

Apunts d'Arquitectura de Computadors

Carles Company Soler

17 de juny de 2003

Índex

I	Processadors Aritmètics	1
1	Introducció i sistemes de representació	3
1.1	Nivells de descripció formal	3
1.2	Sistemes de representació de números	3
1.2.1	Definicions	3
1.2.2	Classificació dels sistemes de numeració	4
1.2.3	Sistemes ponderats	4
2	Representació i suma de naturals	5
2.1	Representació i interpretació	5
2.2	Suma de naturals	5
2.3	Implementació de la suma	5
2.3.1	Sumador d'un bit	6
2.3.2	Sumador de n bits	7
2.4	Anticipació de carry	8
2.4.1	Propagació de carry	9
2.4.2	Sumador fent servir CLA	9
2.5	Suma ràpida	9
3	Representació i operacions amb enters	11
3.1	Introducció	11
3.2	Sistemes complementats	11
3.2.1	Complement a la base	12
3.2.2	Complement a la base disminuïda	13
3.2.3	Mapeig directe	13
3.2.4	Suma	13
3.2.5	Canvi de signe	14
3.2.6	Resta	15
3.3	Signe i magnitud	15
3.3.1	Suma en SiM	15
4	Representació i operacions de reals	17
4.1	Punt fixe	17
4.2	Punt flotant	17
4.2.1	Mantissa normalitzada	18
4.2.2	IEEE754	18
4.2.3	Suma i resta	19
4.2.4	Multiplicació en punt flotant	20

II	Segmentació i processadors segmentats	21
5	Introducció	23
5.1	Problemes	23
5.2	Definicions	23
6	Rendiment	25
6.1	Velocitat de la CPU	25
6.1.1	Mètriques comercials	26
7	Processadors segmentats	27
7.1	Arquitectura d'exemple DLX	27
7.2	Segmentació en etapes	28
7.3	Riscos estructurals	29
7.3.1	Solucions	29
7.4	Risc de dades	30
7.4.1	Tipus de dependències	30
7.5	Curtcircuits	31
7.6	Operacions Multicicle	31
III	Apendix	33
A	Consideracions finals	35
B	GNU Free Documentation License	37
B.1	APPLICABILITY AND DEFINITIONS	37
B.2	VERBATIM COPYING	39
B.3	COPYING IN QUANTITY	39
B.4	MODIFICATIONS	40
B.5	COMBINING DOCUMENTS	41
B.6	COLLECTIONS OF DOCUMENTS	41
B.7	AGGREGATION WITH INDEPENDENT WORKS	42
B.8	TRANSLATION	42
B.9	TERMINATION	42
B.10	FUTURE REVISIONS OF THIS LICENSE	42

Part I

Processadors Aritmètics

Capítol 1

Introducció i sistemes de representació

1.1 Nivells de descripció formal

A l'hora de treballar amb números tenim diferents maneres de fer-ho. A **nivell abstracte** treballem sobre conjunts de números, operacions (vistes com a funcions sobre parells de números) i propietats sobre aquests números. A **nivell d'algorisme aritmètic** tenim vectors de dígit: $x \in Z \leftrightarrow X \in Z^n (X_{n-1}, X_{n-2}, \dots, X_0)$ i algorismes que operen sobre aquests vectors. A **nivell d'implementació** treballarem sobre la codificació de vectors de bits, descripció d'operacions RTL¹ i senyals al hardware.

1.2 Sistemes de representació de números

1.2.1 Definicions

Representació digital: És un vector de dígit.

$$X = (X_{n-1}, X_{n-2}, \dots, X_1, X_0) \quad (1.1)$$

Sistema de numeració: És el sistema que ens passa del número simbòlic a la seva representació.

Conjunt de valors dels dígit: D_i és el conjunt de valors de X_i . $X_i \in D_i$. $|D_i|$: Número de valors de X_i . Exemple (sistema decimal):

$$D_i = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\} \quad (1.2)$$

$$|D_i| = 10 \quad (1.3)$$

Regla d'interpretació: És una funció que fa el mapeig entre el vector de dígit i els números abstractes.

Rang: És el conjunt de valors representables amb n dígit.

$$k = \prod_{i=0}^{n-1} |D_i| \quad (1.4)$$

¹RTL: Register Transfer Language - Llenguatge de transferència de registres.

1.2.2 Classificació dels sistemes de numeració

Tenim diverses maneres de classificar els sistemes de numeració. En aquest apartat en veurem algunes.

Redundants o no redundants

Un sistema de numeració és no redundant quan tot vector de dígit representa un únic valor. Si $X \neq Y \Rightarrow x \neq y$. Un sistema és redundant quan els valors poden ser representats per més d'un vector de dígit. Per exemple, podríem tenir un sistema pseudo-romà on el número 5 pogués estar representat per V o per IIII.

Ponderats o no ponderats

Un sistema de numeració és ponderat (o posicional) quan el valor d'un dígit depèn de la posició (e.g.: el sistema decimal). Un sistema és no ponderat quan el pes d'un dígit no depèn de la posició (e.g.: sistema romà).

Canònics o no canònics

Un sistema de numeració és canònic quan $D_i = \{0, 1, \dots, |R_i| - 1\}$. És no canònic quan no és així, e.g.: $D_i = \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$.

1.2.3 Sistemes ponderats

Donat un número x amb representació $X = (X_{n-1}, \dots, X_0)$. La regla de interpretació és:

$$x = X_e = \sum_{i=0}^{n-1} X_i \times w_i \quad (1.5)$$

on X_e és el valor explícit. Podem tenir sistemes:

- Sense base: w_i no depèn de res.
- Amb base: w_i depèn d'una base.

Sistemes amb base

Quan tenim un sistema amb base tendrem un vector de bases $R = (R_{n-1}, \dots, R_0)$. Amb aquest vector es pot calcular el pes de cada dígit: $w_0 = 1$, $w_i = w_{i-1} \times R_{i-1}$. Per tant:

$$w_i = \prod_{j=0}^{i-1} R_j \quad (1.6)$$

Un exemple de sistema de numeració amb bases diferents és el sistema de les hores. També podem tenir base fixa quan tots els $R_i = r$. Llavor: $w = (r^{n-1}, r^{n-2}, \dots, r^1, r^0)$

Capítol 2

Representació i suma de naturals

2.1 Representació i interpretació

Representarem els números naturals així:

$$x = X_e = \sum_{i=0}^{n-1} X_i \cdot r^i \quad (2.1)$$

Emprarem un sistema ponderat amb base fixa i positiva. El vector de dígitos és $x = (x_{n-1}, \dots, x_0)$, on $x_i = \{0, 1, \dots, |r| - 1\}$. El rang que tendrem és $k \rightarrow 0 \leq x \leq r^n - 1$.

2.2 Suma de naturals

Donats dos números $x \rightarrow X = (X_{n-1}, \dots, X_0)$ i $y \rightarrow Y = (Y_{n-1}, \dots, Y_0)$. Sumarem així: $s = x + y \Rightarrow S = ADD(X, Y) = (S_{n-1}, S_{n-2}, \dots, S_0)$. Si el rang de S és igual al rang de X i Y hi pot haver desbordament. En concret, x i y han de ser menors que r^n i s ha de ser menor que r^n . Tenint en compte això, la suma ens quedarà així:

$$S_e = (X_e + Y_e) \bmod r^n \quad (2.2)$$

i hi haurà desbordament quan $x + y \geq r^n$ o quan $\left\lfloor \frac{(X_e + Y_e)}{r^n} \right\rfloor \neq 0$.

2.3 Implementació de la suma

A l'hora de sumar, sumarem representacions. $s_i = (x_i + y_i + c_i) \bmod r$. Si $S_i = X_i + Y_i \geq r$ llavors $C_{i+1} = \left\lfloor \frac{(X_i + Y_i)}{r} \right\rfloor$.

Operació modular: Despreciarem S_n i S_e ens quedarà així: $S_e = (X_e + Y_e) \bmod r^n$.

Desbordament: Si $C_n = 1$ llavors hi ha desbordament.

$$\begin{array}{ccccccc}
 C_n & C_{n-1} & C_{n-2} & \dots & C_1 & & \\
 & X_{n-1} & X_{n-2} & \dots & X_1 & & \\
 X_0 & & & & & & \\
 & Y_{n-1} & Y_{n-2} & \dots & Y_1 & & \\
 Y_0 & & & & & & \\
 \hline
 S_n & S_{n-1} & S_{n-2} & \dots & S_1 & & \\
 S_0 & & & & & &
 \end{array}$$

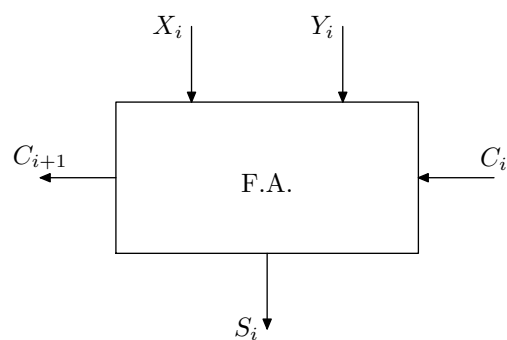


Figura 2.1: Full adder

2.3.1 Sumador d'un bit

Full adder

Al Full-Adder $S_i = (X_i + Y_i + C_i) \bmod 2$ i $C_{i+1} = \left\lfloor \frac{(X_i + Y_i + C_i)}{2} \right\rfloor$. La taula de veritat quedaria així:

X_i	Y_i	C_i	C_{i+1}	S_i
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

Half adder

El half adder és com un full adder que no té en compte el carry d'entrada:

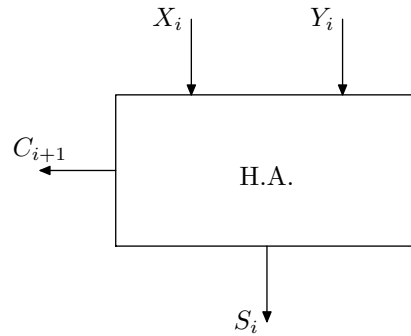


Figura 2.2: Half adder

La seva taula de veritat és:

X_i	Y_i	S_i	C_{i+1}
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

I les funcions lògiques que l'implementen són: $S_i = X_i \oplus Y_i$ i $C_{i+1} = X_i \cdot Y_i$:

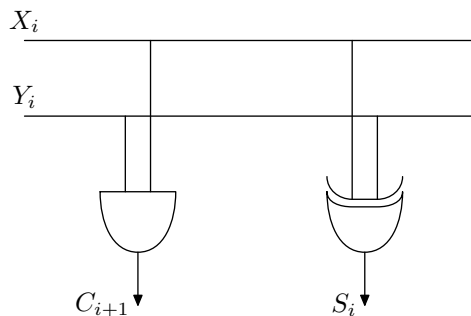


Figura 2.3: Implementació d'un Half adder.

Full adder a partir d'un half adder

Es pot fer un full adder usant dos half adders i una porta XOR. El full adder resultant té 5 portes; el camí crític passa per 3 portes, per tant tarda $3 \cdot \tau$.

2.3.2 Sumador de n bits**Implementació amb registres de desplaçament**

Es pot fer un sumador d'n bits usant registres de desplaçament per sumar els bits un a un.

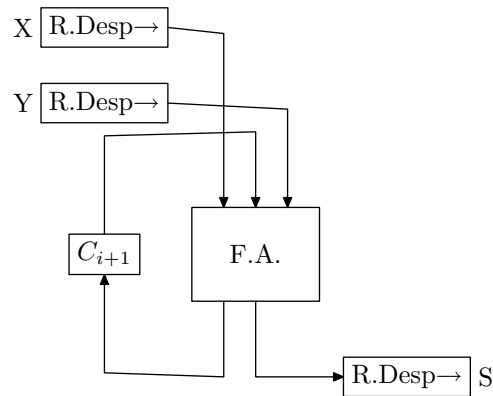


Figura 2.4: Sumador amb registres de desplaçament.

Usam un biestable per a guardar el carry que usarem en la suma del bit següent. Necessitarem un rellotge per a sincronitzar els registres. EL retard d'aquest circuit és $T = (3 \cdot \tau + \tau_D) \cdot n$. On τ_D és el temps del biestable.

Implementació paral·lela

Aquest sistema es diu CPA¹. Consisteix en encadenar n sumadors, encadenant les entrades i sortides dels carrys.

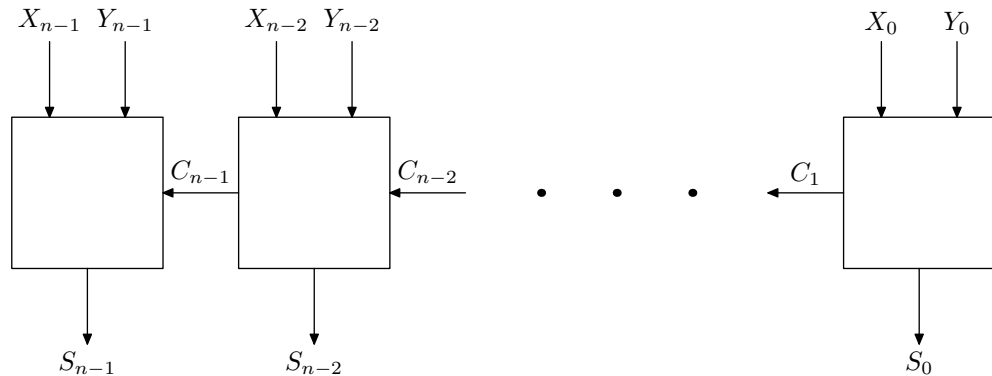


Figura 2.5: Carry Propagate Adder

Aquest tendrà un retard $T = 3 \cdot \tau \cdot n$.

2.4 Anticipació de carry

Com que gran part del retard ve a que hem d'esperar que el carry es propagui, podem provar de reduir aquest temps usant algunes tècniques. El que podem intentar fer és construir un circuit que ens calculi els carrys anticipadament. Aquest circuit s'anomena CLA². El carry es genera quan $X_i + Y_i \geq r$ i sempre $C_{i+1} \in \{0, 1\}$.

¹CPA: Carry Propagate Adder – Sumador de propagació de carry.

²CLA: Carry Look-Ahead – Anticipador de carry.

2.4.1 Propagació de carry

El carry es propaga quan $r = 2 \cdot X_i + Y_i = r - 1$:

X_i	Y_i	C_{i+1}	S_i	
0	0	0	0	Absorbeix ($G_i = X_i \cdot Y_i$)
0	1	0	1	Propaga ($P_i = X_i \oplus Y_i$)
1	0	0	1	Propaga ($P_i = X_i \oplus Y_i$)
1	1	1	0	Absorbeix ($G_i = X_i \cdot Y_i$)

I així calculam que:

$$C_{i+1} = G_i + P_i \cdot C_i \quad (2.3)$$

I ens queda que:

$$C_{i+k} = \sum_{n=0}^k \left(G_{i+n-1} \prod_{m=n}^{k-1} P_i + m \right) \quad (2.4)$$

Com que el circuit resultant només té dos nivells el retard serà $T = 2 \cdot \tau$.

2.4.2 Sumador fent servir CLA

Fent servir un CLA la suma ens quedaria així:

$$S_i = X_i \oplus Y_i \oplus C_i = P_i \oplus C_i \quad (2.5)$$

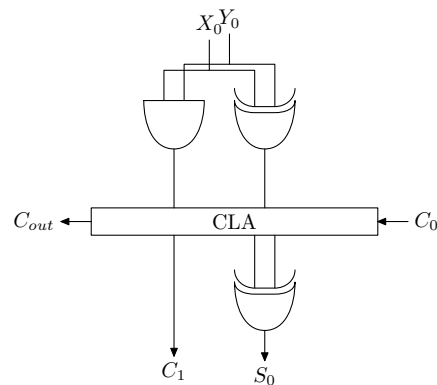


Figura 2.6: Sumador amb CLA.

Hem d'afegir al CLA n circuits sumadors com els que hi ha a la figura. Aquest circuit tardarà $T = 4 \cdot \tau$.

2.5 Suma ràpida

Hi ha altres mètodes d'accelerar la suma de naturals:

- CLA.
- Carry Skip Adder.

- Carry Select Adder.
- ...

Capítol 3

Representació i operacions amb enters

3.1 Introducció

Per a poder representar els enters en una cadena de bits, hem de poder mapejar-los sobre els naturals. Hi ha diverses maneres de fer això:

Mapeig directe: Mapejam directament els enters sobre un vector de números:

$$\begin{aligned} f : z &\longrightarrow N^n \\ x &\longrightarrow X = (X_{n-1}, \dots, X_0) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Mapeig indirecte: Es fa una doble aplicació, primer sobre els naturals i després sobre vectors de números:

$$X_e = \sum_{i=0}^{n-1} x_i \cdot r^i \quad (3.2)$$

Sistemes complementats: S'usen sobretot per a aritmètica entera.

Signe i magnitud: S'usa sobretot per a càlculs sobre \mathbb{R} en punt flotant.

Excés o polaritat: També s'usa per a càlculs sobre \mathbb{R} .

3.2 Sistemes complementats

Els sistemes complementats s'usen molt per a aritmètica entera. És el que usarem més per a càlculs en circuits lògics. Funciona bàsicament així:

$$X_e = X \pmod{C} \quad (C > 0) \quad (3.3)$$

$$X_e = \begin{cases} X & \text{si } X > 0. \\ X + C & \text{si } X < 0. \end{cases} \quad (3.4)$$

$$X = \begin{cases} X_e & \text{si } X_e < \frac{C}{2}. \\ X_e - C & \text{si } X_e \geq \frac{C}{2}. \end{cases} \quad (3.5)$$

$$(3.6)$$

Si C és parell $\rightarrow C/2$ és representable \rightarrow Tenim asimetria.

Si C és senar $\rightarrow C/2$ no és representable:

- Tenim simetria.
- Tenim una doble representació del 0.

Com que X_e és de base fixa, canònic i amb $r > 0$, tenim que $0 \leq X_e \leq r^n - 1$. Llavors $C \leq r^n$.

$C = r^n$: Complement a la base.

si $r = 2$: Complement a 2.

$C = r^n - 1$: Complement a la base disminuïda.

si $r = 2$: Complement a 1.

3.2.1 Complement a la base

Per a calcular el complement a la base tenim:

$$C = r^n \quad 0 \leq X_e \leq r^n \quad (3.7)$$

$$X_e = \begin{cases} X & \text{si } X \geq 0. \\ X + r^n & \text{si } X < 0. \end{cases} \quad (3.8)$$

$$X = \begin{cases} X_e & \text{si } X_e < \frac{r^n}{2}. \\ X_e - r^n & \text{si } X_e \geq \frac{r^n}{2}. \end{cases} \quad (3.9)$$

El rang que ens queda és:

$$-\frac{r^n}{2} \leq x \leq \frac{r^n}{2} - 1 \quad (3.10)$$

Exemple

$$r = 2, n = 4, C = 2^4 = 16.$$

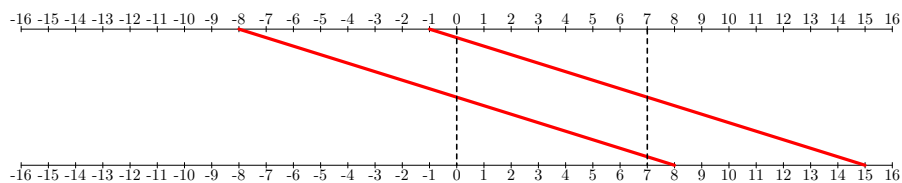


Figura 3.1: Mapeig dels nombres en complement a 2.

3.2.2 Complement a la base disminuïda

En base disminuïda tenim que $C = r^n - 1$, i per tant, tenim que:

$$X_e = X \pmod{r^n - 1} \quad (3.11)$$

$$X_e = \begin{cases} X & \text{si } X \geq 0. \\ X + r^n - 1 & \text{si } X < 0. \end{cases} \quad (3.12)$$

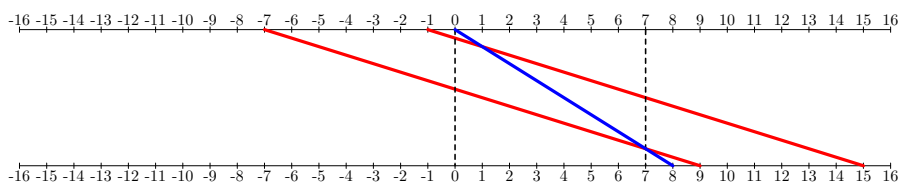


Figura 3.2: Complement a 1.

3.2.3 Mapeig directe

El mapeig directe del complement a 2 es fa així:

$$x = \begin{cases} X_e & \text{si } X_{n-1} = 0. \\ X_e - 2^n & \text{si } X_{n-1} = 1. \end{cases} \quad (3.13)$$

$$x = -X_{n-1} \cdot 2^{n-1} + \sum_{i=0}^{n-2} x_i \cdot 2^i \quad (3.14)$$

3.2.4 Suma

El nostre objectiu és $s = x + y$, on x i y són enters. La suma es fa així:

$$\begin{aligned} \mathbb{Z} &\longrightarrow \mathbb{N} \longrightarrow \mathbb{N}^n \\ s &\longrightarrow S_e \longrightarrow S \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} S_e &= S \pmod{C} = (x+y) \pmod{C} = \\ &= ((x \pmod{C}) + (y \pmod{C})) \pmod{C} \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$S_e = (X_e + Y_e) \pmod{C} \quad (3.17)$$

$$S_e = S'_e \pmod{C} \quad (3.18)$$

$$S'_e \pmod{C} = \begin{cases} S'_e & \text{si } S'_e < C. \\ S'_e - C & \text{si } S'_e \geq C. \end{cases} \quad (3.19)$$

Suma en complement a 2

En complement a dos, la suma és una simple suma de naturals. Això es degut a que quan feim el mòdul només despreciam S'_n . Només podem tenir OVERFLOW quan sumem nombres del mateix signe.

$$-2^n \leq x + y \leq 2^n - 2 \quad (3.20)$$

La funció de overflow és:

$$Overflow = X_{n-1} \cdot Y_{n-1} \cdot \overline{S_{n-1}} + \overline{X_{n-1}} \cdot \overline{Y_{n-1}} \cdot S_{n-1} \quad (3.21)$$

Suma en complement a 1

En complement a 1, es fa igual que en complement a 1 pero si és negatiu se li suma 1.

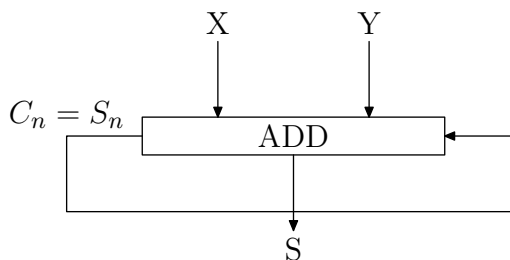


Figura 3.3: Sumador en Ca-1.

3.2.5 Canvi de signe

El canvi de signe es fa a partir de les següents fórmules:

$$Z = -x \quad (3.22)$$

$$Z_e = Z \pmod{C} \quad (3.23)$$

$$Z_e = (C - X_e) \pmod{C} \quad (3.24)$$

Canvi de signe en complement a 1

$$\begin{cases} Z_i = 1 & \text{si } x_i = 0. \\ Z_i = 0 & \text{si } x_i = 1. \end{cases} \quad (3.25)$$

$$Z_e = \overline{X_e} \quad (3.26)$$

En aquest cas no hi ha OVERFLOW perquè és una representació simètrica.

Canvi de signe en complement a 2

En complement a dos el canvi de signe es fa igual que complement a 1 però sumant 1 al resultat:

$$Z_e = \overline{X_e} + 1 \quad (3.27)$$

L'OVERFLOW és igual a $X_{n-1} \cdot Z_{n-1}$.

3.2.6 Resta

Per a fer la resta simplement negam el segon número i sumem:

$$Z = X - Y = X + (-Y) \quad (3.28)$$

3.3 Signe i magnitud

En signe i magnitud (SiM), el primer bit representa el signe i la resta el valor absolut del número. El bit de signe és 0 si el número és positiu i 1 si és negatiu.

$$X_e = \begin{cases} x & \text{si } x \geq 0. \\ r^{n-1} - x & \text{si } x < 0. \end{cases} \quad (3.29)$$

$$x = \begin{cases} X_e & \text{si } X_e \leq r^{n-1}. \\ r^{n-1} - X_e & \text{si } X_e > r^{n-1}. \end{cases} \quad (3.30)$$

És un sistema redundant perquè el zero té doble representació. El rang és: $-r^{n-1} + 1 \leq x \leq r^{n-1} - 1$.

3.3.1 Suma en SiM

Capítol 4

Representació i operacions de reals

4.1 Punt fixe

En punt fixe els díigits tenen un pes predeterminat:

$$X_e = X_{n-1}X_{n-2}\dots X_0.X_{-1}\dots X_{-n} \quad (4.1)$$

I el se valor es calcula com a:

$$X = \sum_{i=-n}^{n-1} x_i \cdot 2^i \quad (4.2)$$

Per representar els negatius es fa en signe i magnitud.

Exemple

Pas de base 10 a base 2:

$$17.375 = 10001.011$$

4.2 Punt flotant

- Adequada per a números grans i petits.
- Basat en la notació científica:
 - Signe (+/-).
 - Mantissa.
 - Exponent $e \in [e_{min}, e_{max}] \subset \mathbb{Z}$.
 - Base implícita.

$$X = \pm \left(\sum_{i=1}^t a_i \cdot b^{-i} \right) \times b^e \quad (4.3)$$

4.2.1 Mantissa normalitzada

La mantissa normalitzada evita la redundància. Consisteix en que sempre el bit de més pes val 1 i normalment no es posa (bit amagat).

$$X = \pm 1.frac \times 2^{\pm ee} \quad (4.4)$$

4.2.2 IEEE754

L'IEEE754 és l'estandar que ens defineix els números en punt flotant. Perquè es va definir aquest estandar?

- Compatibilitat de resultats.
- llibreries numèriques optimitzades.
- Possibles resultats diferents si no s'estandaritza.

Descripció

- Continuació d'operacions si excepció: p.e.: $\sqrt{-5}$.
 - El resultat serà de tipus NaN (Not a Number).
 - Operació sobre NaN \implies Resultat: NaN.
 - Les excepcions són via software.
- Valors especials per $+\infty$ i $-\infty$.
- Defineix 4 formes d'arrodonir, en cas que el nombre sigui no representable.
- Defineix 4 formats:
 - Simple precisió (32 bits).
 - Doble precisió (64 bits).
 - Simple precisió extesa.
 - Doble precisió extesa.

Simple precisió

En simple precisió els 32 bits es distribueixen així: 1 bit per el signe, 8 bits per l'exponent i 23 bits per la mantissa. L'exponent es representa en excés:

$$X_e = X + 127 \quad (4.5)$$

$$-127 \leq EXP \leq 128 \quad (4.6)$$

La mantissa es representa com a 1.fraccio, per tant:

$$1 \leq mantissa < 2 \quad (4.7)$$

El valor del nombre vendrà donat per:

$$N = (-1)^S \times 1.frac \times 2^{EXP-127} \quad (4.8)$$

EXP	FRAC	NUM?
0	0	0
0	$\neq 0$	Numero abnormal (No normalitzats).
Màxim	0	$\pm\infty$
Màxim	$\neq 0$	NaN

Taula 4.1: Números especials.

Rang i marge de representació

Simple precisió Per a simple precisió tenim 23 bits de mantissa, 8 bits d'exponent i 1 bit de signe, per tant:

$$N_{max} \rightarrow \simeq 2^{128} \simeq 3.402 \times 10^{38} \quad (4.9)$$

$$N_{min} \rightarrow \simeq 2^{-126} \simeq 1.175 \times 10^{-38} \quad (4.10)$$

$$Precisi \simeq 7 - 8 \text{ dígits.} \quad (4.11)$$

Doble precisió Per a doble precisió tenim 52 bits de mantissa, 11 bits d'exponent i 1 bit de signe, per tant:

$$N_{max} \rightarrow \simeq 2^{1024} \simeq 1.797 \times 10^{308} \quad (4.12)$$

$$N_{min} \rightarrow \simeq 2^{-1022} \simeq 2.225 \times 10^{-308} \quad (4.13)$$

$$Precisio \simeq 16 - 17 \text{ dígits.} \quad (4.14)$$

Errors

Error màxim absolut:

$$\Delta x = \frac{1}{2} 2^{(-m)} \cdot 2^{EXP} \quad (4.15)$$

Error relatiu:

$$\frac{\Delta x}{num} = \frac{1}{2} 2^{(-m)} \quad (4.16)$$

4.2.3 Suma i resta

1. Alinear mantisses (posar el mateix exponent).
2. Sumar mantisses.
 - Arrodonir si no representable.
3. Normalitzar i arrodonir.

Algorisme de suma i resta

$$\pm m_1 \times 2^{e_1} \text{ op } \pm m_2 \times 2^{e_2} \Rightarrow m \times 2^e \quad (4.17)$$

$$m_i = 1.p_i \quad (4.18)$$

1. Si $e_1 < e_2$ intercanviar operands. $d = e_1 - e_2 \geq 0$ i $e = e_1$.
2. Desplaçar m_2 d bits a la dreta (alinear mantisses), activant G, R i S.

3. Sumar/restar les mantisses (sumador SiM de $m + 3$ bits).
4. Test valors especials:
 - Si zero** Codificar 0; goto 9;
 - Si overflow mantissa** goto 5a;
 - Si k+1 bits a zero a major pes** goto 5b;
5. (a) Desplaçar mantissa 1 bit cap a la dreta, sumar 1 a l'exponent. goto 6;
(b) Desplaçar k bits a l'esquerra, restar k a l'exponent. goto 6;
6. Arrodonir (overflow de la mantissa).
7. Normalitzar de nou si cal.
8. Fer test de casos especials overflow/underflow exponent.
9. Fer test de valors especials dels resultats.

4.2.4 Multiplicació en punt flotant

Els passos a seguir són:

- Multiplicar mantisses.
- Sumar exponent.
- Normalitzar.

L'algorisme emprat és:

1. Multiplicar mantisses i sumar exponents.
2. Test de casos especials \Rightarrow Normalitzar.
3. Arrodonir.
4. Test overflow mantissa \Rightarrow Normalitzar.
5. Test casos esecials de l'exponent.
6. Test valors especials del resultat.

Part II

Segmentació i processadors segmentats

Capítol 5

Introducció

La segmentació és una tècnica per a solapar l'execució de múltiples instruccions. Es podria veure com la cadena de montatge d'un automòbil, en que un cotxe tarda X temps en ser construït, però cada unitat de temps en surten molts més que $\frac{1}{X}$.

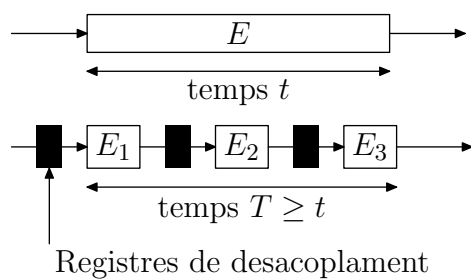


Figura 5.1: Exemple de segmentació

5.1 Problemes

- Dependència de les dades.
- Risc estructural. Quan empram un recurs dos cops hi poden haver conflictes.

5.2 Definicions

Latència d'una operació: Temps desde que comença fins que acaba l'operació.

Latència de repetició: Cada quant podem llançar una operació.

Latències permeses: Latències en les que podem llançar una operació.

Latències no permeses: Latències en les que no podem llançar una operació.

Capítol 6

Rendiment

Quan mesurem el rendiment d'un processador, com a usuaris, ens interessa:

- Temps de resposta.
- Temps de execució.
- Temps de CPU.

El THROUGHPUT és el nombre de instruccions executades per unitat de temps. Aquest paràmetre es vol maximitzar.

6.1 Velocitat de la CPU

Un dels paràmetres més importants a l'hora de mesurar el rendiment és el temps de CPU. Molts cops els fabricants de processadors ens donen dades incompletes o incorrectes per a vendre millor els seus productes. Ara veurem quina és la millor manera de mesurar-lo.

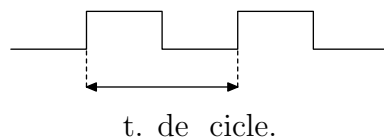


Figura 6.1: Cicle d'un processador.

La freqüència del processador es mesura com a:

$$Freq(Hz) = \frac{1}{t.cicle} \quad (6.1)$$

El que volem minimitzar és TCPU, que és:

$$TCPU = \text{instruccions executades} \times \text{cicles per instrucció} \times Tcicle \quad (6.2)$$

Els CPI¹ són molt difícils de mesurar els calculem estadísticament:

$$T_{CPU} = \left(\sum_{i=1}^n CPI_i \cdot I_i \right) \cdot T_C \quad \text{on } n \equiv \text{instruccions diferents.} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} CPI &= \sum_{i=1}^n \frac{CPI_i \cdot I_i}{I} \\ &= \sum_{i=1}^n CPI_i \cdot P_i \end{aligned} \quad (6.4)$$

6.1.1 Mètriques comercials

Les mesures que més s'usen comercialment són:

Freqüència: Mesurada en *Mhz* o *Ghz*.

MIPS: Milions d'instruccions per segon.

$$MIPS = \frac{\text{freq Mhz}}{CPI} \quad (6.5)$$

Només serveix per a comparar màquines diferents amb el mateix compilador i lleguatge màquina.

MFLOPS: Milions d'operacions en punt flotant per segon. Depèn molt del tipus de processador. És millor que les anteriors, però té l'inconvenient de que no totes les operacions en punt flotant tenen el mateix pes.

MFLOPS normalitzats: És el mateix però posant pesos a les operacions.

Generalment els fabricants donen la velocitat pic o els MIPS pic. Ens donen el màxim teoric que pot anar la màquina.

Exemple

Supercomputador	MFLOPS	Perfect-club
CRAY XMP	940	14.8
IBM 390	800	8.3
NEC SX/2	1300	16.6

Taula 6.1: Comparació dels MFLOPS d'alguns supercomputadors.

¹Cicles Per Instrucció

Capítol 7

Processadors segmentats

Quan segmentam un processador s'ha de garantir que es respecti el funcionament del programa principal. Si el programa principal primer llegeix i després escriu, hem de mantenir l'ordre.

El nostre objectiu és disminuir el temps d'execució. Com que $T_{CPU} = N \cdot CPI \cdot T_{cicle}$...

Però s'ens presenten una sèrie de riscos:

- Riscos estructurals.
- Riscos de dades.
- Riscos de control.

Un processador segmentat lineal és aquell processador en el que les diferents etapes es fan en ordre:

1. Búsqueda instrucció.
2. Inici execució.
3. Final instrucció.

7.1 Arquitectura d'exemple DLX

Aquesta arquitectura que emprarem en els exemples és semblant a la que usam en la pràctica. És una arquitectura on totes les operacions excepte les de `load` i `store` es fan per registre. Les operacions que té són:

- `OP Rd, Rf, Rf2` \equiv `Rd` ← `Rf` OP `Rf2`
- `load Rd, R1, R2` \equiv `Rd` ← `M[R1+R2]`
`load Rd, R1, con` \equiv `Rd` ← `M[R1+con]`
`store R1, con, Rd` \equiv `M[R1+con]` ← `Rd`
- `jmp cond, Rf, con` \equiv si `cond(Rf)` → `PC=PC+con`
 - `cond=BEQZ` → Saltar si `Rf=0`.
 - `cond=BNEZ` → Saltar si `Rf≠0`.

7.2 Segmentació en etapes

Aquest tipus de segmentació es basa en dividir les operacions en etapes, de manera que podem solapar-les. La segmentació es faria així:

- Instrucció aritmètica: 4 etapes.
 - Búsqueda.
 - Decodificació / Lectura Registres. (D/L).
 - Operació (ALU).
 - Escriptura.
- Load: 5 etapes.
 - Búsqueda.
 - D/L.
 - Càlcul @ efectiva (ALU).
 - Accés a memòria.
 - Escriptura Registre.
- Store: 4 etapes.
 - Búsqueda.
 - D/L.
 - Càlcul @ efectiva (ALU).
 - Accés a memòria.
- Salt: 3 etapes.
 - Búsqueda.
 - D/L.
 - Evaluar Condició / Càlcul @ destí.

En tot cas ens quedarien 5 etapes: búsqueda, decodificació i lectura de registres, ALU, memòria i escriptura de registres.



Figura 7.1: Etapes del processador d'exemple.

Hi hauria altres “pipelines” possibles, però alomillor necessitariem hardware adicional.

7.3 Riscos estructurals

Aquest tipus de riscos es donen quan dues instruccions intenten accedir a un mateix recurs al mateix temps. Com que ara les instruccions es solapen, aquest cas es pot donar bastant sovint.

1. Instruccions que usen els mateixos recursos.
2. Instruccions que intenten accedir a memòria el mateix cicle.
3. Unitats funcionals no segmentades.

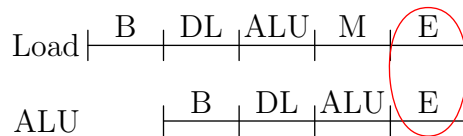


Figura 7.2: Instruccions que usen els mateixos recursos.

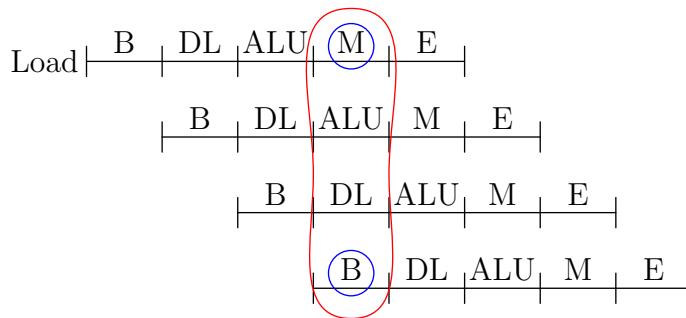


Figura 7.3: Instruccions que intenten accedir a memòria el mateix cicle.

7.3.1 Solucions

Tenim algunes solucions per aquest problema:

1. Bloquejar la màquina. Funciona sempre però no és molt bona perquè augmenta el CPI.
2. Modificar el pipeline¹.
3. Replicar recursos:
 - (a) Necessitem diversos camins al banc de registres.
 - (b) 2 camins a memòria:
 - 2 Memòries (car).
 - 2 caches: una per instruccions i una per dades,
4. Segmentar unitats funcionals.

¹El pipeline és així com està segmentat el processador.



Figura 7.4: Exemple de bloqueig.

7.4 Risc de dades

Hi pot haver RISC DE DADES quan l'ordre d'accés als operands (lectura/escriptura) es modifica respecte al programa seqüencial:

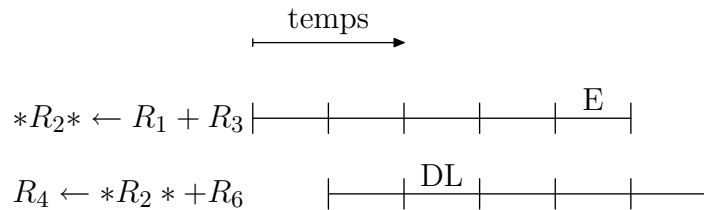


Figura 7.5: Risc de dades.

Basicament, el risc de dades es dona quan hi ha dependència d'operands en instruccions pròximes

7.4.1 Tipus de dependències

Donada una instrucció i , el domini (D_i) són els operands font i el rang (R_i) és el resultat.

- RAW (Read After Write): Es dona quan $R_i \cap D_j \neq \emptyset$. És una dependència de fluxe, perquè per solucionar-ho s'ha de bloquejar.

$$i : _R1_ \leftarrow R2 + R3 \quad (7.1)$$

$$j : R5 \leftarrow _R1_ * R3 \quad (7.2)$$

- WAR (Write After Read): Es dona quan $D_i \cap R_j \neq \emptyset$. També s'anomenen antidependències.

$$i : R2 \leftarrow _R1_ + R3 \quad (7.3)$$

$$j : _R1_ \leftarrow R5 * R3 \quad (7.4)$$

- WAW (Write After Write): Quan $R_i \cap R_j \neq \emptyset$. També s'anomenen dependències de sortida.

$$i : _R1_ \leftarrow R2 + R3 \quad (7.5)$$

$$j : _R1_ \leftarrow R5 * R3 \quad (7.6)$$

- RAR (Read After Read): Es dona quan $D_i \cap D_j \neq \emptyset$. També s'anomenen dependències d'entrada, però no són realment dependències perquè són intercanviables.

Les dependències WAR i WAW són eliminables renombrant registres (utilitzem un **nou** registre). Això es fàcil quan tenim una seqüència lineal, però en bucles es complica.

Per a les dependències de fluxe RAW la solució és el bloqueig, però de vegades reordenant les instruccions ja en tenim prou.

7.5 Curtcircuits

Els curtcircuits són camins de les etapes productores de dades a les etapes consumidores de dades. Es podrien veure com a draceres.

- Etapes Generadores:
 - ALU (op)
 - Mem (load)
- Etapes Consumidores:
 - Alu (op, @efectiva mem)
 - Mem (store)

Per exemple, si una etapa necessita una dada que s'està calculant no s'ha d'esperar a que l'escriguin al banc de registres, si no que en acabar de calcular-la es passarà directament a l'etapa que la necessita.

7.6 Operacions Multicicle

Quan fem operacions en punt flotant no és bó exigir que les operacions durin un sol cicle. Això exigiria que el cicle durés molt, ja que les operacions en punt flotant duren molt més que les operacions enteres. Això es pot sol·lucionar usant diverses *unitats funcionals*:

- Unitat principal (enters).
- Multiplicador en punt flotant i enter.
- Sumador en punt flotant.
- Divisor en punt flotant i enter.

Part III
Apendix

Apèndix A

Consideracions finals

Aquest document ha estat escrit usant \LaTeX 2 ϵ , usant METAPOST per a la realització de les figures. Declin tota responsabilitat sobre lo que hi posa. El codi font està a la meva pàgina web: <http://www.companysoler.com> a la secció d'apunts. Aquests apunts es regeixen per la llicència LGPL que està a l'apèndix B (pàgina 37).

©Carles Company Soler, 2003

Apèndix B

GNU Free Documentation License

Version 1.2, November 2002

Copyright © 2000,2001,2002 Free Software Foundation, Inc.
59 Temple Place, Suite 330, Boston, MA 02111-1307 USA
Everyone is permitted to copy and distribute verbatim copies of this license document, but changing it is not allowed.

PREAMBLE

The purpose of this License is to make a manual, textbook, or other functional and useful document “free” in the sense of freedom: to assure everyone the effective freedom to copy and redistribute it, with or without modifying it, either commercially or non-commercially. Secondly, this License preserves for the author and publisher a way to get credit for their work, while not being considered responsible for modifications made by others.

This License is a kind of “copyleft”, which means that derivative works of the document must themselves be free in the same sense. It complements the GNU General Public License, which is a copyleft license designed for free software.

We have designed this License in order to use it for manuals for free software, because free software needs free documentation: a free program should come with manuals providing the same freedoms that the software does. But this License is not limited to software manuals; it can be used for any textual work, regardless of subject matter or whether it is published as a printed book. We recommend this License principally for works whose purpose is instruction or reference.

B.1 APPLICABILITY AND DEFINITIONS

This License applies to any manual or other work, in any medium, that contains a notice placed by the copyright holder saying it can be distributed under the terms of this License. Such a notice grants a world-wide, royalty-free license, unlimited in duration, to use that work under the conditions stated herein. The “Document”, below,

refers to any such manual or work. Any member of the public is a licensee, and is addressed as “you”. You accept the license if you copy, modify or distribute the work in a way requiring permission under copyright law.

A “Modified Version” of the Document means any work containing the Document or a portion of it, either copied verbatim, or with modifications and/or translated into another language.

A “Secondary Section” is a named appendix or a front-matter section of the Document that deals exclusively with the relationship of the publishers or authors of the Document to the Document’s overall subject (or to related matters) and contains nothing that could fall directly within that overall subject. (Thus, if the Document is in part a textbook of mathematics, a Secondary Section may not explain any mathematics.) The relationship could be a matter of historical connection with the subject or with related matters, or of legal, commercial, philosophical, ethical or political position regarding them.

The “Invariant Sections” are certain Secondary Sections whose titles are designated, as being those of Invariant Sections, in the notice that says that the Document is released under this License. If a section does not fit the above definition of Secondary then it is not allowed to be designated as Invariant. The Document may contain zero Invariant Sections. If the Document does not identify any Invariant Sections then there are none.

The “Cover Texts” are certain short passages of text that are listed, as Front-Cover Texts or Back-Cover Texts, in the notice that says that the Document is released under this License. A Front-Cover Text may be at most 5 words, and a Back-Cover Text may be at most 25 words.

A “Transparent” copy of the Document means a machine-readable copy, represented in a format whose specification is available to the general public, that is suitable for revising the document straightforwardly with generic text editors or (for images composed of pixels) generic paint programs or (for drawings) some widely available drawing editor, and that is suitable for input to text formatters or for automatic translation to a variety of formats suitable for input to text formatters. A copy made in an otherwise Transparent file format whose markup, or absence of markup, has been arranged to thwart or discourage subsequent modification by readers is not Transparent. An image format is not Transparent if used for any substantial amount of text. A copy that is not “Transparent” is called “Opaque”.

Examples of suitable formats for Transparent copies include plain ASCII without markup, Texinfo input format, \LaTeX input format, SGML or XML using a publicly available DTD, and standard-conforming simple HTML, PostScript or PDF designed for human modification. Examples of transparent image formats include PNG, XCF and JPG. Opaque formats include proprietary formats that can be read and edited only by proprietary word processors, SGML or XML for which the DTD and/or processing tools are not generally available, and the machine-generated HTML, PostScript or PDF produced by some word processors for output purposes only.

The “Title Page” means, for a printed book, the title page itself, plus such following pages as are needed to hold, legibly, the material this License requires to appear in the title page. For works in formats which do not have any title page as such, “Title Page” means the text near the most prominent appearance of the work’s title, preceding the beginning of the body of the text.

A section “Entitled XYZ” means a named subunit of the Document whose title either is precisely XYZ or contains XYZ in parentheses following text that translates XYZ in another language. (Here XYZ stands for a specific section name mentioned

below, such as “Acknowledgements”, “Dedications”, “Endorsements”, or “History”.) To “Preserve the Title” of such a section when you modify the Document means that it remains a section “Entitled XYZ” according to this definition.

The Document may include Warranty Disclaimers next to the notice which states that this License applies to the Document. These Warranty Disclaimers are considered to be included by reference in this License, but only as regards disclaiming warranties: any other implication that these Warranty Disclaimers may have is void and has no effect on the meaning of this License.

B.2 VERBATIM COPYING

You may copy and distribute the Document in any medium, either commercially or noncommercially, provided that this License, the copyright notices, and the license notice saying this License applies to the Document are reproduced in all copies, and that you add no other conditions whatsoever to those of this License. You may not use technical measures to obstruct or control the reading or further copying of the copies you make or distribute. However, you may accept compensation in exchange for copies. If you distribute a large enough number of copies you must also follow the conditions in section B.3.

You may also lend copies, under the same conditions stated above, and you may publicly display copies.

B.3 COPYING IN QUANTITY

If you publish printed copies (or copies in media that commonly have printed covers) of the Document, numbering more than 100, and the Document’s license notice requires Cover Texts, you must enclose the copies in covers that carry, clearly and legibly, all these Cover Texts: Front-Cover Texts on the front cover, and Back-Cover Texts on the back cover. Both covers must also clearly and legibly identify you as the publisher of these copies. The front cover must present the full title with all words of the title equally prominent and visible. You may add other material on the covers in addition. Copying with changes limited to the covers, as long as they preserve the title of the Document and satisfy these conditions, can be treated as verbatim copying in other respects.

If the required texts for either cover are too voluminous to fit legibly, you should put the first ones listed (as many as fit reasonably) on the actual cover, and continue the rest onto adjacent pages.

If you publish or distribute Opaque copies of the Document numbering more than 100, you must either include a machine-readable Transparent copy along with each Opaque copy, or state in or with each Opaque copy a computer-network location from which the general network-using public has access to download using public-standard network protocols a complete Transparent copy of the Document, free of added material. If you use the latter option, you must take reasonably prudent steps, when you begin distribution of Opaque copies in quantity, to ensure that this Transparent copy will remain thus accessible at the stated location until at least one year after the last time you distribute an Opaque copy (directly or through your agents or retailers) of that edition to the public.

It is requested, but not required, that you contact the authors of the Document well before redistributing any large number of copies, to give them a chance to provide you with an updated version of the Document.

B.4 MODIFICATIONS

You may copy and distribute a Modified Version of the Document under the conditions of sections B.2 and B.3 above, provided that you release the Modified Version under precisely this License, with the Modified Version filling the role of the Document, thus licensing distribution and modification of the Modified Version to whoever possesses a copy of it. In addition, you must do these things in the Modified Version:

[A.]Use in the Title Page (and on the covers, if any) a title distinct from that of the Document, and from those of previous versions (which should, if there were any, be listed in the History section of the Document). You may use the same title as a previous version if the original publisher of that version gives permission. List on the Title Page, as authors, one or more persons or entities responsible for authorship of the modifications in the Modified Version, together with at least five of the principal authors of the Document (all of its principal authors, if it has fewer than five), unless they release you from this requirement. State on the Title page the name of the publisher of the Modified Version, as the publisher. Preserve all the copyright notices of the Document. Add an appropriate copyright notice for your modifications adjacent to the other copyright notices. Include, immediately after the copyright notices, a license notice giving the public permission to use the Modified Version under the terms of this License, in the form shown in the Addendum below. Preserve in that license notice the full lists of Invariant Sections and required Cover Texts given in the Document's license notice. Include an unaltered copy of this License. Preserve the section Entitled "History", Preserve its Title, and add to it an item stating at least the title, year, new authors, and publisher of the Modified Version as given on the Title Page. If there is no section Entitled "History" in the Document, create one stating the title, year, authors, and publisher of the Document as given on its Title Page, then add an item describing the Modified Version as stated in the previous sentence. Preserve the network location, if any, given in the Document for public access to a Transparent copy of the Document, and likewise the network locations given in the Document for previous versions it was based on. These may be placed in the "History" section. You may omit a network location for a work that was published at least four years before the Document itself, or if the original publisher of the version it refers to gives permission. For any section Entitled "Acknowledgements" or "Dedications", Preserve the Title of the section, and preserve in the section all the substance and tone of each of the contributor acknowledgements and/or dedications given therein. Preserve all the Invariant Sections of the Document, unaltered in their text and in their titles. Section numbers or the equivalent are not considered part of the section titles. Delete any section Entitled "Endorsements". Such a section may not be included in the Modified Version. Do not retitle any existing section to be Entitled "Endorsements" or to conflict in title with any Invariant Section. Preserve any Warranty Disclaimers.

If the Modified Version includes new front-matter sections or appendices that qualify as Secondary Sections and contain no material copied from the Document, you may at your option designate some or all of these sections as invariant. To do this, add their titles to the list of Invariant Sections in the Modified Version's license notice. These titles must be distinct from any other section titles.

You may add a section Entitled "Endorsements", provided it contains nothing but endorsements of your Modified Version by various parties—for example, statements of peer review or that the text has been approved by an organization as the authoritative definition of a standard.

You may add a passage of up to five words as a Front-Cover Text, and a passage of up to 25 words as a Back-Cover Text, to the end of the list of Cover Texts in the Modified Version. Only one passage of Front-Cover Text and one of Back-Cover Text may be added by (or through arrangements made by) any one entity. If the Document already includes a cover text for the same cover, previously added by you or by arrangement made by the same entity you are acting on behalf of, you may not add another; but you may replace the old one, on explicit permission from the previous publisher that added the old one.

The author(s) and publisher(s) of the Document do not by this License give permission to use their names for publicity for or to assert or imply endorsement of any Modified Version.

B.5 COMBINING DOCUMENTS

You may combine the Document with other documents released under this License, under the terms defined in section B.4 above for modified versions, provided that you include in the combination all of the Invariant Sections of all of the original documents, unmodified, and list them all as Invariant Sections of your combined work in its license notice, and that you preserve all their Warranty Disclaimers.

The combined work need only contain one copy of this License, and multiple identical Invariant Sections may be replaced with a single copy. If there are multiple Invariant Sections with the same name but different contents, make the title of each such section unique by adding at the end of it, in parentheses, the name of the original author or publisher of that section if known, or else a unique number. Make the same adjustment to the section titles in the list of Invariant Sections in the license notice of the combined work.

In the combination, you must combine any sections Entitled "History" in the various original documents, forming one section Entitled "History"; likewise combine any sections Entitled "Acknowledgements", and any sections Entitled "Dedications". You must delete all sections Entitled "Endorsements".

B.6 COLLECTIONS OF DOCUMENTS

You may make a collection consisting of the Document and other documents released under this License, and replace the individual copies of this License in the various documents with a single copy that is included in the collection, provided that you follow the rules of this License for verbatim copying of each of the documents in all other respects.

You may extract a single document from such a collection, and distribute it individually under this License, provided you insert a copy of this License into the extracted document, and follow this License in all other respects regarding verbatim copying of that document.

B.7 AGGREGATION WITH INDEPENDENT WORKS

A compilation of the Document or its derivatives with other separate and independent documents or works, in or on a volume of a storage or distribution medium, is called an “aggregate” if the copyright resulting from the compilation is not used to limit the legal rights of the compilation’s users beyond what the individual works permit. When the Document is included in an aggregate, this License does not apply to the other works in the aggregate which are not themselves derivative works of the Document.

If the Cover Text requirement of section B.3 is applicable to these copies of the Document, then if the Document is less than one half of the entire aggregate, the Document’s Cover Texts may be placed on covers that bracket the Document within the aggregate, or the electronic equivalent of covers if the Document is in electronic form. Otherwise they must appear on printed covers that bracket the whole aggregate.

B.8 TRANSLATION

Translation is considered a kind of modification, so you may distribute translations of the Document under the terms of section B.4. Replacing Invariant Sections with translations requires special permission from their copyright holders, but you may include translations of some or all Invariant Sections in addition to the original versions of these Invariant Sections. You may include a translation of this License, and all the license notices in the Document, and any Warranty Disclaimers, provided that you also include the original English version of this License and the original versions of those notices and disclaimers. In case of a disagreement between the translation and the original version of this License or a notice or disclaimer, the original version will prevail.

If a section in the Document is Entitled “Acknowledgements”, “Dedications”, or “History”, the requirement (section B.4) to Preserve its Title (section B.1) will typically require changing the actual title.

B.9 TERMINATION

You may not copy, modify, sublicense, or distribute the Document except as expressly provided for under this License. Any other attempt to copy, modify, sublicense or distribute the Document is void, and will automatically terminate your rights under this License. However, parties who have received copies, or rights, from you under this License will not have their licenses terminated so long as such parties remain in full compliance.

B.10 FUTURE REVISIONS OF THIS LICENSE

The Free Software Foundation may publish new, revised versions of the GNU Free Documentation License from time to time. Such new versions will be similar in spirit

to the present version, but may differ in detail to address new problems or concerns. See <http://www.gnu.org/copyleft/>.

Each version of the License is given a distinguishing version number. If the Document specifies that a particular numbered version of this License “or any later version” applies to it, you have the option of following the terms and conditions either of that specified version or of any later version that has been published (not as a draft) by the Free Software Foundation. If the Document does not specify a version number of this License, you may choose any version ever published (not as a draft) by the Free Software Foundation.

ADDENDUM: How to use this License for your documents

To use this License in a document you have written, include a copy of the License in the document and put the following copyright and license notices just after the title page:

- 1.** Copyright © YEAR YOUR NAME. Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.2 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts. A copy of the license is included in the section entitled “GNU Free Documentation License”.

If you have Invariant Sections, Front-Cover Texts and Back-Cover Texts, replace the “with...Texts.” line with this:

with the Invariant Sections being LIST THEIR TITLES, with the Front-Cover Texts being LIST, and with the Back-Cover Texts being LIST.

If you have Invariant Sections without Cover Texts, or some other combination of the three, merge those two alternatives to suit the situation.

If your document contains nontrivial examples of program code, we recommend releasing these examples in parallel under your choice of free software license, such as the GNU General Public License, to permit their use in free software.

Bibliografía

[HP95] John L. Hennessy and David A. Patterson. *Arquitectura de Computadores: Un enfoque cuantitativo*. McGrawHill, 1995.