

**Alexandre Mendonça**

**&**

**Ricardo Zelenovsky**

# **Eletrônica Digital**

**Curso Prático e Exercícios**

**Rio de Janeiro, julho de 2016**

TERCEIRA EDIÇÃO

EDIÇÃO 2016 DOS AUTORES

<http://www.mzeditora.com.br>  
[mz@mzeditora.com.br](mailto:mz@mzeditora.com.br)

TEL: (0xx21) 99187-1038

**Eletrônica Digital: Curso Prático e Exercícios**  
**Copyright ©2004 Alexandre Mendonça e Ricardo Zelenovsky**  
**ISBN: 85-87385-10-0**  
**MZ Editora Ltda.**

**Eletrônica Digital: Curso Prático e Exercícios**  
**Copyright ©2007 Alexandre Mendonça e Ricardo Zelenovsky**  
**ISBN: 978-85-87385-13-0**  
**MZ Editora Ltda.**

**Eletrônica Digital: Curso Prático e Exercícios**  
**Copyright ©2016 Alexandre Mendonça e Ricardo Zelenovsky**  
**ISBN: 978-85-87385-13-0**

## **Direitos Autorais**

Todos os direitos sobre esta obra estão reservados para os autores do livro. Texto registrado na Biblioteca Nacional: Registro 334.558, Livro 614, Folha 218. Nenhuma parte deste livro poderá ser reproduzida, transmitida e gravada, por qualquer meio eletrônico, mecânico, por fotocópia e outros, sem a prévia autorização, por escrito, dos autores.

## **Marcas Registradas**

Várias Marcas Registradas aparecem no decorrer deste livro. Mais do que simplesmente listar esses nomes e informar quem possui seus direitos de exploração, ou ainda imprimir os logotipos das mesmas, os autores declaram estar utilizando tais nomes apenas para fins editoriais, em benefício exclusivo do dono da Marca Registrada, sem a intenção de infringir as regras de sua utilização.

## Produção

Capa e diagramação: Alexandre Mendonça e Ricardo Zelenovsky

## Dedicatórias

- Às nossas famílias, alicerces de nosso bem estar,
- ao Instituto Militar de Engenharia e à UnB, instituições que nos acolhem,
- aos alunos que a nós confiam as suas formações em sistemas digitais.

## Correspondência

Prof. Alexandre Mendonça,  
Seção de Engenharia Elétrica (SE/3),  
Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80,  
Urca, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CEP: 22.290-270.

Prof. Ricardo Zelenovsky,  
Faculdade de Tecnologia - Dep. de Engenharia Elétrica  
Campus Universitário Darcy Ribeiro  
CEP: 70.910-900, Brasília-DF

|         |                            |                      |
|---------|----------------------------|----------------------|
| e-mail: | <b>alexmend@ime.eb.br</b>  | (Alexandre Mendonça) |
|         | <b>zele@unb.br</b>         | (Ricardo Zelenovsky) |
|         | <b>mz@mzeditora.com.br</b> | (comercial)          |

## Os Autores

**Alexandre Mendonça** graduou-se em Engenharia Eletrônica pelo IME (Instituto Militar de Engenharia) em 1991, onde também concluiu seu Mestrado, em 1996. Obteve o título de Doutor em Ciências pelo Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ, em 2003. É professor do IME, desde 1996, onde ministra as disciplinas "Eletrônica Digital I", "Eletrônica Digital II" e "Microprocessadores", na Graduação. Foi Coordenador de Graduação por 6 anos e há 3 anos chefia a Seção de Engenharia Elétrica.

**Ricardo Zelenovsky** graduou-se em Engenharia Eletrônica pelo IME (Instituto Militar de Engenharia) em 1984, onde também concluiu seu Mestrado, em 1988. Em 2001, obteve seu título de Doutor em Ciências pelo Programa de Engenharia Elétrica da PUC-RJ. Foi professor do IME por mais de 15 anos, tendo ministrado as disciplinas "Microprocessadores", "Projetos de Computadores Digitais", "Processadores Digitais de Sinais (DSP)" e "Projetos de Circuitos Lógicos", além de orientar projetos de fim de curso sobre assuntos relacionados a interfaceamento com computadores pessoais, automação e processadores digitais de sinais. Atualmente, é professor da Faculdade de Tecnologia da UNB.

**Alexandre Mendonça** e **Ricardo Zelenovsky** são também pesquisadores, foram colunistas da Revista Developers' Magazine por 8 anos, editores da página <http://www.mzeditora.com.br> e autores dos livros "Eletrônica Digital: Curso Prático e Exercícios" (2004, 2007 e 2016), "Monte seu Protótipo ISA Controlado por FPGA" (2001), "Hardware: Programação Virtual de I/O e Interrupções" (2001), "PC e Periféricos: um Guia Completo de Programação" (1996), "Microcontroladores: Programação e Projeto com a Família 8051" (2005) e "PC: um Guia Prático de Hardware e Interfaceamento" (1996, 1999, 2002 e 2006).

# Prefácio

---

Publicar um livro é muito mais do que um ofício: é uma paixão. Fazemos isto pela décima primeira vez. Todos sabem que, como negócio, livro é um investimento de custo e risco altíssimos. Entretanto, iniciamos em 1996 nossa jornada na área editorial e, desde então, estamos tendo o privilégio e a oportunidade de trocar idéias com diversos companheiros dos mais variados rincões brasileiros, por onde ajudamos a difundir, mesmo que forma muito modesta, o conhecimento na área de sistemas digitais. Por isto, podemos afirmar que a sensação de sermos úteis compensa quaisquer custos e riscos. Infelizmente fechamos a MZ Editora em 2011, pois os custos para manter um CNPJ aberto são inviáveis para um mercado restrito. Mas, não podemos enterrar uma obra ainda muito procurada. Por isso, decidimos publicar essa nossa edição !

Nossos queridos leitores devem estar perguntado: por que um livro de eletrônica digital ? Há muito anos ministrando disciplinas de sistemas digitais, no IME e na UNB, deparamo-nos com diversos livros excelentes na área. Contudo, talvez nenhum tivesse o perfil ao qual almejávamos: texto em português, exemplos voltados para a resolução de problemas da engenharia, diversificação de exercícios propostos, uma abordagem voltada para a implementação de experimentos em laboratórios, um formato de apresentação de assuntos que facilitasse o aprendizado pelo aluno, ênfase em máquinas de estados, linguagem descritiva de hardware, dentre outros. Ou seja, um curso que tivesse o nosso perfil !

Assim, juntamos todo nosso passado de notas de aulas, resumos, exercícios e experimentos de laboratório, dosamos com alguma experiência e compilamos este livro. Enfim, esperamos agradar !

Rio de Janeiro, 01 de julho de 2016.

*Alexandre Mendonça e Ricardo Zelenovsky.*

# Sumário

---

## Capítulo 1: Introdução à Eletrônica Digital

|   |   |
|---|---|
| 1.1. Introdução .....                       | 3 |
| 1.2. Vantagens dos projetos Digitais .....  | 4 |
| 1.2.1. Projetos Orientados a Software ..... | 4 |
| 1.2.2. Fidelidade de Dados .....            | 7 |
| 1.2.2.1 Condições Climáticas .....          | 7 |
| 1.2.2.2 Ajuste de Componentes .....         | 7 |
| 1.2.2.3 Envelhecimento .....                | 8 |
| 1.3. Conceitos Básicos .....                | 8 |
| 1.3.1. Nível Lógico .....                   | 8 |
| 1.3.2. Conjuntos de Níveis Lógicos .....    | 9 |
| 1.3.3. Circuito Integrado .....             | 9 |

## Capítulo 2: Famílias Lógicas

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Introdução .....   | 13 |
| 2.2. Operação dos transistores Bipolares .....                    | 13 |
| 2.3. Família RTL (Resistor-Transistor-Logic) .....                | 19 |
| 2.4. Família DTL (Diode-Transistor-Logic) .....                   | 20 |
| 2.5. Família TTL (Transistor-Transistor-Logic) .....              | 21 |
| 2.6. Família ECL (Emitter Coupled Logic) .....                    | 23 |
| 2.7. Família CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) ..... | 24 |

### Capítulo 3: Álgebra Booleana

|   |    |
|---|----|
| 3.1. Introdução .....                           | 29 |
| 3.2. Funções de Variáveis Booleanas .....       | 31 |
| 3.3. Portas Lógicas e Tabelas-Verdades .....    | 33 |
| 3.4. Teoremas da Álgebra Booleana .....         | 38 |
| 3.5. Representação Numérica .....               | 42 |
| 3.6. Soma Aritmética com Números Binários ..... | 45 |
| 3.7. Números Negativos e Subtração .....        | 46 |
| 3.8. Exercícios Complementares .....            | 50 |
| 3.9. Exercícios .....                           | 55 |

### Capítulo 4: Mapas de Karnaugh

|   |    |
|---|----|
| 4.1. Introdução .....                                 | 61 |
| 4.2. Formato dos Mapas .....                          | 62 |
| 4.3. Preenchimento dos Mapas .....                    | 63 |
| 4.4. Minimização por Soma de Produtos .....           | 64 |
| 4.5. Minimização por Produto de Somas .....           | 69 |
| 4.6. Irrelevâncias ( <i>Don't Cares</i> ) .....       | 72 |
| 4.7. Variáveis Introduzidas .....                     | 73 |
| 4.8. Circuitos Integrados de Portas Lógicas .....     | 78 |
| 4.9. Laboratório: <i>Display</i> de 7 Segmentos ..... | 80 |
| 4.10. Exercícios .....                                | 83 |

### Capítulo 5: Circuitos Combinacionais Clássicos

|   |     |
|---|-----|
| 5.1. Somadores .....                        | 91  |
| 5.2. Comparadores .....                     | 98  |
| 5.3. Multiplexadores .....                  | 113 |
| 5.4. Decodificadores .....                  | 107 |
| 5.5. Codificador de Prioridade .....        | 109 |
| 5.6. <i>Buffers</i> de 3 Estados .....      | 112 |
| 5.7. <i>Drivers</i> em Coletor Aberto ..... | 116 |
| 5.8. Exercícios .....                       | 118 |

**Capítulo 6: Latches e Flip-Flops**

|   |     |
|---|-----|
| 6.1. Introdução .....                       | 125 |
| 6.2. Latch SR e D .....                     | 126 |
| 6.3. Flip-Flops D, SR, JK e T .....         | 134 |
| 6.4. Projetos de Flip-Flops .....           | 144 |
| 6.5. Considerações Sobre Temporização ..... | 148 |
| 6.6. Integrados de Flip-Flops .....         | 152 |
| 6.7. Exercícios .....                       | 156 |

**Capítulo 7: Máquinas de Estados Síncronas**

|   |     |
|---|-----|
| 7.1. Introdução .....                                   | 163 |
| 7.2. Modelos de Máquinas de Estados Síncronas .....     | 164 |
| 7.3. Análise de Máquinas Síncronas .....                | 165 |
| 7.4. Sobre Diagrama de Estados .....                    | 170 |
| 7.5. Projeto de uma Máquina de Estados Seqüencial ..... | 171 |
| 7.5.1. Variáveis Introduzidas .....                     | 179 |
| 7.5.2. Implementação Usando Flip-Flops JK .....         | 181 |
| 7.5.3. Estados Não Empregados .....                     | 183 |
| 7.5.4. Simplificação do Projeto .....                   | 186 |
| 7.5.5. Designação de Estados .....                      | 187 |
| 7.6. Considerações Sobre as Entradas .....              | 212 |
| 7.7. Exercícios .....                                   | 218 |

**Capítulo 8: Circuitos Seqüenciais Clássicos**

|  |     |
|--|-----|
| 8.1. Multivibradores Monoestáveis .....  | 233 |
| 8.2. Contadores .....                    | 241 |
| 8.3. Registradores de Deslocamento ..... | 256 |
| 8.4. Exercícios .....                    | 262 |



## Capítulo 9: Memórias

|  |     |
|--|-----|
| 9.1. Introdução .....                      | 275 |
| 9.2. Memória ROM .....                     | 276 |
| 9.3. Introdução à Memória RAM .....        | 280 |
| 9.4. Estudo da Memória DRAM .....          | 282 |
| 9.5. As Memórias SRAM (RAM Estática) ..... | 289 |
| 9.6. Algumas Pinagens de RAM e EPROM ..... | 292 |
| 9.7. Memória <i>Flash</i> .....            | 296 |
| 9.8. Exercícios .....                      | 296 |

## Capítulo 10: Conversores D/A e A/D

|   |     |
|---|-----|
| 10.1. Sinais Digitais e Sinais Analógicos .....   | 299 |
| 10.2. Conversão Digital para Analógico .....      | 304 |
| 10.3. O Conversor DAC0808 .....                   | 305 |
| 10.4. O Método da Aproximação Bit-Sucessiva ..... | 307 |
| 10.5. O Conversor ADC0808 .....                   | 310 |
| 10.6. Processamento Digital com D/A e A/D .....   | 313 |
| 10.7. Exercícios .....                            | 317 |

## Capítulo 11: FPGA e Outros Dispositivos Programáveis

|  |     |
|--|-----|
| 11.1. Introdução .....   | 323 |
| 11.2. O FPGA .....   | 323 |
| 11.3. Tecnologias de FPGA .....                                  | 324 |
| 11.4. Arquitetura de um FPGA .....                               | 324 |
| 11.5. Modos de Configuração de um FPGA .....                     | 327 |
| 11.6. Escolha da Ferramenta de Desenvolvimento .....             | 328 |
| 11.7. Configurando o FPGA .....                                  | 335 |
| 11.8. Principais Pinos do FPGA .....                             | 336 |
| 11.9. A PROM Serial .....  | 337 |
| 11.10. Cabo de Programação .....                                 | 338 |
| 11.11. Protocolo a Implementar .....                             | 340 |
| 11.12. Aplicativo Disponível .....                               | 342 |
| 11.13. Algumas Famílias da Xilinx .....                          | 352 |
| 11.14. Livro "Monte seu Protótipo ISA Controlado por FPGA" ..... | 355 |
| 11.15. PAL ( <i>Programmable Array Logic</i> ) .....             | 356 |
| 11.16. PLA ( <i>Programmable Logic Array</i> ) .....             | 357 |
| 11.17. CPLD ( <i>Complex Programmable Logic Devices</i> ) .....  | 358 |
| 11.18. Exercícios .....  | 358 |

## Capítulo 12: Introdução à Arquitetura de Controladores

|  |     |
|--|-----|
| 12.1. Motivação .....                          | 363 |
| 12.2. Componentes Básicos .....                | 364 |
| 12.3. Ciclo de Busca da Instrução .....        | 367 |
| 12.4. Instruções de Cópia .....                | 371 |
| 12.5. Instruções Matemáticas .....             | 378 |
| 12.6. Instruções de Salto .....                | 385 |
| 12.7. Instruções de Contagem .....             | 390 |
| 12.8. Instruções de Deslocamento .....         | 393 |
| 12.9. Instruções de Pilha e de Subrotina ..... | 395 |
| 12.10. Interrupções .....                      | 401 |
| 12.11. Experimento para Laboratório .....      | 404 |
| 12.12. Exercícios .....                        | 414 |

## Capítulo 13: Linguagem VHDL

|   |     |
|---|-----|
| 13.1. Introdução .....  | 421 |
| 13.2. Entidades e Arquiteturas .....                                    | 423 |
| 13.3. Conexão de Componentes .....                                      | 427 |
| 13.4. Tipos, Variáveis, Operadores, Etc. ....                           | 429 |
| 13.5. Exemplos de Descrição de Circuitos Combinacionais Clássicos ..... | 437 |
| 13.6. Exemplos de Descrição de Circuitos Seqüenciais .....              | 446 |
| 13.7. Pacotes, Configurações e Bibliotecas .....                        | 464 |
| 13.8. Exercícios .....  | 466 |

## Capítulo 14: Máquinas Seqüenciais Assíncronas

|  |     |
|--|-----|
| 14.1. Introdução .....   | 473 |
| 14.2. Análise de Máquinas Assíncronas .....                        | 474 |
| 14.3. Projeto de Máquinas de Estados Assíncronas .....             | 481 |
| 14.4. Cuidados no Projeto de Máquinas de Estados Assíncronas ..... | 489 |
| 14.4.1. Azares Estáticos .....                                     | 489 |
| 14.4.2. Azares Dinâmicos .....                                     | 491 |
| 14.4.3. Azares Essenciais .....                                    | 491 |
| 14.5. Exercícios .....   | 501 |