

# Indice

---

<b>Prefazione</b>	<b>ix</b>
<b>1    <b>Introduzione</b></b>	<b>1</b>
1.1   Evoluzione della progettazione dei sistemi digitali	1
1.2   Flusso di progettazione dei sistemi digitali	2
1.3   Obiettivi del libro	9
1.4   Struttura ragionata del libro	10
<b>2    <b>Codifica dell'informazione</b></b>	<b>13</b>
2.1   Introduzione	13
2.2   Codifica dell'informazione non numerica	14
2.3   Codifica dell'informazione numerica: notazione posizionale	15
2.4   Conversioni di base	16
2.5   Codifica ottale e esadecimale	19
2.6   Codifica binaria delle cifre decimali	20
2.7   Rappresentazione geometrica dei numeri binari	21
2.8   Distanza di Hamming	23
2.8.1   Codici a distanza di Hamming unitaria	24
2.9   Aritmetica binaria	26
2.9.1   Addizione binaria	27
2.9.2   Sottrazione binaria	29
2.9.3   Rappresentazione dei numeri negativi	30
2.9.4   Scorrimento	36
2.9.5   Moltiplicazione binaria	36
2.9.6   Divisione binaria	39
2.10  Notazione in virgola fissa e in virgola mobile	42
2.11  Notazione in virgola mobile	43
2.11.1  Rappresentazione non biunivoca	44
2.11.2  Definizione della mantissa	45
2.11.3  Relazione tra numero di bit della mantissa e dell'esponente	45
2.11.4  Il problema delle eccezioni	47
2.11.5  Convenzioni per la rappresentazione dei numeri in virgola mobile	48
2.11.6  Standard IEEE 754 - 1985	50
2.12  Il problema degli errori: codici rilevatori e correttori	53
2.12.1  Codici rilevatori dell'errore singolo	54

2.12.2	Codici correttori dell'errore singolo	55
2.13	Esercizi	57
<b>3</b>	<b>Algebra di commutazione</b>	<b>59</b>
3.1	Perché l'algebra Booleana	59
3.2	Proprietà e teoremi fondamentali	63
3.3	Dalla funzione al circuito	64
3.3.1	Operatori universali	69
3.4	Forme canoniche	70
3.5	Esercizi con strumenti automatici	75
3.6	Esercizi	80
<b>4</b>	<b>Ottimizzazione delle reti combinatorie</b>	<b>81</b>
4.1	Motivazioni	81
4.2	Minimizzazione a due livelli di reti combinatorie a un'uscita	85
4.2.1	Metodo di Quine-McCluskey	90
4.2.2	Esercizi con strumenti automatici	98
4.3	Minimizzazione a due livelli di reti combinatorie a più uscite	101
4.3.1	Metodo di Quine-McCluskey per funzioni a più uscite	103
4.4	Minimizzazione a più livelli di reti combinatorie	107
4.4.1	Modelli di rappresentazione.	110
4.4.2	Modello algebrico	113
4.4.3	Trasformazioni algebriche	113
4.4.4	Trasformazioni Booleane	117
4.4.5	Esercizi con strumenti automatici	122
4.5	La valutazione dei ritardi	127
4.5.1	Esercizi con strumenti automatici	129
4.6	Esercizi	131
<b>5</b>	<b>Dalle reti combinatorie ai circuiti sequenziali</b>	<b>133</b>
5.1	Introduzione	133
5.2	Bistabili	134
5.2.1	Bistabili asincroni	135
5.2.2	Bistabili sincroni	139
5.3	Registri a scorrimento; bistabili master-slave	144
5.4	Progetto dei contatori	146
5.4.1	Progetto dei contatori sincroni	147
5.4.2	Progetto dei contatori asincroni	152
5.5	Macchine a stati finiti	157
5.6	Esercizi con strumenti automatici	161
5.7	Esercizi	164
<b>6</b>	<b>Ottimizzazione delle macchine sequenziali sincrone</b>	<b>167</b>
6.1	Introduzione	167
6.2	Il progetto basato su macchine a stati finiti	167
6.2.1	FSM come modello di descrizione di un circuito sequenziale	168
6.2.2	Dalla FSM al circuito sequenziale	177

---

6.3	Minimizzazione degli stati	179
6.3.1	Macchine completamente specificate	180
6.3.2	Macchine non completamente specificate	186
6.4	Assegnamento degli stati	192
6.5	Minimizzazione logica	196
6.6	Esercizi con strumenti automatici	198
6.6.1	Dalla FSM al circuito sequenziale	200
6.6.2	Minimizzazione degli stati	206
6.6.3	Assegnamento degli stati	210
6.6.4	Minimizzazione logica	211
6.7	Esercizi	213
<b>7</b>	<b>Macchine sequenziali asincrone</b>	<b>221</b>
7.1	Introduzione	221
7.2	Reti sequenziali asincrone in modo impulsivo	222
7.3	Reti sequenziali asincrone in modo fondamentale	227
7.4	Esercizi	249
<b>8</b>	<b>Mapping tecnologico</b>	<b>255</b>
8.1	Motivazioni	255
8.2	Algoritmi euristici di associazione	256
8.2.1	Esercizi con strumenti automatici	260
8.3	Il problema dell'associazione per componenti programmabili	262
8.3.1	Esercizi con strumenti automatici	268
<b>9</b>	<b>Progetto di circuiti aritmetici</b>	<b>271</b>
9.1	Introduzione	271
9.2	Realizzazione di un'operazione aritmetica	272
9.3	Realizzazione di operazioni aritmetiche su numeri interi	275
9.3.1	Addizione binaria	275
9.3.2	Sottrazione	279
9.3.3	Prodotto	279
9.3.4	Divisione	292
9.3.5	Esercizi con strumenti automatici	296
9.4	Aritmetica in virgola mobile	300
9.4.1	Addizione	300
9.4.2	Sottrazione	303
9.4.3	Moltiplicazione	305
9.4.4	Divisione	305
<b>10</b>	<b>Componenti di un data path</b>	<b>307</b>
10.1	Introduzione	307
10.2	Registri	308
10.2.1	Registro parallelo/parallelo	308
10.2.2	Registro seriale/seriale	310
10.2.3	Registro parallelo/seriale	311
10.3	Unità funzionali	313

10.3.1	Selezione	314
10.3.2	Aritmetiche	320
10.3.3	Logiche	324
10.3.4	Confronto	326
10.4	La progettazione di un datapath	329
10.5	Esercizi con strumenti automatici	331
10.6	Esercizi	336
<b>11</b>	<b>Progetto controllore-data path</b>	<b>339</b>
11.1	L'approccio controllore-data path	339
11.1.1	Descrizione di un data path	349
11.1.2	Esercizi con strumenti automatici	349
11.2	La descrizione formale delle specifiche: grafi dei dati e del controllo	351
11.3	Dalla rappresentazione al progetto: il problema dello scheduling	357
11.3.1	Gli algoritmi di scheduling	358
11.3.2	Il problema dell'allocazione	368
11.4	Macchina a stati finiti con unità di elaborazione (FSMD)	375
11.4.2	Esercizi con strumenti automatici	378
11.5	Il miglioramento delle prestazioni: il pipelining	382
11.6	Esercizi	392
<b>A</b>	<b>Linguaggi di descrizione dello hardware</b>	<b>397</b>
A.1	Motivazioni	397
A.2	VHDL	401
A.2.1	Caratteristiche generali	402
A.2.2	Dichiarazione di entità	404
A.2.3	Architettura	405
A.2.4	Configurazione	408
A.2.5	Lo stile di descrizione concorrente	409
A.2.6	Lo stile di descrizione sequenziale	411
A.2.7	Confronto	414
A.2.8	Costrutti maggiormente utilizzati	416
A.2.9	Regole di sintesi automatica dal livello RT	426
A.3	SystemC	428
A.3.1	La progettazione basata su SystemC	429
A.3.2	Moduli e gerarchia	431
A.3.3	Porte segnali e tipi	432
A.3.4	La concorrenza	435
A.3.5	Waiting e watching	438
A.3.6	Un esempio completo	439
A.3.7	Note sulla sintesi automatica	443
<b>B</b>	<b>Strumenti automatici di progettazione</b>	<b>445</b>
B.1	SIS	445
B.1.1	BVE	447
B.2	VHDL	448
B.3	SystemC	452

# Prefazione

---

La progettazione dei sistemi digitali è un argomento di ricerca e di insegnamento che, oramai da molti decenni, si pone come anello di congiunzione tra informatica ed elettronica. Le basi matematiche, ma anche una buona parte delle tecniche di *sintesi* e addirittura di *ottimizzazione* che su tali basi si fondano, hanno mantenuto gran parte della propria validità e applicabilità anche a fronte dell'impetuosa evoluzione tecnologica. Una ovvia conseguenza di questo fatto è l'esistenza di un gran numero di testi che si occupano di progetto digitale, che, pur rivolgendosi a diverse esigenze e considerando sistemi con diversi livelli di complessità, mantengono almeno in parte la loro pratica significatività. Ci aspettiamo quindi la domanda: "Perché ancora uno"?

La risposta nasce dalla nostra esperienza di insegnamento, nelle Facoltà di Ingegneria e di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali: ci è sembrato che potesse essere utile un testo *in italiano* dedicato tipicamente a studenti universitari (dei primi due livelli di laurea) il cui scopo fosse la presentazione dei principi e delle metodologie *fondamentali* del progetto di sistemi digitali, implicando il minimo insieme possibile di prerequisiti sotto l'aspetto informatico (si richiede semplicemente che l'allievo conosca i principi della programmazione), sotto quello tecnologico (sebbene si sia riservato qualche piccolo spazio alla tecnologia, il testo è in larghissima misura comprensibile anche ignorando l'elettronica) e infine sotto quello matematico (anche se una buona base di algebra e di logica non guasta!).

Un testo, in altre parole, che possa essere usato anche da chi, *per la prima volta*, si trovi ad affrontare il problema del progetto digitale, ma che lo guidi poi attraverso problemi mano a mano più sofisticati e complessi. Un libro che non raggiunga però il livello di complessità e dettaglio di corsi di dottorato per i quali esistono già affermati libri di riferimento più volte citati anche in questo testo.

Sarebbe poi assurdo ignorare che oggi una gran parte del progetto digitale viene realizzata servendosi di strumenti di progettazione automatica: i vari *tool CAD* (*Computer Aided Design*) offerti dai diversi produttori del settore *EDA* (*Electronic Design Automation*). Ci è sembrato quindi fondamentale collegare continuamente la teoria con la possibilità di sperimentazione pratica basata su strumenti automatici di progettazione. Questo aspetto è abbastanza innovativo ed è uno dei contributi principali che il libro vuole fornire alla didattica italiana sulla progettazione digitale. Si è scelto di mantenersi il più possibile svincolati dagli aspetti tecnologici del progetto per non fare riferimento a specifici strumenti commerciali di progettazione e di utilizzare, ove possibile, strumenti di dominio pubblico. Tutte le informazioni per organizzare laboratori didattici di progettazione digitale sono reperibili nella pagina

Web del libro <http://www.ateneonline.it/fummi> dove sono presenti anche supporti per l'utilizzo del libro in aula.

Desideriamo ringraziare i numerosi colleghi che hanno fornito informazioni, suggerimenti e indicazioni durante la stesura di questo libro. In particolare i professori Negrini, Stefanelli, Salice, Sciuto, Bolchini e il dottor Fin.

*Gli Autori*