duas Portas 487

16.1	Parâmetros de Admitância	487
16.2	Parâmetros de Impedância	490
16.3	Parâmetros Híbridos	491
16.4	Parâmetros de Transmissão	493
16.5	Conversões de Parâmetros	494
16.6	Interconexão de Circuitos de Duas Portas	495
	Resumo	499

APÊNDICE Números Complexos 500

ÍNDICE ALFABÉTICO 506

Ao Estudante

A análise de circuitos não é fundamental apenas para toda a Engenharia Elétrica e de Computação – os conceitos estudados aqui se estendem muito além desses limites. Por isso, a análise de circuitos continua sendo o ponto de partida para futuros engenheiros eletricitistas, eletrônicos e de computação. O texto e todos os materiais suplementares o ajudarão a atingir tal objetivo. Recomendamos que leia o Prefácio com atenção e conheça todos os recursos disponíveis para os estudantes. Um último conselho: aprender a analisar circuitos elétricos é como aprender a tocar um instrumento musical. A maioria das pessoas começa com aulas de música e adquire proficiência no instrumento por meio de prática, prática e mais prática. As lições sobre análise de circuitos são dadas por seu professor e por este livro. A proficiência na análise de circuitos pode ser alcançada apenas com a prática. Aproveite as muitas oportunidades apresentadas neste livro para praticar, praticar e praticar. No fim, você ficará satisfeito.

Ao Professor

A 12ª edição deste livro foi preparada com base em uma cuidadosa análise do *feedback* de professores e estudantes. Acreditamos que as revisões e alterações implementadas devem despertar o interesse de muitos professores. Temos ciência das significativas mudanças na maneira pela qual este material vem sendo ensinado e aprendido. Diante disso, os autores e a editora elaboraram uma grande variedade de recursos de aprendizagem, tradicionais e não tradicionais, para atender às necessidades de estudantes e professores de análise de circuitos elétricos modernos.

O livro conta com uma seção “Problemas” com acesso ao estudante, que é organizada por seção de cada capítulo. Estudantes dedicados encontrarão nesses problemas um excelente recurso para testar sua compreensão dos tópicos abordados em cada capítulo.

A aprendizagem invertida surgiu recentemente como um modo alternativo de ensino, que tenta ajudar o estudante a compreender o material mais rapidamente. Estudos divulgados até o momento mostram que essa abordagem também tende a minimizar o tempo de preparo de aulas pelo professor. Este livro, que oferece uma combinação de Avaliações da Aprendizagem e Vídeos de Resolução de Problemas (*Problem Solving Videos*, conteúdo em inglês), é um veículo ideal para este formato de ensino. Os recursos disponibilizados dão ao professor as ferramentas necessárias para modificar o formato de apresentação do conteúdo, a fim de favorecer a rápida compreensão do material pelo estudante.

Como nas edições anteriores, a obra contém muitos exemplos projetados para ajudar o estudante a compreender

rapidamente os principais conceitos apresentados. Novos exemplos foram adicionados e, quando apropriado e para efeitos de comparação, MATLAB® foi empregado para produzir soluções numéricas rápidas e simples, assim como para verificar outras técnicas de solução. Exemplos de Aplicação e de Projeto retornaram nesta edição. Eles ajudam os estudantes a responder a perguntas como: “Por que isso é importante?” ou “Como vou usar o que aprendi neste curso?”.

Destaques da 12ª Edição

- Um novo projeto gráfico, mais claro e simples, a fim de aprimorar, esclarecer e uniformizar o texto, bem como aumentar a acessibilidade para todos.
- A seção Problemas está no material *online* e foi substancialmente revisada e expandida. Esta 12ª edição apresenta, aproximadamente, 2.400 problemas, dos quais mais de 800 são novos! Problemas de múltipla escolha retirados do Exame de Fundamentos de Engenharia (FE)¹ também aparecem nesta seção.
- Foram produzidos Vídeos de Resolução de Problemas (*Problem Solving Videos*, conteúdo em inglês), mostrando aos estudantes o passo a passo para a resolução dos problemas de Avaliação da Aprendizagem dos capítulos. É um recurso especial, que deve melhorar significativamente a experiência de aprendizagem em cada subseção de um capítulo.
- As Estratégias para a Solução de Problemas foram mantidas nesta 12ª edição e são utilizadas como um guia para as soluções contidas nos vídeos de resolução de problemas.

Organização

Este texto é adequado para ser apresentado em cursos de um semestre e, também, para cursos sequenciais de dois ou três trimestres. Os primeiros sete capítulos são dedicados à análise de circuitos de corrente contínua (CC). Uma introdução aos amplificadores operacionais é apresentada no Capítulo 4. Esse capítulo pode ser omitido sem nenhuma perda de continuidade; alguns exemplos e problemas de capítulos posteriores devem ser ignorados também. Os Capítulos 8 a 12 abordam a análise de circuitos de corrente alternada (CA), iniciando com a análise de circuitos de apenas uma frequência (monofásicos e trifásicos) e terminando com a operação de circuitos de frequência variável. O cálculo de potência em circuitos CA

¹N. T.: O Exame de Fundamentos de Engenharia (*Fundamentals of Engineering Exam*) é o primeiro de dois exames que engenheiros devem prestar nos Estados Unidos para obterem o certificado de Engenheiro Profissional, equivalente ao dos CREAs (Conselhos Regionais de Engenharia e Agronomia) no Brasil, que dispensam exames.

monofásicos e trifásicos também é apresentado. Importantes tópicos relativos à transformada de Laplace, à transformada de Fourier e a circuitos de duas portas são abordados nos Capítulos 13 a 16.

A organização do texto oferece máxima flexibilidade aos professores na elaboração de seus cursos. Um docente pode optar por abordar os primeiros sete capítulos em um único semestre, enquanto outro pode omitir o Capítulo 4 e cobrir os Capítulos 1 a 3 e 5 a 8. Ainda, outros podem optar por cobrir os Capítulos 1 a 3, 5 e 6 e as Seções 7.1 e 7.2 e, depois, os Capítulos 8 e 9. Os capítulos restantes podem ser estudados no segundo semestre de um curso sequencial.

Recursos Pedagógicos do Texto

Os recursos pedagógicos deste texto são ricos e variados, incluindo a parte impressa e o material *online*. Muito cuidado foi dedicado a seu uso integrado. Para um melhor aproveitamento desse aspecto pedagógico, o leitor deve considerar os seguintes elementos que constam na maioria dos capítulos deste livro.

Objetivos de Aprendizagem são apresentados no início de cada capítulo, na forma de uma lista de tópicos, que informa ao leitor o que é importante e o que será aprendido com o estudo do material do capítulo.

Exemplos são a base de qualquer texto sobre análise de circuitos, e a apresentação de inúmeros exemplos é uma tradição deste livro. Eles abordam problemas com níveis de dificuldade baixo, médio e alto. Além de exemplos comuns, vários **Exemplos de Aplicação e de Projeto** são fornecidos ao longo do texto.

As **Dicas** aparecem ao longo do texto e facilitam a compreensão dos tópicos em consideração, bem como servem como lembretes de conceitos importantes.

Avaliações da Aprendizagem constituem uma importante ferramenta de aprendizagem neste livro. Esses exercícios testam os conceitos estudados até aquele ponto em uma ou mais seções. Não apenas a resposta é fornecida, mas um vídeo de resolução de problemas também acompanha cada um desses exercícios, demonstrando detalhes da solução passo a passo. O estudante que dominar tais exercícios estará pronto para seguir adiante.

Estratégias para a Solução de Problemas são técnicas passo a passo de resolução de problemas que muitos estudantes consideram bastante úteis. Eles conseguem responder à pergunta recorrente: “por onde começo?”. Quase todos os capítulos apresentam uma ou mais dessas estratégias, como uma espécie de resumo da resolução de problemas associados aos conceitos apresentados.

Os **Problemas**, agora no material *online*, passaram por extensa revisão para esta 12ª edição, que apresenta mais de 800 novos problemas de diferentes níveis de aprofundamento e dificuldade. Os professores encontrarão, para qualquer nível de aprofundamento e/ou dificuldade, vários problemas adequados. Há cerca de 2.400 problemas nesta 12ª edição! Além de problemas comuns, são apresentados Problemas Típicos de Exame de FE relativos a cada capítulo. Caso planeje fazer o Exame de FE, esses problemas se aproximam dos que encontrará nessa avaliação.

O rico material fornecido nesta edição oferece uma maneira inovadora e útil para a exploração dos exemplos e exercícios do livro a partir de diferentes técnicas de simulação.

Este livro conta com os seguintes materiais suplementares:

Restrito a docentes:

- Respostas dos Problemas (conteúdo em inglês)

Material livre, mediante uso de PIN:

- Problemas
- Problem Solving Videos (conteúdo em inglês).

O acesso ao material suplementar é gratuito. Basta que o leitor se cadastre e faça seu *login* em nosso *site* (www.grupogen.com.br) e, após, clique em Ambiente de aprendizagem. Em seguida, insira no canto superior esquerdo o código PIN de acesso localizado na orelha deste livro.

O acesso ao material suplementar online fica disponível até seis meses após a edição do livro ser retirada do mercado.

Caso haja alguma mudança no sistema ou dificuldade de acesso, entre em contato conosco (gendigital@grupogen.com.br).