

ACÁCIO MANUEL RAPOSO AMARAL

Sistemas DIGITAIS

Princípios, Análise
e Projectos

EDIÇÕES SÍLABO

Sistemas Digitais

**Princípios, Análise
e Projectos**

ACÁCIO MANUEL RAPOSO AMARAL

EDIÇÕES SÍLABO

É expressamente proibido reproduzir, no todo ou em parte, sob qualquer forma ou meio gráfico, electrónico ou mecânico, inclusive fotocópia, este livro. As transgressões serão passíveis das penalizações previstas na legislação em vigor. Não participe ou encoraje a pirataria electrónica de materiais protegidos. O seu apoio aos direitos dos autores será apreciado.

Visite a Sílabo na rede
www.silabo.pt

FICHA TÉCNICA:

Título: Sistemas Digitais – Princípios, Análise e Projectos

Autor: Acácio Manuel Raposo Amaral

© Edições Sílabo, Lda.

Capa: Pedro Mota

1ª Edição, 1ª Impressão – Lisboa, Setembro de 2014

1ª Edição, 2ª Impressão – Lisboa, Janeiro de 2025

Impressão e acabamentos: ARTIPOL – Artes Tipográficas, Lda.

Depósito Legal: 380814/14

ISBN: 978-972-618-767-7



EDIÇÕES SÍLABO, Lda.

Publicamos conhecimento

Editor: Manuel Robalo

R. Cidade de Manchester, 2

1170-100 Lisboa

Tel.: 218130345

e-mail: silabo@silabo.pt

www.silabo.pt

Índice

Prefácio	11
-----------------	----

Capítulo 1

Introdução

1.1. Sinais digitais binários	16
1.2. Amostragem	18
1.3. Quantização	20
1.4. Codificação	22
1.5. Transferência de informação digital via série e paralelo	24
1.6. Síntese	25

Capítulo 2

Sistemas de numeração

2.1. Conversão para decimal	31
2.2. Conversão de decimal para binário, octal ou hexadecimal	33
2.3. Conversão de binário para octal ou hexadecimal e vice-versa	36
2.4. Conversão de decimal para binário e vice-versa, recorrendo a uma tabela de conversão	40

2.5. Operações aritméticas	41
2.5.1. Adição	42
2.5.2. Subtração	46
2.5.3. Multiplicação	48
2.5.4. Divisão	52
2.6. Códigos bipolares: números positivos e negativos	55
Exercícios Resolvidos	59
Resolução dos Exercícios	63

Capítulo 3

Álgebra de *Boole* e portas lógicas

3.1. Portas básicas (AND, OR e NOT)	95
3.2. Portas universais (NAND e NOR)	97
3.3. Expressões algébricas <i>versus</i> diagrama lógico	99
3.4. Simplificação algébrica de expressões booleanas	103
3.4.1. Teoremas de Álgebra de <i>Boole</i>	104
3.4.2. Teoremas de <i>DeMorgan</i>	108
3.4.3. Simplificação de expressões	108
3.5. Universalidade das portas NAND e NOR	113
3.6. Portas EX-OR e EX-NOR	119
Exercícios Resolvidos	123
Resolução dos Exercícios	127

Capítulo 4

Tabelas de verdade e mapas de *Karnaugh*

4.1. Preenchimento da tabela de verdade	160
4.2. Obtenção da função a partir da tabela de verdade	163
4.3. Redução da tabela de verdade	169

4.4. Mapas de <i>Karnaugh</i>	174
4.4.1. Mapas de duas variáveis	174
4.4.2. Mapas de três variáveis	177
4.4.3. Mapas de quatro variáveis	179
4.4.4. Mapas com mais de cinco variáveis	182
4.4.5. Preenchimento do mapa de <i>Karnaugh</i>	183
4.4.6. Simplificação de expressões recorrendo aos mapas de <i>Karnaugh</i>	186
4.4.7. <i>Don't Care Condition</i>	197
4.4.8. Simplificação de mapas de <i>Karnaugh</i> com expressões algébricas	202
Exercícios Resolvidos	207
Resolução dos Exercícios	217

Capítulo 5

Circuitos integrados

5.1. Classificação dos CI	255
5.2. Equipamento de treino	259
5.3. Planta de montagem	261

Capítulo 6

Circuitos combinacionais

6.1. Projecto de um circuito somador	269
6.2. Projecto de um circuito subtrator	274
6.3. Projecto de um circuito comparador	279
6.4. Projecto de codificadores	283
6.4.1. Codificador para código excesso 3	284
6.4.2. Codificador para código <i>Gray</i>	286
6.5. Projecto de um gerador de paridade	289

6.6. Circuitos combinacionais dedicados	291
6.6.1. Descodificador/ <i>Driver</i> BCD – 7 segmentos	292
6.6.2. DEC/DEMUX	297
6.6.3. Codificadores	304
6.6.4. <i>Multiplexers</i>	305
6.6.5. Circuitos Aritméticos	315
6.6.6. Circuitos de memória	319
Exercícios Resolvidos	327
Resolução dos Exercícios	337

Capítulo 7

Circuitos sequenciais

7.1. <i>Latch</i> S-R	384
7.2. <i>Latch</i> J-K	388
7.3. <i>Flip-Flop</i> J-K baseado em portas NAND	391
7.4. <i>Flip-Flops</i> sensíveis à borda ascendente e descendente do relógio	393
7.5. <i>Flip-Flop</i> J-K Mestre-Escravo	395
7.6. <i>Flip-Flops</i> T e D	398
7.7. Aplicações mais comuns dos <i>Flip-Flops</i>	400
7.8. Modelo de <i>Moore</i> e <i>Mealy</i>	405
7.9. Análise de circuitos sequenciais	407
7.10. Projecto de circuitos sequenciais	418
Exercícios Resolvidos	435
Resolução dos Exercícios	443

Capítulo 8

Contadores

8.1. Contadores assíncronos	484
8.2. Contadores síncronos	489
8.3. Contador 74163	499
Exercícios Resolvidos	511
Resolução dos Exercícios	519
Bibliografia	549



Edições Sílabo
Almedina
2025-01-09

Prefácio

A electrónica é uma área da física aplicada crucial na vida moderna. Todos os dias lidamos com diversos equipamentos electrónicos, tais como telefones, televisores, computadores, entre muitos outros. Estes equipamentos possuem diversos dispositivos de electrónica analógica e de electrónica digital. Os componentes de electrónica analógica permitem que os elementos de electrónica digital consigam interagir com o mundo real, no entanto, todo o processamento e comandos é efectuado por intermédio dos elementos digitais.

Os equipamentos electrónicos são sistemas complexos compostos por subsistemas organizados em diferentes hierarquias. Esta organização permite compreender melhor o funcionamento do sistema como um todo.

Como os equipamentos electrónicos são extremamente complexos, neste manual iremos apenas abordar os dois primeiros níveis hierárquicos da área de electrónica digital, que nos permitem apresentar os seus principais fundamentos. Os conceitos abordados irão permitir analisar e projectar alguns circuitos digitais importantes como somadores, substractores, comparadores, geradores de paridade, codificadores, decodificadores, ROM, PLA, detectores de sequências, registos, contadores assíncronos e síncronos, entre muitos outros.

Este manual destina-se a técnicos de electrónica, com experiência prática mas sem bases teóricas, a alunos que frequentam cursos de Engenharia Informática, Electrotécnica ou Electromecânica, assim como a alunos de cursos profissionais, técnicos e tecnológicos em áreas equivalentes. Importa, no entanto, referir que o público-alvo não se limita exclusivamente a estudantes e a técnicos, visto que a compreensão dos conceitos expostos não requer qualquer experiência na área da Electrónica.

A linguagem utilizada é simples e clara, não se tendo descurado o rigor técnico e científico que uma obra deste tipo exige. Para solidificar e compreender melhor os conceitos expostos apresenta-se, no final de cada capítulo, um conjunto de exercícios resolvidos que permitem ao leitor aplicar os conhecimentos apreendidos.

Introdução

Os circuitos digitais revelam-se imprescindíveis na manutenção e melhoria da qualidade de vida das sociedades modernas. A grande maioria dos equipamentos que utilizamos quotidianamente como o telemóvel, *ipad*, *iphone*, telefone, *fax*, computador, impressora, *scanner*, equipamento GPS, rádio ou a *playstation* utilizam cada vez mais circuitos digitais. A fiabilidade e precisão destes equipamentos são garantidas pelos circuitos digitais que os compõem.

Convém, no entanto, referir que a grande maioria das grandezas físicas (como por exemplo, a temperatura, a humidade, o tempo, a distância, a luminosidade, a tensão eléctrica, a corrente eléctrica, a força, etc.) assumem naturalmente valores analógicos, ou seja, variam de forma gradual ou contínua. Considere-se, como exemplo, a temperatura ambiente na cidade de Coimbra (Portugal) ao longo de um ano. O seu valor pode variar entre $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, podendo, neste intervalo, assumir uma infinidade possível de valores, como por exemplo 15,1(3)!

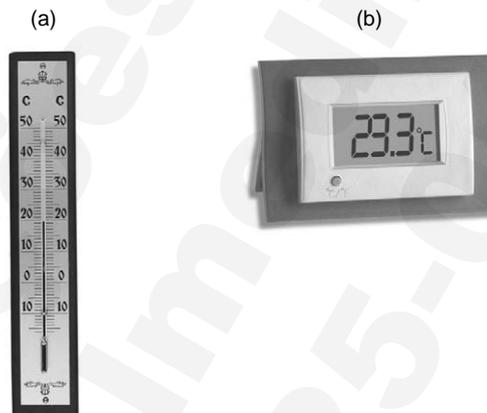
Os valores analógicos são proporcionais à grandeza que pretendem representar. Por exemplo, quando se pretende medir a temperatura do corpo humano é comum utilizar um termómetro analógico de mercúrio. Este equipamento é composto por um tubo de vidro fechado contendo na extremidade mercúrio. Quando a extremidade que contém o mercúrio é aquecida, por contacto com uma superfície ou meio mais quente, o mercúrio dilata expandindo-se ao longo do tubo. A expansão do mercúrio é proporcional à temperatura do meio que se encontra em contacto com o termómetro permitindo, desta forma, medir a temperatura do corpo.

⁽¹⁾ Dizima infinita (15.1333333333...).

Os valores digitais variam de forma discreta, sendo representados por dígitos. Imaginemos um saco de batatas: o número de batatas que se encontram no saco representa um valor digital, visto que se trata de um valor enumerável. No entanto, o peso de uma batata representa um valor analógico, na medida em que pode assumir uma infinidade possível de valores dentro de um intervalo.

A representação em formato digital elimina a ambiguidade que a representação em formato analógico pode conter. Considere, como exemplo, os termómetros analógico e digital representados na figura seguinte. Através da análise do termómetro digital (Figura 1.1b) é possível concluir, sem qualquer ambiguidade, que o valor da temperatura é de $23,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. No entanto, o termómetro analógico (Figura 1.1a) pode conduzir a diferentes interpretações ($19\text{ }^{\circ}\text{C}$, $19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou mesmo $20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Figura 1.1. Termómetro: (a) analógico e (b) digital



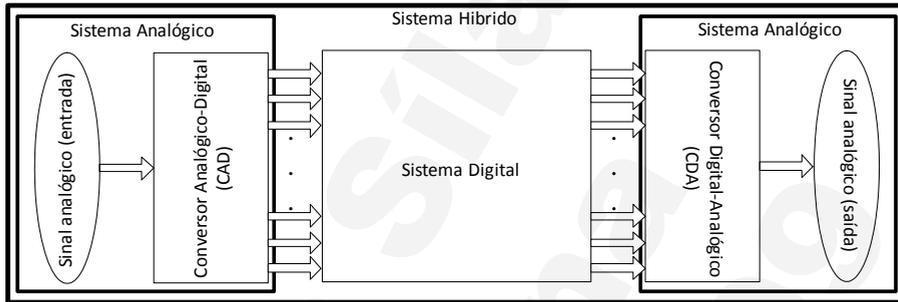
O termómetro digital permite representar uma grandeza analógica (temperatura) através de um formato digital, recorrendo para o efeito a conversores analógico-digitais¹. Se analisarmos o termómetro digital, na sua globalidade, poderemos concluir que se trata de um sistema híbrido, visto que lida com quantidades físicas representadas simultaneamente no formato analógico e digital.

A grande maioria dos aparelhos electrónicos é composto por dispositivos analógicos que permitem interagir com as grandezas analógicas, preparando-as

⁽¹⁾ Conversor analógico-digital: dispositivo electrónico capaz de converter um valor analógico num digital.

para poderem ser interpretadas pelos dispositivos digitais que as irão processar (Figura 1.2).

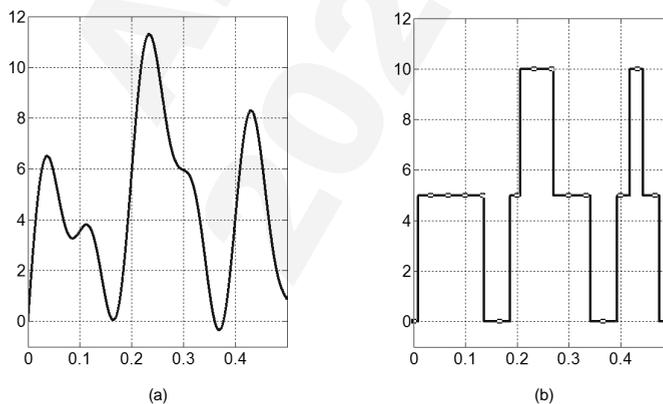
Figura 1.2. Diagrama de blocos de um aparelho electrónico genérico



O diagrama de blocos representado na figura anterior mostra que os dispositivos analógicos permitem a interacção dos dispositivos digitais com as suas entradas, possibilitando que estes consigam interpretar as grandezas analógicas externas, e com as suas saídas, tornando desta forma possível a execução do conjunto de instruções predefinidas nos dispositivos digitais.

Para melhor compreender a diferença entre sinais analógicos e digitais, considere agora os sinais representados na figura seguinte:

Figura 1.3. Sinais: (a) analógico e (b) digital



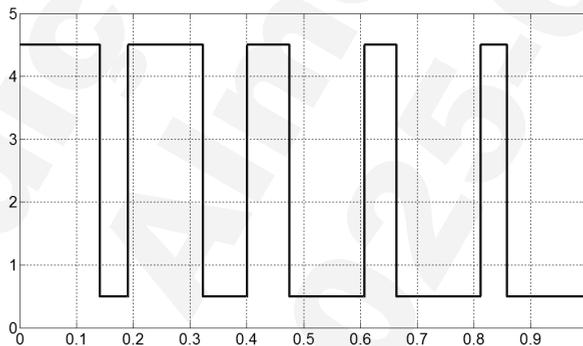
O sinal representado na Figura 1.3a é do tipo analógico, visto que a sua variação é contínua, para além de assumir uma variedade infinita de valores entre $-0,3$ e $11,3$. Já o sinal representado na Figura 1.3b é do tipo digital, na medida em que possui uma forma descontínua com transições instantâneas, assumindo, por outro lado, valores bem determinados (0, 5 e 10).

1.1. Sinais digitais binários

Quando os sinais digitais assumem apenas dois possíveis valores designam-se por sinais digitais binários (Figura 1.4).

A grande maioria dos aparelhos electrónicos que utilizamos correntemente é composta por circuitos digitais binários, que lidam com sinais semelhantes ao apresentado na Figura 1.4. Quando é utilizada a chamada lógica positiva, o maior valor do sinal designa-se por valor lógico 1 ou *verdadeiro* e o menor valor do sinal designa-se por valor lógico 0 ou *falso*.

Figura 1.4. Sinal digital binário



Os dispositivos electrónicos, como os circuitos digitais binários, funcionam à custa de electricidade, logo importa introduzir duas grandezas eléctricas fundamentais: a tensão eléctrica e a corrente eléctrica.

A tensão representa a energia, por unidade de carga, necessária para movimentar as cargas eléctricas. Já o movimento das cargas pode ser traduzido pela grandeza corrente eléctrica, que representa a quantidade de cargas que atravessam a secção de um condutor por unidade de tempo. Os sinais digitais binários não são mais do que tensões eléctricas. No entanto, como a tensão eléctrica é uma grandeza física analógica, possui bastante ruído (Figura 1.5a).

Para evitar que o ruído dos sinais de tensão possa conduzir a uma incorrecta interpretação do valor binário (1 ou 0), os dispositivos digitais binários são concebidos de forma a interpretarem os valores de tensão da seguinte forma:

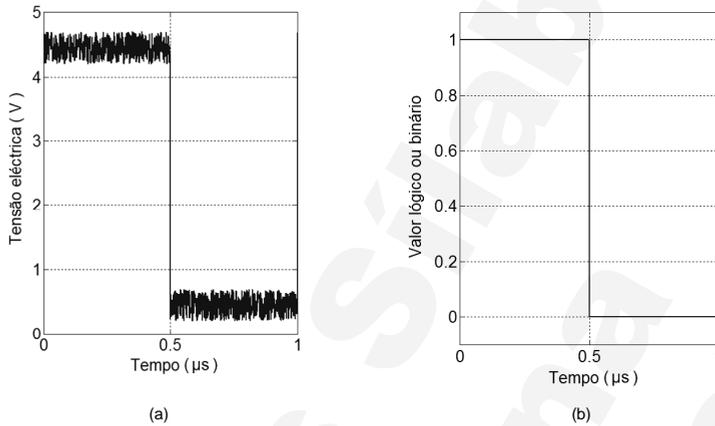
- 0 binário → corresponde a um valor analógico pertencente ao conjunto de tensões $[0 \text{ V}, 0,8 \text{ V}]$.
- Indefinido → corresponde a um valor analógico pertencente ao conjunto de tensões $]0,8 \text{ V}, 2 \text{ V}[$.
- 1 binário → corresponde a um valor analógico pertencente ao conjunto de tensões $[2 \text{ V}, 5 \text{ V}]$.

Uma das vantagens dos dispositivos digitais baseia-se na abstracção apresentada no parágrafo anterior. Se os intervalos de tensão correspondentes aos valores lógicos 1 e 0 forem respeitados, a saída de um qualquer circuito digital produzirá uma tensão que se situa num dos intervalos referidos, o que permite que um erro à entrada não se propague. Suponhamos que um dispositivo digital responde à entrada lógica *um* com uma saída *zero*. Se o valor analógico de entrada for 4,123452 Volts¹, a saída lógica será 0, sendo que a resposta será exactamente a mesma se a entrada for igual a 2,8764 Volts, pois ambos os valores pertencem ao conjunto das tensões que permitem representar o valor lógico 1 ou *verdadeiro*.

A Figura 1.5 mostra um sinal de tensão real à entrada de um dispositivo digital binário e a forma como este o interpreta.

⁽¹⁾ Volt: unidade do sistema internacional correspondente à tensão eléctrica.

Figura 1.5. Sinal de tensão: (a) real à entrada/saída de um dispositivo digital binário; (b) forma como o dispositivo digital binário o interpreta



Nos sistemas puramente analógicos, um erro à entrada propaga-se ao longo dos diferentes subsistemas podendo traduzir-se num erro significativo à saída. Para reduzir esses erros e aumentar a exactidão dos circuitos analógicos é necessário conceber circuitos analógicos consideravelmente mais complexos, o que aumenta consideravelmente os custos de concepção. Para melhorar a *performance* destes dispositivos, sem aumentar consideravelmente o seu custo, introduziram-se os dispositivos digitais. Hoje em dia, a grande maioria dos circuitos electrónicos são compostos por sistemas analógicos (que permitem a interacção entre os sistemas digitais e o meio) e sistemas digitais cuja principal função consiste em processar a informação (Figura 1.2).

1.2. Amostragem

A amostragem é um processo que consiste na leitura de um sinal analógico para determinados intervalos de tempo, que devem ser regulares ou constantes. Por exemplo, o processo de leitura da temperatura num termómetro hora a hora é um processo de amostragem, em que o período de amostragem é de uma hora. Como resultado, o sinal resultante deixa de ser contínuo, no que diz respeito à grandeza tempo (as medições são efectuadas em intervalos de tempo discretos). A Figura 1.6 mostra um exemplo de amostragem de um sinal analógico.

ACÁCIO MANUEL RAPOSO AMARAL é doutor em Engenharia Electrotécnica (2010), mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores (2005) e licenciado em Engenharia Electrotécnica (1998), pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. É professor no Departamento de Engenharia Informática e Sistemas do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra onde lecciona desde 1998 diversas unidades curriculares pertencentes às áreas da Electrónica Analógica e Digital. Possui mais de quarenta artigos científicos publicados em conferências nacionais e internacionais, assim como em revistas científicas internacionais. Actualmente é director do curso de Especialização Tecnológica em Instalação e Manutenção de Redes e Sistemas Informáticos do referido departamento.

O presente manual introduz os principais fundamentos da área da Electrónica Digital, recorrendo a uma linguagem simples e clara, sem descurar simultaneamente o rigor técnico e científico que uma obra deste tipo exige. No final de cada capítulo, apresenta-se um conjunto de exercícios resolvidos que permitem ao leitor aplicar os conhecimentos apreendidos. Nas secções relativas aos exercícios resolvidos não se apresentam apenas as soluções finais, mas sim todos os passos que permitem chegar ao resultado final.

Esta obra é composta por oito capítulos, interdependentes, que abordam os principais conteúdos da Electrónica Digital, nomeadamente:

- Os sistemas de numeração, códigos binários e operações aritméticas.
- Principais operadores lógicos (portas fundamentais, universais, EX-OR e EX-NOR).
- Simplificação de circuitos lógicos (álgebra de Boole e Mapas de Karnaugh).
- Representação de equações Booleanas (formas canónicas e tabelas de verdade).
- Circuitos integrados, famílias lógicas (TTL e CMOS) e equipamento de treino.
- Análise e projecto de circuitos combinacionais (circuitos aritméticos, codificadores, descodificadores, geradores de paridade, entre outros).
- Circuitos combinacionais dedicados MSI-LSI (descodificador de 7 segmentos, codificadores, multiplex, demultiplex, circuitos aritméticos e de memória).
- Circuitos sequenciais (células de memória, *flip-flops*, contadores, divisores de frequência e registos).
- Análise e projecto de circuitos sequenciais (etapas, simplificação, modelo de Mealy e de Moore).
- Projecto de contadores (síncronos, assíncronos e CI 74163).

Os conceitos apresentados são leccionados em diversas unidades curriculares de diferentes cursos do ensino superior, nomeadamente nas áreas da Engenharia Electrotécnica, Informática, Electrónica, Telecomunicações, Mecânica, Electromecânica, Aeronáutica, Mecatrónica, entre outras.

Sistemas DIGITAIS

Princípios, Análise
e Projectos

