

ACÁCIO MANUEL RAPOSO AMARAL

# ELETRÔNICA DIGITAL

Fundamentos e Projeto

EDIÇÕES SÍLABO



# **Eletrónica Digital**

## **Fundamentos e Projeto**

ACÁCIO MANUEL RAPOSO AMARAL

*EDIÇÕES SÍLABO*

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

Visite a Sílabo na rede  
[www.silabo.pt](http://www.silabo.pt)

FICHA TÉCNICA:

Título: Eletrónica Digital – Fundamentos e Projeto

Autor: Acácio Manuel Raposo Amaral

© Edições Sílabo, Lda.

Capa: Pedro Mota

1ª Edição – Lisboa, janeiro de 2019

Impressão e acabamentos: Europress, Lda.

Depósito Legal: 450955/19

ISBN: 978-972-618-992-3



**EDIÇÕES SÍLABO, Lda.**

Publicamos conhecimento

Editor: Manuel Robalo

R. Cidade de Manchester, 2

1170-100 Lisboa

Tel.: 218130345

e-mail: [silabo@silabo.pt](mailto:silabo@silabo.pt)

[www.silabo.pt](http://www.silabo.pt)

# Índice

<b>Prefácio</b>	13
-----------------	----

## Capítulo 1

---

### **Introdução**

1.1. Abstração digital	17
1.2. Processo de conversão de um sinal analógico para digital binário	20
1.2.1. Amostragem	21
1.2.2. Quantização	21
1.2.3. Codificação	21
1.2.4. Compressão de informação	23
1.2.5. Conversão analógico-digital	24
1.3. Transferência de informação digital via série e paralelo	26
1.4. Estrutura modular	28
1.5. Especificações	29
1.6. Resumo	30

## Capítulo 2

---

### **Sistemas de numeração**

2.1. Conversão de decimal para binário, octal ou hexadecimal	36
2.2. Conversão entre binário, octal e hexadecimal	38
2.2.1. Conversão de binário para octal e vice-versa	38
2.2.2. Conversão de binário para hexadecimal e vice-versa	39
2.2.3. Conversão de octal para hexadecimal e vice-versa	39

## Capítulo 3

---

### **Códigos**

3.1. Códigos alfanuméricos	42
3.2. Código binário natural, código BCD e código Excesso 3	45
3.3. Código Gray	47
3.4. Códigos bipolares: números positivos e negativos	48
3.4.1. Sinal e valor absoluto	49
3.4.2. Aritmética modular	49
3.4.3. Complemento de um	51
3.4.4. Complemento de dois	52
3.4.5. Operação de subtração em complemento de um	53
3.4.6. Operação de subtração em complemento de dois	54
3.5. <i>Overflow</i>	56
3.6. Contrair e estender números	57
3.7. Representação de números reais em vírgula fixa	59
3.8. Representação de números reais em vírgula flutuante	61
3.9. Códigos de deteção e correção de erros: códigos Hamming	67

## Capítulo 4

---

### **Álgebra de Boole e portas lógicas**

4.1. Portas fundamentais: <i>AND</i> , <i>OR</i> e <i>NOT</i>	74
4.1.1. Porta <i>AND</i>	75
4.1.2. Porta <i>OR</i>	75
4.1.3. Porta <i>NOT</i>	76
4.2. Portas universais: <i>NAND</i> e <i>NOR</i>	77
4.2.1. Porta <i>NAND</i>	77
4.2.2. Porta <i>NOR</i>	78
4.3. Diagrama lógico	79

4.4. Simplificação algébrica de expressões booleanas	81
4.4.1. Teoremas de álgebra de Boole	83
4.4.2. Teoremas de DeMorgan	87
4.4.3. Simplificação de expressões	87
4.5. Universalidade das portas <i>NAND</i> e <i>NOR</i>	90
4.6. Portas <i>EX-OR</i> e <i>EX-NOR</i>	96
4.7. Características físicas das portas lógicas	98
4.7.1. Margens de ruído	98
4.7.2. Atrasos nas portas lógicas	100
4.7.3. <i>Fan-out</i> e <i>fan-in</i>	102
4.7.4. Potência dinâmica e estática	103
4.8. Função <i>enable</i>	103
4.9. Barramento	104
4.10. <i>Buffer</i> de três estados	105

## Capítulo 5

---

### **Métodos tabulares de simplificação de expressões algébricas**

5.1. Obtenção da função a partir da tabela de verdade	110
5.2. Redução da tabela de verdade	112
5.3. Mapas de Karnaugh	115
5.3.1. Preenchimento do mapa de Karnaugh	124
5.3.2. Simplificação de expressões recorrendo aos mapas de Karnaugh	126
5.3.2.1. Forma mínima de soma de produtos ( $F_{mSP}$ )	128
5.3.2.2. Forma mínima de produto de somas ( $F_{mPS}$ )	129
5.3.2.3. Implicante primo essencial e não essencial	130
5.3.3. Simplificação de mapas de Karnaugh com expressões algébricas	131
5.3.4. Redução de mapas de Karnaugh	134
5.3.5. <i>Don't care condition</i>	136
5.4. Método Quine-McCluskey	137

5.5. Otimização multinível	143
5.5.1. Fatorização	144
5.5.2. Decomposição	146
5.6. Transições espúrias ( <i>Hazard effect</i> )	147
5.7. Resumo	150

## Capítulo 6

---

### **Famílias lógicas e circuitos integrados**

6.1. Família CMOS	152
6.2. Família TTL	159
6.3. Circuitos integrados	160
6.4. Implementação do circuito	163
6.4.1. Fonte de alimentação	163
6.4.2. <i>Breadboard</i>	163
6.4.3. Gerador de sinal	164
6.4.4. Voltímetro	164
6.4.5. LED	165
6.4.6. <i>Display</i> de 7 segmentos	165
6.4.7. Interruptores	165
6.4.8. Botão de pressão	166
6.5. Planta de montagem	166

## Capítulo 7

---

### **Análise e síntese de circuitos combinacionais**

7.1. Análise de circuitos combinacionais	173
7.2. Síntese de circuitos combinacionais	174
7.3. Funções simétricas	178
7.4. Desenho hierárquico	180
7.4.1. Comparador de duas palavras de dois <i>bits</i>	180



7.5. Circuitos iterativos	184
7.5.1. Gerador de paridade	185
7.5.2. Detetor de padrões	186
7.6. Circuitos aritméticos	189
7.6.1. Somador	190
7.6.2. Subtrator	193
7.6.3. Somador/subtrator	197
7.6.3.1. Somador/subtrator com saída em complemento de 2	198
7.6.3.2. Somador/subtrator com saída em sinal e valor absoluto	200
7.6.4. Somador BCD	201
7.6.5. Somador <i>carry look ahead</i>	204
7.6.6. Multiplicador de números sem sinal	210
7.6.7. Comparador	213
7.7. Conversores de código e codificadores	216
7.7.1. Conversor de BCD para código Excesso 3	217
7.7.2. Conversor de binário natural de 4 <i>bits</i> para código Gray	219
7.7.3. Conversor de binário natural para BCD	221
7.8. Descodificador de 7 segmentos	228
7.9. Gerador de paridade	230

## Capítulo 8

---

### **Circuitos combinacionais dedicados**

8.1. Codificadores	236
8.1.1. Codificador com prioridade para binário natural – circuito integrado SN74LS148	240
8.1.2. Codificador com prioridade para BCD – circuito integrado SN74LS147	241
8.2. Descodificadores	241
8.2.1. Expansão de descodificadores	243
8.2.2. Entrada <i>enable</i>	244
8.2.3. Realização de funções lógicas com descodificadores	246
8.2.4. Descodificador de BCD para decimal – circuito integrado SN74LS42	248
8.2.5. <i>Demultiplexer</i>	249

8.2.6. DEC/DEMUX – integrado SN74LS139	251
8.2.7. Descodificador 7 segmentos – integrado SN74LS47	252
8.2.8. Aplicações dos descodificadores – corretor de erros baseado nos códigos Hamming	253
8.3. <i>Multiplexers</i>	256
8.3.1. Implementação de funções lógicas com um <i>multiplexer</i>	258
8.3.2. Implementação de funções lógicas com dois <i>multiplexers</i>	260
8.3.3. Implementação de funções lógicas com <i>multiplexers</i> de menor dimensão e lógica adicional	262
8.3.4. Multiplicador de números com sinal com <i>multiplexers</i>	263
8.3.5. Integrados: SN74LS153 (MUX 4:1) e SN74LS151 (MUX 8:1)	268
8.3.6. Realização de <i>multiplexers</i> com um descodificador	269
8.3.7. Realização de <i>multiplexers</i> com <i>buffers</i> de três estados	270
8.3.8. Expansão de <i>multiplexers</i>	270
8.4. Integrado: CI 74LS283 (somador de 4 <i>bits</i> )	271
8.5. Integrado: CI 74LS85 (Comparador de 4 <i>bits</i> )	272
8.6. <i>Read Only Memory</i> (ROM)	274
8.6.1. MROM ( <i>Mask Programmable Read Only Memory</i> )	276
8.6.2. OTPROM ( <i>One Time Programmable Read Only Memory</i> )	277
8.6.3. UVEPROM ( <i>Ultra Violet Erasable Programmable Read Only Memory</i> )	277
8.6.4. EEPROM ( <i>Electrically Erasable Programmable Read Only Memory</i> )	278
8.6.5. <i>Flash EPROM</i> ( <i>Flash Erasable Programmable Read Only Memory</i> )	279

## Capítulo 9

---

### **Introdução aos circuitos sequenciais**

9.1. <i>Latch S-R</i>	282
9.1.1. Aplicações da <i>Latch S-R</i>	286
9.1.2. <i>Latch S-R low active</i>	287
9.2. <i>Latch J-K</i>	288
9.3. <i>Latch</i> e <i>Flip-Flop D</i>	291
9.4. <i>Flip-Flop J-K</i>	293
9.5. <i>Flip-Flop J-K</i> Mestre-Escravo	296

9.6. <i>Flip-Flop D</i> Mestre-Escravo	298
9.7. <i>Flip-Flop J-K</i> sensível à borda ascendente	300
9.8. <i>Flip-Flop T</i> sensível à borda ascendente	302
9.9. <i>Flip-Flops</i> : símbolo lógico, tabela funcional e tabela de excitação	303
9.10. <i>Flip-Flops</i> – entradas assíncronas: <i>clear</i> e <i>set</i>	307
9.11. Aplicações mais comuns dos <i>Flip-Flops</i>	308
9.12. <i>Flip-Flops</i> sensíveis à transição do relógio: especificações temporais	313

## Capítulo 10

---

### **Registos e contadores**

10.1. Registos de deslocamento	318
10.2. Registos universais	320
10.3. Gerador de sequências pseudoaleatórias	321
10.4. Contadores	323
10.5. Contadores assíncronos	325
10.6. Contador Johnson	328
10.7. Contadores síncronos	330
10.8. Contador 74163	333
10.8.1. Projeto de contadores com CI 74163 – algoritmo	337
10.8.2. Projeto de um contador que efetue a contagem 0, 1, 2, ..., 9 com CI 74163	338
10.8.3. Projeto de um contador que efetue a contagem 3, ..., 7 com CI 74163	341
10.8.4. Projeto de um contador que efetue a contagem 0, 2, 5, 8, 0 com CI 74163	342
10.8.5. Projeto de contadores com CI 74163 – entradas <i>enable</i>	345

## Capítulo 11

---

### **Análise e projeto de circuitos sequenciais**

11.1. Modelo de Moore e Mealy	350
11.2. Análise de circuitos sequenciais	352

11.3. Projeto de circuitos sequenciais	362
11.4. Máquina de estados autocorretora	372
11.5. Codificação dos estados	375
11.6. Eliminar estados equivalentes	377
11.7. Conversão entre máquinas de estados de Moore e de Mealy	382
11.8. Projeto de circuitos sequenciais recorrendo a lógica MSI e LSI	387
11.9. Projeto de circuitos sequenciais recorrendo a contadores (CI 74163)	391
11.10. Projeto de circuitos sequenciais com mais de uma máquina de estados	393

## Capítulo 12

---

### **Projeto de sistemas digitais**

12.1. Projeto de sistemas – método <i>ad hoc</i>	404
12.1.1. Projeto de um multiplicador por somas sucessivas	406
12.1.2. Projeto de um divisor por subtrações sucessivas	410
12.1.3. Projeto de um circuito capaz de calcular o máximo divisor comum (M.D.C.) de dois números inteiros	415
12.2. Projeto de um sistema de controlo de semáforos – método baseado em lógica discreta	422
12.3. Projeto de um sistema de controlo – método baseado numa unidade de controlo microprogramada	430
12.3.1. Estrutura	431
12.3.2. Microinstrução	432
12.3.3. Conceção da unidade de controlo	435
12.3.4. Unidade de controlo de um multiplicador baseado em somas sucessivas	436
12.3.5. Unidade de controlo de um divisor baseado em subtrações sucessivas	441

<b>Bibliografia</b>	447
---------------------	-----

# Prefácio

A eletrónica é uma área da física aplicada fundamental na vida moderna e essencial para a realização das mais diversas tarefas do quotidiano. A sua crescente importância tem vindo a influenciar os *curricula* de vários cursos, tendo-se tornado numa disciplina elementar, à semelhança da matemática e da informática, em cursos de engenharia.

O âmbito da eletrónica é muito vasto, podendo ser dividido em dois subgrupos: a eletrónica analógica e a eletrónica digital. A primeira permite interagir diretamente com o meio físico, pois este é maioritariamente analógico. A segunda, pelo contrário, não pode interagir diretamente com o meio, o que lhe permite processar informação de forma mais exata, simples e precisa. No entanto, os dispositivos digitais necessitam da eletrónica analógica para poderem interagir com o meio, o que nos permite concluir que ambos os subgrupos são essenciais.

Devido à extensão do tema, este manual apenas aborda a temática da eletrónica digital, sendo a temática da eletrónica analógica exposta num outro manual do mesmo autor intitulado *Electrónica Analógica – Princípios, Análise e Projectos*.

O presente manual visa servir de elemento de apoio a unidades curriculares relacionadas com sistemas digitais, podendo ser utilizado de forma profícua por alunos de engenharia e técnicos de eletrónica com experiência prática, mas sem bases teóricas, no desenvolvimento de sistemas digitais de nível 1 (circuitos combinacionais), nível 2 (circuitos sequenciais) e nível 3 (microsistemas compostos por uma unidade de dados e uma unidade de controlo).



# Capítulo 1

## Introdução

Um sistema é constituído por elementos que trabalham em conjunto com o propósito de alcançar um determinado objetivo, sendo composto por várias entradas e saídas que se relacionam de acordo com uma determinada função, a qual expressa o seu comportamento. Os sistemas podem ser agrupados em digitais, analógicos e híbridos.

O computador é um exemplo paradigmático de um sistema digital que pode ser categorizado em diferentes classes: computador de secretária (muitas vezes designado por *desktop*), portátil ou *laptop*, supercomputadores, servidores, sistemas embebidos, entre outros. Cada um destes computadores, apesar de deter diferentes requisitos, apresenta a mesma estrutura genérica sendo composto pelo processador, pela memória e por dispositivos de controlo das entradas e das saídas.

O processador tem como função manipular a informação, a qual provém maioritariamente da memória. Por sua vez, a memória permite o armazenamento temporário dos dados e das instruções que o processador irá executar. Os dispositivos de entrada permitem captar os dados do exterior, enquanto que os dispositivos de saída possibilitam transferir a informação processada pelo computador para o exterior (utilizador ou sistemas físicos).

Os dispositivos de entrada e de saída dependem da aplicação e do tipo de computador usado. Assim, no caso de um *desktop*, alguns dos dispositivos de entrada mais comuns são o teclado e o rato, e os de saída são o monitor e a impressora; no caso de um servidor, os dispositivos de entrada e saída são a rede e os sistemas de arquivo; e, nos sistemas embebidos, os dispositivos de entrada são sensores e os dispositivos de saída são os atuadores.

Os sistemas embebidos são desenvolvidos para uma aplicação específica, como por exemplo, para televisores, telemóveis, aparelhos de GPS, máquinas de lavar roupa e louça, micro-ondas, relógios digitais, impressoras, monitores, projetores, calculadoras digitais, câmaras digitais, entre muitas outras aplicações. Logo, possuem uma função específica, o que os torna bastante mais baratos do que um *desktop*. Este último representa um computador de propósito geral que permite executar as mais diversas tarefas.

Os sistemas embebidos, como por exemplo, o microcontrolador contido numa câmara digital, necessitam de interagir com o meio. Para o efeito, utilizam sensores que representam dispositivos analógicos que convertem uma grandeza física, como por exemplo a luz, num sinal elétrico de tensão ou corrente. As grandezas elétricas referidas, a tensão e a corrente, contêm informação que necessita de ser processada. O processamento desta informação, através do seu armazenamento, transmissão ou manipulação, é efetuado pelos sistemas digitais, pois estes são mais fiáveis, mais simples e baratos do que os sistemas analógicos. O conjunto dos sistemas digitais e analógicos representa um sistema híbrido, pelo que se poderá concluir que uma câmara digital representa um sistema híbrido.

Da mesma forma, um *desktop*, conjuntamente com os seus periféricos, pode ser considerado um sistema híbrido, pois necessita de comunicar com o exterior, utilizando para o efeito, os seus periféricos. Podemos dar como exemplo de dispositivos de entrada uma *webcam* ou um microfone. Estes dispositivos permitem captar imagens e som, que são grandezas analógicas, para que possam ser processadas posteriormente pelo computador. Por sua vez, a informação processada pelo computador necessita muitas vezes de ser compreendida pelo ser humano e/ou sistemas físicos, pelo que são necessários dispositivos de saída, como por exemplo, os dispositivos áudio que convertem a informação processada pelo computador em som.

O processamento de informação é fundamental nas sociedades modernas sendo maioritariamente realizado pelos sistemas digitais: seja num sistema embebido contido num comando do televisor, o qual permite a comunicação e controlo do televisor; seja num *desktop*, o qual permite o processamento de texto, acesso ao *e-mail*, Internet, redes sociais, compras *on-line*, etc., ou num supercomputador que permite a simulação computacional de modelos matemáticos complexos utilizados, por exemplo, nas previsões meteorológicas.

Para que os sistemas digitais possam processar as grandezas físicas é necessário recorrer à abstração digital, ou seja, converter os sinais analógicos originais, habitualmente representados na forma de um sinal elétrico analógico, em sinais digitais binários. Para o efeito, é necessário efetuar um conjunto de três operações: a amostragem, a quantização e a codificação, as quais serão discutidas neste capítulo.



No entanto, antes de abordar a conversão analógico-digital, importa compreender o que são grandezas digitais e como é que estas se relacionam com as grandezas físicas que, na sua grande maioria, são analógicas. Esta temática será abordada na próxima secção.

---

## 1.1. Abstração digital

A grande maioria das grandezas físicas assume naturalmente valores analógicos, ou seja, variam de forma gradual ou contínua. Considere-se, como exemplo, um velocímetro analógico de um carro, quando o carro atinge a velocidade de 100 km/h, o ponteiro do velocímetro necessitou de percorrer todos os possíveis valores reais entre o 0 e o 100. O conjunto de valores indicados é infinito, representando portanto uma grandeza analógica que torna o seu processamento no formato digital inexecutável.

Desta forma, houve a necessidade de limitar a representação da informação a processar. Para o efeito, surgiram os velocímetros digitais que apenas representam números inteiros, ou seja, de acordo com este novo velocímetro a velocidade do carro passa automaticamente de um número inteiro para o outro, sendo ignorada a parte fracionária do número. Contudo não é isso que sucede, na medida em que esta aproximação reduz a quantidade de informação a processar. Por exemplo, na situação anterior o número total de valores diferentes que o velocímetro terá que apresentar é de 101, sendo esta uma representação digital.

A grande diferença entre os sinais analógicos e digitais prende-se com o facto dos primeiros variarem de forma contínua, não apresentando variações bruscas entre dois valores consecutivos, ao contrário dos sinais digitais que são representados por degraus, com variações bruscas entre dois valores consecutivos. Este facto sucede porque os sinais digitais apenas podem assumir valores digitais.

Quando os sinais digitais utilizam apenas dois possíveis valores designam-se por sinais digitais binários. A grande maioria dos aparelhos eletrónicos que utilizamos no quotidiano é composta por circuitos digitais binários que lidam com sinais digitais binários. 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*.

Os dispositivos eletrônicos, como os circuitos digitais binários, funcionam à base de tensões elétricas. O motivo desta escolha deve-se fundamentalmente a dois fatores:

- Prático – todos os edifícios possuem uma tomada elétrica que nos disponibiliza eletricidade.
- Tecnologia conhecida – como a eletrônica é uma tecnologia madura o desenvolvimento de circuitos elétricos torna-se mais fácil.

Os circuitos eletrônicos sejam digitais ou analógicos, possuem componentes tais como transístores, resistências e condensadores. No entanto, enquanto um circuito analógico lida com uma enorme diversidade de valores de tensão elétrica, os dispositivos digitais são concebidos para lidarem apenas com duas gamas de tensão designadas por: o ‘zero’ binário e o ‘um’ binário. A tensão elétrica representa a energia, por unidade de carga, necessária para movimentar as cargas elétricas, sendo uma grandeza física analógica, que se caracteriza por conter bastante ruído gerado pelo meio envolvente. Para evitar que o ruído dos sinais de tensão possa conduzir a uma incorreta interpretação do valor binário (1 ou 0), os dispositivos digitais binários são concebidos de forma a interpretarem os valores de tensão da seguinte forma:

- ‘zero’ binário (0) → corresponde a um valor analógico pertencente ao conjunto de tensões elétricas [ 0 V, 0.8 V ].
- Indefinido → corresponde a um valor analógico pertencente ao conjunto de tensões elétricas ] 0.8 V, 2 V [. Neste caso, o dispositivo pode interpretar o valor binário como ‘zero’ binário ou ‘um’ binário, não sendo possível prever a sua tradução.
- ‘um’ binário (1) → corresponde a um valor analógico pertencente ao conjunto de tensões [ 2 V, 5 V ].

As especificações apresentadas são designadas por *abstração digital* e permitem justificar grande parte das vantagens que os sistemas digitais apresentam sobre os sistemas analógicos. As gamas de tensão apresentadas anteriormente referem-se apenas à tecnologia TTL (*transistor transistor logic*), outras tecnologias utilizadas na conceção de circuitos digitais possuem outras gamas de tensão.

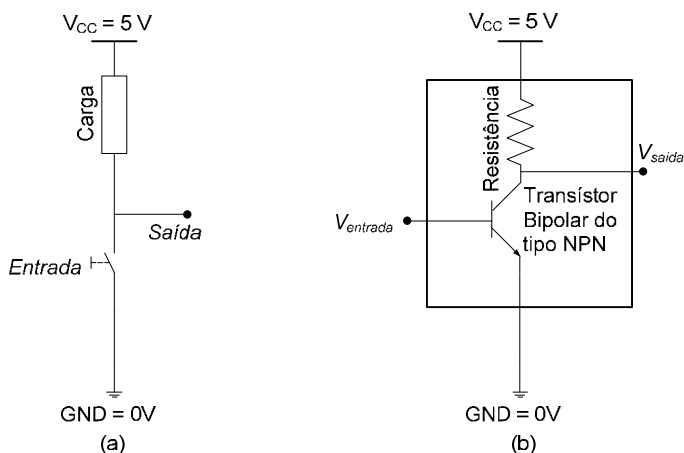
Se os intervalos de tensão correspondentes aos valores lógicos 0 e 1 forem repetidos à entrada de um circuito digital e, portanto, não ocorrer a situação de indefinido, na saída do circuito digital será gerada sempre uma tensão que se situa num dos intervalos de tensão definidos pelo 0 ou 1 lógico. Esta situação não ocorre nos sistemas puramente analógicos, pois um pequeno erro à entrada propaga-se ao longo dos diferentes subsistemas, podendo traduzir-se num erro significativo na saída. Para reduzir esses erros e aumentar a exatidão dos circuitos analógicos, é

imperativo conceber circuitos analógicos consideravelmente mais complexos, o que aumenta consideravelmente os custos de concepção. Deste modo, para melhorar a *performance* destes dispositivos, sem aumentar consideravelmente o seu custo, introduziram-se os dispositivos digitais. A grande maioria dos circuitos eletrónicos modernos é composta por sistemas analógicos, que permitem a interação entre os sistemas digitais e o meio, e por sistemas digitais cuja principal função consiste em processar a informação.

Tendo em consideração as observações anteriores é possível concluir que se os componentes de eletrónica digital respeitarem as especificações anteriores, o projetista de circuitos digitais não necessita de se preocupar com o circuito eletrónico subjacente a esse componente. Esta extrapolação é usualmente designada por abstração digital.

Um dos componentes fundamentais da eletrónica digital é o inversor (*NOT*), a partir do qual é possível conceber outros elementos de eletrónica digital. A função do inversor é inverter o valor lógico que se encontra na sua entrada, ou seja, quando na entrada surge um '0' lógico, na saída deve aparecer um '1' lógico e vice-versa. A forma mais simples de implementar este circuito é através de um interruptor como se pode constatar na Figura 1.1a.

**Figura 1.1. Inversor: (a) princípio de funcionamento e (b) composição de um inversor da família TTL**



Quando o interruptor da Figura 1.1a é pressionado, o valor lógico da entrada corresponde ao '1' lógico; se, pelo contrário, não for pressionado, o valor lógico da entrada corresponde ao '0' lógico. Desta forma quando:

- O interruptor é pressionado, a saída é ligada aos zero Volts, produzindo um '0' lógico que corresponde ao valor lógico oposto ao da entrada.
- O interruptor não é pressionado, a saída é desligada do GND, ficando, portanto, ligada ao  $V_{CC}$  por intermédio da carga o que permite produzir um '1' lógico.

Do ponto de vista prático, o interruptor é substituído por um transístor, que é um interruptor extremamente rápido que pode ser controlado eletronicamente. Por outro lado, a carga é substituída por uma resistência *pull-up* que permite simultaneamente limitar o valor da corrente no circuito e aumentar o valor da tensão de saída para próximo dos 5 Volts, como se pode observar na Figura 1.1b. Assim,

- Quando na entrada do circuito inversor se aplica uma tensão  $V_{\text{entrada}} \in [0 \text{ V}, 0.8 \text{ V}]$ , na saída será gerada uma tensão  $V_{\text{saída}} \in [2 \text{ V}, 5 \text{ V}]$ .
- Quando na entrada do circuito inversor se aplica uma tensão  $V_{\text{entrada}} \in [2 \text{ V}, 5 \text{ V}]$ , na saída será gerada uma tensão  $V_{\text{saída}} \in [0 \text{ V}, 0.8 \text{ V}]$ .

Quando se transmite um sinal elétrico através de um cabo, o meio ambiente ou outros aparelhos eletrônicos adjacentes podem induzir ruído elétrico, o qual pode ser mal interpretado pelo sistema digital que se encontra a jusante. Para mitigar este fenómeno, o conjunto das tensões correspondentes aos valores digitais 0 e 1 são mais pequenos na saída do que na entrada do sistema digital.

Importa referir que nem todos os sistemas digitais operam com sinais de tensão ou de corrente, por exemplo, o disco duro do computador (HD) utiliza o campo magnético e a memória principal (RAM) cargas elétricas.

---

## 1.2. Processo de conversão de um sinal analógico para digital binário

Como foi referido anteriormente, os sistemas digitais não compreendem grandezas analógicas, sendo portanto necessário converter os valores analógicos dos sinais do mundo real para valores digitais que possam ser compreendidos pelos sistemas digitais. Esta conversão é efetuada por um circuito designado por conversor analógico-digital (A/D), o qual é composto por componentes digitais e analógicos.

**Acácio Manuel Raposo Amaral** é Doutor em Engenharia Eletrotécnica (2010), Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (2005) e Licenciado em Engenharia Eletrotécnica (1998), pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC). É Professor no Departamento de Engenharia Informática e Sistemas (DEIS) do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), onde leciona, desde 1998, diversas unidades curriculares pertencentes às áreas da Eletrónica Analógica e Digital. Possui mais de 45 artigos científicos publicados em conferências nacionais e internacionais, assim como em revistas científicas internacionais. É autor de três livros intitulados *Análise de circuitos e dispositivos de electrónica* (2013), *Sistemas Digitais: Princípios, Análise e Projectos* (2014) e *Electrónica Analógica: Princípios, Análise e Projectos* (2017) e coautor de um livro intitulado *Diagnosis and Fault Tolerance of Electrical Machines, Power Electronics and Drives* (2018). Atualmente, a par das funções de docente, exerce o cargo de Diretor do Curso Técnico Superior Profissional (CTeSP) em Redes e Sistemas Informáticos (RSI) do DEIS.

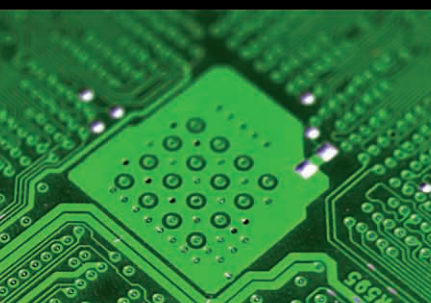
Com recurso a uma linguagem simples e clara, pedagogicamente cuidada, mas não abdicando do rigor técnico e científico, este manual introduz os principais fundamentos da Eletrónica Digital e apresenta diversas metodologias que permitem conceber circuitos digitais, com diferentes níveis de complexidade (combinacionais, sequenciais e microssistemas compostos por uma unidade de dados e uma unidade de controlo). Para que o leitor consolide os conceitos expostos, projetos práticos ilustram a teoria exposta.

Nos doze capítulos do livro são abordados os principais conteúdos da Eletrónica digital:

- Conceitos base, tais como abstração digital, processo de conversão de um sinal analógico para digital binário, conversão entre sistemas de numeração, entre outros.
- Códigos utilizados pelos sistemas digitais binários.
- Operadores lógicos, as portas lógicas e suas principais características físicas.
- Métodos de simplificação de expressões algébricas e a otimização multinível.
- Famílias lógicas e características.
- Análise e projeto de circuitos combinacionais (desenho hierárquico e circuitos iterativos).
- Circuitos combinacionais: comunicação (codificadores, descodificadores, multiplexers, demultiplexers e detetores/corretores de erros), aritméticos (somadores, subtratores, multiplicadores e comparadores) e de memória (ROM, PROM, EPROM, UVPRM e EEPROM).
- Elementos base de um circuito sequencial (Básculas e *Flip-Flops*), aplicações (registos e contadores) e especificações temporais.
- Análise e projeto de circuitos sequenciais (conversão entre os modelos Mealy e Moore, máquinas de estado autocorretoras, eliminação de estados equivalentes, uso de lógica MSI e LSI e projeto de circuitos compostos por várias máquinas de estado).
- Projeto de sistemas digitais (método *ad hoc*, lógica discreta e unidade de controlo microprogramada).

O público-alvo deste livro são os estudantes dos diferentes cursos de Engenharia que, nas suas unidades curriculares, abordem matérias de eletrónica digital.

Engenheiros e outros profissionais da área da eletrónica digital também poderão consultar com vantagens este livro.



# ELETRÓNICA DIGITAL

## Fundamentos e Projeto

