

## ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

### CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

1.1. Un programa se ejecuta en 10 sec en el computador A que trabaja a 100 MHz. Un diseñador está pensando en una máquina B, que pueda ejecutar el mismo programa en 6 sec. El incremento sustancial en la frecuencia de reloj del nuevo diseño afecta al resto de la CPU, haciendo que la máquina B necesite 1,2 veces el número de ciclos de reloj que la máquina A para ese programa. ¿Qué frecuencia de reloj es la que resulta para la máquina B?

#### **SOLUCIÓN:**

$$T_{CPU} = NI \cdot CPI \cdot T_{CICLO} = NI \cdot CPI / f_{CLK}$$

$$T_{CPUA} / T_{CPUB} = (NI_A \cdot CPI_A \cdot f_{CLKB}) / (NI_B \cdot CPI_B \cdot f_{CLKA})$$

Como  $NI_B = NI_A$  y  $CPI_B = 1,2 \cdot CPI_A$  queda:

$$10 / 6 = f_{CLKB} / (1,2 \cdot 100 \text{ MHz})$$

$$f_{CLKB} = 200 \text{ MHz}$$

## ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

### CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

**1.2.** Se consideran dos diseños alternativos M1 y M2 para un mismo repertorio de instrucciones. Hay cuatro clases de instrucciones (A, B, C y D). M1 trabaja a 50 MHz y el número medio de ciclos para cada clase de instrucción es 1, 2, 3 y 4 respectivamente. M2 trabaja a 75 MHz y el número medio de ciclos para las mismas clases de instrucciones es 2, 2, 4 y 4 respectivamente. Se define rendimiento de pico como la frecuencia más rápida a la que una máquina podría ejecutar una secuencia de instrucciones escogidas para maximizar esa frecuencia.

- a) ¿Cuáles son los rendimientos de pico de M1 y M2 expresados como millones de instrucciones por segundo? Si el número de instrucciones ejecutadas en un cierto programa se dividen igualmente entre las cuatro clases de instrucciones:
- b) ¿cuántas veces M2 es más rápida que M1?
- c) ¿A qué frecuencia de reloj tendría M1 el mismo rendimiento que M2?

#### **SOLUCIÓN:**

a)  $R_{M1}^{PICO} = 50 \text{ MIPS}$ .  $R_{M2}^{PICO} = 37,5 \text{ MIPS}$ .

b) M2 es 1,25 veces más rápida que M1.

c)  $F_{M1} = 62,5 \text{ MHz}$ .

# ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

## CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

**1.3.** Considerar un programa P con la siguiente mezcla de operaciones: Multiplicación en coma flotante (MCF) 10%, Suma en coma flotante (SCF) 15%, División en coma flotante (DCF) 5% y Operaciones con enteros (INT) 70 %.

Un sistema convencional que no dispone de unidad de coma flotante debe emular las correspondientes operaciones que así lo requieran. El número de instrucciones enteras necesarias en cada emulación es MCF=30 INT, SCF=20 INT, DCF=50 INT. Suponer que cualquier instrucción entera necesita dos ciclos de reloj, y que la frecuencia de trabajo es de 100MHz.

a) Se ha diseñado un procesador de coma flotante como mejora del anterior sistema. El número de ciclos de reloj para cada tipo de operación se reduce a MCF=6 ciclos, SCF=4 ciclos y DCF=10 ciclos.

b) Se ha diseñado un procesador de coma flotante como mejora del anterior sistema. El número de ciclos de reloj para cada tipo de operación se reduce a MCF=15 ciclos, SCF=2 ciclos y DCF=10 ciclos.

Se pide para ambos casos, calcular en MIPS las frecuencias para la máquina con y sin mejora para dicho programa. Aplicando la ley de Amdahl, calcular la aceleración global ( $A_G$ ) del sistema mejorado.

### SOLUCIÓN:

a)  $R1^{ANTES} = 5,4 \text{ MIPS}$ .  $R1^{DESPUES} = 32,3 \text{ MIPS}$ .  $R2^{DESPUES} = 27,02 \text{ MIPS}$ .

b)  $A_G^1 = 5,93$ .  $A_G^2 = 4,97$ .

$$T_{CPU}^A = NI * \{0,7*2 + 0,15*20*2 + 0,1*30*2 + 0,05*50*2\} * T_{CICLO} = 18,4x10^{-8} * NI \text{ sec}$$

$$R^A = NI / T_{CPU}^A = 5,43x10^6 \text{ Instruc/sec} = 5,43 \text{ MIPS}$$

a)  $T_{CPU}^D = NI * \{0,7*2 + 0,15*4 + 0,1*6 + 0,05*10\} * T_{CICLO} = 3,1x10^{-8} * NI \text{ sec}$

$$R^D = NI / T_{CPU}^D = 32,25x10^6 \text{ Instruc/sec} = 32,25 \text{ MIPS}$$

b)  $T_{CPU}^D = NI * \{0,7*2 + 0,15*2 + 0,1*15 + 0,05*10\} * T_{CICLO} = 3,7x10^{-8} * NI \text{ sec}$

$$R^D = NI / T_{CPU}^D = 27,02x10^6 \text{ Instruc/sec} = 27,02 \text{ MIPS}$$

### Aplicando AMDAHL $A_G = 1 / \{(1-F_m) + F_m/A_m\}$

a) Mejora producida:  $SFC = 40/4 = 10$ ;  $MFC = 60/6 = 10$ ;  $DFC = 100/10 = 10 \Rightarrow A_m = 10$

Tiempo en el que se aplica la mejora ( $F_m$ ):

$$F_m = (0,15*40 + 0,1*60 + 0,05*100) * T_{CICLO} / (0,7*2 + 0,15*40 + 0,1*60 + 0,05*100) * T_{CICLO} = 0,924$$

Ganancia:  $A_G = 5,93$ .

Lógicamente se obtiene el mismo valor si  $A_G = T_{CPU}^A / T_{CPU}^D$  con los datos del apartado anterior.

b) Mejora producida:  $SFC = 40/2 = 20$ ;  $MFC = 60/15 = 4$ ;  $DFC = 100/10 = 10$ . Al no ser una mejora homogénea se deben aplicar las mejoras sucesivamente sin importar el orden.

b1)  $SFC \Rightarrow A_m = 20$ .  $F_m = (0,15*40) / (0,7*2 + 0,15*40 + 0,1*60 + 0,05*100) = 0,326$ . Ganancia:  $A_G^{SFC} = 1,45$

b2)  $MFC \Rightarrow A_m = 4$ .  $F_m = (0,1*60) / (0,7*2 + 0,15*2 + 0,1*60 + 0,05*100) = 0,472$ . Ganancia:  $A_G^{SFC} = 1,55$

b3)  $DFC \Rightarrow A_m = 10$ .  $F_m = (0,05*100) / (0,7*2 + 0,15*2 + 0,1*15 + 0,05*100) = 0,609$ . Ganancia:  $A_G^{SFC} = 2,21$

La ganancia total será:  $A_G = A_G^{SFC} * A_G^{MFC} * A_G^{DFC} = 1,45 * 1,55 * 2,21 = 4,97$

Lógicamente se obtiene el mismo valor si  $A_G = T_{CPU}^A / T_{CPU}^D$  con los datos del apartado anterior.

La ley de Amdahl permite este cálculo en una única operación:

$$A_G = 1 / \{ [1 - (F_m^{b1} + F_m^{b2} + F_m^{b3})] + F_m^{b1}/A_m^{b1} + F_m^{b2}/A_m^{b2} + F_m^{b3}/A_m^{b3} \} =$$
$$= 1 / \{ [1 - (0,326 + 0,326 + 0,272)] + 0,326/20 + 0,326/4 + 0,272/10 \} = 4,97$$

# ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

## CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

**1.4.** Una mejora hardware en una cierta máquina hace que todas las instrucciones en punto flotante corran cinco veces con más rapidez.

**a)** El tiempo de ejecución de un programa antes de la mejora era de 10 segundos, ¿cuál será la aceleración global si la mitad del tiempo se empleaba en ejecutar instrucciones en punto flotante?

**b)** Otro programa de prueba para medir el rendimiento de la máquina mejorada indica una aceleración global de 3. El programa tardaba 200 segundos en ejecutarse antes de la mejora. ¿Qué cantidad de tiempo de ejecución deberían contabilizar las instrucciones en punto flotante en dicho programa de prueba antes de la mejora?

### SOLUCIÓN:

**a)**  $A_G = 1,66$ .

**b)**  $t_{FP} = 166,66 \text{ sec}$

## ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

### CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

**1.5.** Se tienen tres máquinas diferentes, M0, M8 y M16, cuyas características se muestran en la tabla adjunta. Las tres máquinas tienen instrucciones de tres operandos, y cualquier operando puede ser una referencia a memoria o a registro. En la columna de la tabla etiquetada como P se indica la probabilidad de que un operando sea una referencia a registro en contraposición a memoria. Esta probabilidad se aplica individualmente a cada operando. En la columna de la tabla etiquetada como C se indican los ciclos de ejecución por operación excluyendo los accesos a operandos. El coste de un operando en memoria es de seis ciclos y el coste de un operando en registro es de un ciclo. Cada uno de los tres operandos tiene igual probabilidad de estar en un registro. Indicar cuantitativamente cuál de las tres máquinas tiene mayor rendimiento.

MAQUINA	Nº REG.	C	P	FRECUENCIA
M0	0	4 ciclos	0,0	100 MHz
M8	8	5 ciclos	0,5	75 MHz
M16	16	6 ciclos	0,8	50 MHz

#### **SOLUCIÓN:**

- a) El rendimiento de M8 mejora el de M0 en un 6,5%
- b) El rendimiento de M8 mejora el de M16 en un 16,0%
- c) El rendimiento de M0 mejora el de M16 en un 9,0%

## ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

### CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

**1.6.** Al añadir una unidad de coma flotante a un sistema, se mejora la velocidad de ejecución de un cierto tipo de instrucciones en un factor 3. Calcular la mejora global alcanzada si se conoce que este tipo de instrucciones utilizan un 75% del tiempo total de ejecución.

#### **SOLUCIÓN:**

Aplicando la ley de Amdahl con  $A_m = 3$  y  $F_m = 0,75$  se obtiene directamente

$$A_G = 1 / \{ (1 - 0,75) + 0,75/3 \} = 2$$

## ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

### CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

1.7. En el análisis teórico del efecto de una cierta mejora en un sistema se obtiene que la aceleración global del mismo vale -2. Indicar brevemente cuáles son los posibles significados de este resultado.

#### **SOLUCIÓN:**

Este resultado implica necesariamente un error en el cálculo, no una reducción en el rendimiento.

Utilizando la ley de Amdhal,  $A_G = 1 / (1 - F_m) + F_m / A_m = -2$ , es decir  $(1 - F_m) + F_m / A_m < 0$ . Tanto  $F_m$  como  $A_m$  son siempre magnitudes positivas, por tanto sólo puede ser posible si  $(1 - F_m) < 0$ . Es decir cuando el porcentaje de tiempo en el que se debe aplicar la mejora sea mayor que el 100% ( $F_m > 1$ ), lo cual es imposible de realizar.

## ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

### CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

**1.8.** Suponga una máquina en donde el CPI promedio es 4 ciclos. Un 10% son multiplicaciones y tardan 10 ciclos. Si sólo se mejoran estas operaciones en un factor 2,5, calcular el nuevo valor del CPI promedio.

#### **SOLUCIÓN:**

$$CPI^{ANTES} = 0,9 \times N + 0,1 \times 10 = 4 \text{ ciclos.}$$

Siendo N los CPI de las otras instrucciones.  $0,9 \times N = 3$  ciclos.

$$CPI^{DESPUES} = 0,9 \times N + 0,1 \times (10/2,5) = 3,4 \text{ ciclos.}$$



# ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

## CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

1.9. Para una carga dada de trabajo, el repertorio de instrucciones de un cierto sistema se resume en la siguiente tabla:

Tipo Instrucción	Control	Aritméticas	Transferencia de datos	Coma flotante
Promedio de uso	15%	47%	32%	6%
CPI	2	1	4	6

Se considera añadir un modo de direccionamiento indexado a la arquitectura de nuestro sistema. Para ello se modifica el compilador de manera que secuencias de instrucciones de la forma:

ADD R1, R1, R2

LOAD R3, inm(R1) ;  $R3 \leftarrow MEM(inm+R1)$

se reemplazan por una nueva instrucción de transferencia con el nuevo modo de direccionamiento siendo esta de la forma:

LOAD<sub>index</sub> R3, R1, R2 ;  $R3 \leftarrow MEM(R1+R2)$

Se puede suponer que el nuevo modo de direccionamiento puede ser utilizado en el 25% de las operaciones de transferencia, y que el añadir este nuevo modo supone aumentar el ciclo de reloj un 5%. ¿Qué máquina es más rápida con esta carga de trabajo? ¿Por cuánto?

### SOLUCIÓN:

De las N instrucciones de un cierto programa, el 25% de las instrucciones de transferencia (32%) supone el 8% del total. Esto supone que de cada 100 instrucciones del programa original eliminamos 8 aritméticas.

Los nuevos porcentajes aplicables al programa son 16,3% de control, 42,4 % aritméticas, 34,8% de transferencia y 6,5% de coma flotante.

Conociendo que la relación de los periodos de reloj de ambas opciones es:  $T_C^{DESPUES} = 1,05 \times T_C^{ANTES}$ .

El tiempo de ejecución del supuesto programa antes y después de la supuesta mejora serán:

$$T_E^{ANTES} = N \times (0,15 \times 2 + 0,47 \times 1 + 0,32 \times 4 + 0,06 \times 6) \times T_C^{ANTES} = 2,410 \times N \times T_C^{ANTES}$$

$$T_C^{DESPUES} = (0,92 \times N) \times (0,163 \times 2 + 0,424 \times 1 + 0,348 \times 4 + 0,065 \times 6) \times 1,05 \times T_C^{ANTES} = 2,446 \times N \times T_C^{ANTES}$$

La máquina antes de la supuesta mejora utiliza menos tiempo de ejecución.

Con esta información podemos calcular que antes de la modificación el rendimiento del sistema para ese programa es mejor en un 1,5% respecto al sistema tras la modificación.

## ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

### CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

**1.10.** Se dispone de un juego de instrucciones en el que cada tipo de instrucción, el porcentaje medio de uso de cada uno y los ciclos medios necesarios para ejecutarlas se reflejan en la tabla adjunta:

Tipo Instrucción	Enteros	Coma Flotante	LOAD	STORE
Promedio de uso	45%	25%	15%	15%
CPI (ALU)	1	6	1	1
CPI (MEM)	3	3	6	6

Suponiendo que el reloj del sistema se duplica y que el tiempo de acceso a memoria no varía, calcular utilizando la ley de Amdahl el porcentaje obtenido en la mejora.

#### **SOLUCIÓN:**

Si el tiempo de acceso a memoria no varía, la mejora propuesta sólo afectará a los CPI que se ejecutan en la ALU.

La mejora implica duplicar la frecuencia. Por tanto el valor de la aceleración normal es  $A_{ccm}=2$ .

La fracción de tiempo sobre el que se aplica la mejora, sólo afecta a los ciclos que se ejecutan en la ALU. Por tanto la frecuencia mejorada

$$F_m = [0,45 \times 1 + 0,25 \times 6 + 0,15 \times 1 + 0,15 \times 1] / [0,45 \times (1+3) + 0,25 \times (6+3) + 0,15 \times (1+6) + 0,15 \times (1+6)] = 0,366$$

Aplicando la ley de Amdahl.  $A_G = 1,224$ . La mejora supone una aceleración del 22,4%.

# ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

## CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

**1.11.** En un cierto sistema ordenador una instrucción de salto tarda en ejecutarse 10 ciclos, frente al resto que sólo tardan 1. Una mejora en la unidad de control permite ejecutar las instrucciones de salto en la mitad de ciclos. Adicionalmente con la mejora se permite al reloj del sistema duplicar su frecuencia. Calcular utilizando la ley de Amdahl la mejora global que se produce si las instrucciones de salto representan un 10% del total.

### SOLUCIÓN:

El problema trata de dos mejoras independientes que pueden ser tratadas de forma sucesiva utilizando la ley de Amdahl:

1.- Si se mejoran sólo las instrucciones de saltos se mejora la fracción de tiempo que supone

$$F_m^1 = 0,1 \times 10 / (0,9 \times 1 + 0,1 \times 10) = 0,53.$$

La mejora supone una aceleración mejorada de  $A_m^1 = 10/5 = 2$

Por lo tanto la primera mejora supone una aceleración global de  $A_G^1 = 1,36$

2.- La segunda mejora afecta a todo el sistema por tanto  $F_m^2 = 1$ .

La mejora supone una aceleración mejorada de  $A_m^2 = T_C^{\text{ANTES}} / T_C^{\text{DESPUES}} = 2$

Por lo tanto la primera mejora supone una aceleración global de  $A_G^2 = 2$

La mejora total se obtiene al multiplicar ambas mejoras  $A_G = A_G^1 \times A_G^2 = 2,72$ .

El sistema ha mejorado en un 172%.

# ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

## CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

**1.12.** Dos grupos de desarrollo en una empresa de procesadores han mejorado de forma independiente un procesador. El primer grupo ha mejorado la unidad de multiplicación del sistema en un 25%. El segundo ha mejorado la velocidad de acceso a memoria en un factor 3. Ningún cambio afecta ni al reloj del sistema ni al número de instrucciones. Suponer que un programa típico necesita para su ejecución 100 segundos. Dicho programa utiliza el 10% del tiempo en multiplicaciones y el 57% en accesos a memoria, utilizándose el tiempo restante en otro tipo de operaciones. Se pide utilizando necesariamente la ley de Amdahl la aceleración global tras ambas mejoras.

### SOLUCIÓN:

El problema trata de dos mejoras independientes que pueden ser tratadas de forma sucesiva utilizando la ley de Amdahl:

1.- Si inicialmente se mejora el acceso a memoria, la fracción de tiempo sobre la que se aplica la mejora es  $F_m^1 = 0,57$ . Una mejora de un factor 3, supone una aceleración mejorada de  $A_m^1 = 3$

Por lo tanto aplicando Amdahl, la primera mejora supone una aceleración global de  $A_G^1 = 1,613$

2.- La segunda mejora afecta a las instrucciones de multiplicar. Antes de la primera mejora utilizaba un 10% del tiempo total, pero tras la misma utiliza un 16,2% del tiempo  $\{F_m^2 = 0,10 / (0,1+0,57 \times 0,33+0,33) = 0,162\}$ . Si la mejora es del 25%, implica una aceleración mejorada de  $A_m^2 = 1,25$

Por lo tanto la segunda mejora supone una aceleración global de  $A_G^2 = 1,033$

La mejora total se obtiene al multiplicar ambas mejoras  $A_G = A_G^1 \times A_G^2 = 1,67$ .

El sistema ha mejorado en un 67%.

Con la ley de Amdahl generalizada:

$$F_{m1} = 0,1 \text{ y } A_{m1} = 1,25$$

$$F_{m2} = 0,57 \text{ y } A_{m2} = 3$$

$$A_g = 1 / ((1 - F_{m1} - F_{m2}) + F_{m1}/A_{m1} + F_{m2}/A_{m2}) = 1 / ((1-0,1-0,57)+0,1/1,25+0,57/3) = 1,67$$

# ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

## CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

**1.13.** Se dispone de dos opciones para mejorar un computador. La primera consigue que las instrucciones de coma flotante se ejecuten 4 veces más rápido y la otra posibilidad es mejorar el interfaz de memoria haciendo que los accesos sean el doble de rápidos.

Para comprobar el rendimiento se ejecuta durante un tiempo un programa y se comprueba que, antes de las mejoras, el 25 % de este tiempo se utiliza en operaciones de coma flotante, el 50% en acceso a memoria y el resto en otras tareas. Se pide, utilizando la Ley de Amdahl:

a) Indicar cuál de las dos mejoras es más efectiva si sólo se puede aplicar una de ellas.

b) Calcular la aceleración global del sistema después de aplicar de forma consecutiva ambas mejoras.

### SOLUCIÓN:

a) Si sólo se mejora las operaciones de coma flotante, la fracción de tiempo sobre la que se aplica la mejora es  $F_m = 0,25$ . La mejora supone una aceleración mejorada de  $A_m = 4$

Por lo tanto aplicando Amdahl, la mejora supone una aceleración global de  $A_G = 1,23$ , es decir el 23%

Si sólo se mejora la interfaz con la memoria, la fracción de tiempo sobre la que se aplica la mejora es  $F_m = 0,5$ . La mejora supone una aceleración mejorada de  $A_m = 2$

Por lo tanto aplicando Amdahl, la mejora supone una aceleración global de  $A_G = 1,33$ , es decir el 33%. Esta mejora individual es más eficiente que la primera.

b) Ahora se trata de dos mejoras independientes.

Pueden ser tratadas de forma sucesiva utilizando la ley de Amdahl:

1.- Si inicialmente se mejoran las operaciones de coma flotante, la primera mejora supone, igual que en el caso anterior, una aceleración global de  $A_G^1 = 1,23$ , es decir el 23%

2.- La segunda mejora afecta a los accesos a memoria. Antes de la primera mejora utilizaba un 50% del tiempo total, pero tras la misma utiliza un 61,5% del tiempo  $\{F_m^2 = 0,5 / (0,25/4 + 0,75) = 0,615\}$ . La mejora implica una aceleración mejorada de  $A_m^2 = 2$

Por lo tanto la segunda mejora supone una aceleración global de  $A_G^2 = 1,44$

La mejora total se obtiene al multiplicar ambas mejoras  $A_G = A_G^1 \times A_G^2 = 1,778$ .

El sistema con ambas modificaciones ha mejorado en un 77,8%.

La otra forma de resolverlo es aplicando la ley de Amdahl generalizada:

$F_{m1} = 0,25$  y  $A_{m1} = 4$

$F_{m2} = 0,5$  y  $A_{m2} = 2$

$A_g = 1 / ((1 - F_{m1} - F_{m2}) + F_{m1}/A_{m1} + F_{m2}/A_{m2}) = 1 / ((1 - 0,25 - 0,5) + 0,25/4 + 0,5/2) = 1,778$ .

# ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

## CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

1.14. Considerar un programa con los siguientes porcentajes de instrucciones y CPI asociados

Tipo Instrucción	Enteros	Coma Flotante	LOAD/STORE	Salto Incondicionales	Salto Condicionales
Promedio de uso	60%	10%	10%	5%	15%
CPI	2	16	5	2	4

Se realizan dos mejoras sobre el sistema que ejecuta el programa. La primera consiste en un nuevo diseño de la unidad de coma flotante (FP) que consigue un CPI para las operaciones de coma flotante de 4 ciclos y la segunda perfecciona la unidad de tratamiento de enteros reduciendo el CPI para las operaciones con enteros a 1 ciclo. Aplicando la ley de Amdahl, calcule la aceleración global conseguida al ejecutar el programa en el sistema, después de aplicar las dos mejoras.

### SOLUCIÓN:

El problema trata de dos mejoras independientes que pueden ser tratadas de forma sucesiva utilizando la ley de Amdahl:

1.- Si inicialmente se mejoran las operaciones de coma flotante, la fracción de tiempo sobre la que se aplica la mejora es  $F_m^1 = 0,1 \times 16 / (0,1 \times 16 + 0,6 \times 2 + 0,15 \times 4 + 0,05 \times 2 + 0,1 \times 5) = 0,4$ .

La mejora supone una aceleración mejorada de  $A_m^1 = 4$

Por lo tanto aplicando Amdahl, la primera mejora supone una aceleración global de  $A_G^1 = 1,43$

2.- La segunda mejora afecta a las instrucciones con enteros.

La mejora implica una aceleración mejorada de  $A_m^2 = 2$

Antes de la primera mejora utilizaba un 60% del tiempo total, tras la misma utiliza un 43% del tiempo

$\{F_m^2 = 0,6 \times 2 / (0,1 \times 4 + 0,6 \times 2 + 0,15 \times 4 + 0,05 \times 2 + 0,1 \times 5) = 0,43\}$ .

Por lo tanto la segunda mejora supone una aceleración global de  $A_G^2 = 1,27$

La mejora total se obtiene al multiplicar ambas mejoras  $A_G = A_G^1 \times A_G^2 = 1,82$ .

El sistema ha mejorado en un 82%.

Con la ley de Amdahl generalizada:

$F_{m1} = 0,4$  y  $A_{m1} = 4$

$F_{m2} = 0,3$  y  $A_{m2} = 2$

$A_g = 1 / ((1 - F_{m1} - F_{m2}) + F_{m1}/A_{m1} + F_{m2}/A_{m2}) = 1 / ((1 - 0,4 - 0,3) + 0,4/4 + 0,3/2) = 1,82$

## ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

### CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

**1.15.** En un cierto ordenador se realiza una mejora en una parte del sistema, que implica reducir en un factor 10 el tiempo de ejecución en las instrucciones afectadas. Tras la mejora, dichas instrucciones utilizarán el 50% del tiempo total del sistema. Se pide:

- a) Cuál es la mejora que se obtiene
- b) Calcular el valor de la fracción de tiempo mejorada ( $F_m$ ) en la citada mejora

#### **SOLUCIÓN:**

a) La mitad del tiempo después de la mejora no cambia respecto a antes, la otra mitad ha sido mejorada un factor 10, luego el tiempo antes de la mejora se puede expresar como:

$$T_{CPU}^{ANTES} = 0,5 \times T_{CPU}^{DESP} + (0,5 \times T_{CPU}^{DESP}) \times 10 = 5,5 \times T_{CPU}^{DESP}$$

$$T_{CPU}^{ANTES} / T_{CPU}^{DESP} = 5,5$$

b) Conocida la mejora global del epígrafe anterior, se puede aplicar la ley de Amdahl para encontrar la respuesta a esta pregunta:

$$A_G = 5,5; \quad A_m = 10 \Rightarrow F_m = A_m (1 - A_G) / A_G (1 - A_m) = 0,91 \Rightarrow \text{Una fracción mejorada del 91\%}$$

También se podía calcular la  $F_m$  más inmediatamente de la siguiente manera:

$$\text{Teníamos que } T_{CPU}^{ANTES} = 0,5 \times T_{CPU}^{DESP} + (0,5 \times T_{CPU}^{DESP}) \times 10 = 0,5 \times T_{CPU}^{DESP} + 5,0 \times T_{CPU}^{DESP}$$

O sea que de un total de  $5,5 T_{CPU}^{DESP}$ , mejoró la parte que corresponde a  $5,0 \times T_{CPU}^{DESP}$ :

$$F_m = 5,0 \times T_{CPU}^{DESP} / 5,5 \times T_{CPU}^{DESP} = 0,91$$

# ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

## CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

**1.16.** Durante el desarrollo de un sistema que implementa un cierto algoritmo de procesamiento de vídeo, se detecta el problema de que el equipo no es capaz de trabajar en tiempo real: tarda 65 ms en procesar cada imagen, mientras que la cámara de vídeo manda 25 imágenes por segundo.

**a)** ¿Cuánto se debe acelerar el sistema para que llegue a trabajar en tiempo real?

Una primera solución puede ser usar un procesador más rápido, de tal manera que de los 250 MHz originales se llegue a 400 MHz. Sin embargo, el sistema de memoria se mantendría igual. Hay que tener en cuenta que para este algoritmo se estima que un 30% del tiempo total se gasta en accesos a memoria. La segunda opción es mejorar el sistema de memoria, añadiendo una memoria caché que duplica el rendimiento de este sistema.

**b)** ¿Cuál es la aceleración que se consigue con cada una de estas dos opciones por separado? A la vista de los resultados, ¿cuál es mejor? ¿Se consigue con alguna de ellas llegar a trabajar en tiempo real?

**c)** Finalmente, ¿Qué aceleración se consigue aplicando simultáneamente ambas mejoras? ¿Se consigue así trabajar en tiempo real?

Los apartados **b)** y **c)** deben resolverse usando necesariamente la ley de Amdahl.

### SOLUCIÓN:

**a)** 25 imágenes por segundo corresponden con una imagen cada  $1/25 = 40$  ms

La aceleración necesaria para que el sistema funcione en tiempo real es:

$$A_{\text{necesaria}} = T_{\text{actual}} / T_{\text{necesario}} = 65 \text{ ms} / 40 \text{ ms} = 1,625$$

Para que el sistema sea capaz de trabajar en tiempo real hay que mejorar sus prestaciones un 62,5%

**b)** Mejora del procesador:

$$F_m = 0,7; \quad A_m = 400 \text{ MHz} / 250 \text{ MHz} = 1,6; \quad A_G = 1 / [(1-F_m) + F_m / A_m] = 1 / [0,3 + 0,7 / 1,6] = 1,356$$

Mejora de la memoria:

$$F_m = 0,3; \quad A_m = 2; \quad A_G = 1 / [(1-F_m) + F_m / A_m] = 1 / [0,7 + 0,3 / 2] = 1,176$$

La mejora del procesador es  $1,356/1,176 = 1,153$  (15,3%) mejor que la mejora de la memoria, pero ninguna de ellas alcanzan la aceleración de 1,625 necesaria para que el sistema trabaje en tiempo real.

**c)** Aplicar simultáneamente las dos mejoras:

Lo podemos resolver aplicando una mejora después de otra. Sobre la mejora del sistema de memoria, aplicamos la mejora del procesador. Puesto que ahora el tiempo gastado en accesos a la memoria se ha reducido a la mitad, la fracción mejorada será:

$$F_m = 0,7 / [0,7 + (0,3 / 2)] = 0,7 / 0,85 = 0,82$$

La aceleración de la mejora es la misma que la calculada en el punto anterior, por lo que el resultado será:

$$A_m = 400 \text{ MHz} / 250 \text{ MHz} = 1,6 \quad A_G = 1 / [(1-F_m) + F_m / A_m] = 1 / [0,18 + 0,82 / 1,6] = 1,45$$

La aceleración total alcanzada será el resultado de multiplicar este valor por el que ya se había obtenido para la mejora del sistema de memoria. Así,  $A_{\text{TOTAL}} = A_{\text{MEM}} * A_{\text{CPU}} = 1,18 * 1,45 = 1,70$ .

También se puede obtener el resultado con la ley de Amdahl generalizada:

$$A_G = 1 / [(1-F_{m1}-F_{m2}) + F_{m1} / A_{m1} + F_{m2} / A_{m2}] = 1 / [(1-0,7-0,3) + 0,7/1,6 + 0,3/2] = 1,70.$$

Con esta aceleración sí se consigue que el sistema trabaje en tiempo real.



## ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

### CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

**1.17.** En un cierto ordenador, las instrucciones que acceden a memoria de datos tardan en ejecutarse 4 ciclos, las instrucciones de saltos tardan en ejecutarse 6 ciclos, y el resto sólo tarda 1 ciclo. Una mejora en el sistema permite ejecutar las instrucciones que acceden a memoria de datos en 2 ciclos y las de salto en 3 ciclos. Sabiendo que las instrucciones que acceden a memoria de datos representan el 40% del total, las instrucciones de salto representan el 10% del total, y el resto el 50%, se pide:

- Calcular, **utilizando necesariamente la ley de Amdahl**, la mejora global que se produce en el sistema.
- El tiempo de ejecución de un programa que contiene 500 instrucciones, sabiendo que la frecuencia de reloj es de 50 Mhz antes y después de la mejora.

#### SOLUCION:

- Como las 2 mejoras que se producen en el sistema aceleran dicho sistema un mismo factor, se puede aplicar la ley de Amdahl correspondiente a una mejora:

$$F_m = (0.4 \cdot 4 + 0.1 \cdot 6) / ((0.4 \cdot 4) + (0.1 \cdot 6) + (0.5 \cdot 1)) = 2.2 / 2.7 = 0.815$$

$A_m = 2$  ya que tanto la mejora de las instrucciones que acceden a memoria de datos como las de saltos es de un factor 2.

Por tanto, aplicando la ley de Amdahl:

$$A_g = 1 / (1 - F_m + F_m/A_m) = 1 / (1 - 0.815 + 0.815/2) = 1.6875, \text{ es decir, el sistema se mejora un } 68.75\%.$$

O también se puede resolver a partir de la ley de Amdahl generalizada:

$$F_{m1} = (0.4 \cdot 4) / ((0.1 \cdot 6) + (0.4 \cdot 4) + (0.5 \cdot 1)) = 1.6/2.7 = 0.5926 \rightarrow \text{instrucciones de acceso a memoria de datos.}$$

$$A_{m1} = 2$$

$$F_{m2} = (0.1 \cdot 6) / ((0.1 \cdot 6) + (0.4 \cdot 4) + (0.5 \cdot 1)) = 0.6/2.7 = 0.22 \rightarrow \text{instrucciones de salto.}$$

$$A_{m2} = 2$$

$$A_g = 1 / (1 - F_{m1} - F_{m2} + F_{m1}/A_{m1} + F_{m2}/A_{m2}) = 1 / (1 - 0.5926 - 0.22 + 0.5926/2 + 0.22/2) = 1.6875, \text{ es decir, el sistema mejora un } 68.75\%$$

- Tejecucion =  $(N_1 \cdot CPI_1 + N_2 \cdot CPI_2 + N_3 \cdot CPI_3) / \text{Frec. reloj.}$

$$\text{Tejecucion(antes)} = 500 \cdot (0.4 \cdot 4 + 0.1 \cdot 6 + 0.5 \cdot 1) / (50 \cdot 1000000) = 2.7 \cdot 10^{-5} \text{ seg.}$$

$$\text{Tejecucion(después)} = 500 \cdot (0.4 \cdot 2 + 0.1 \cdot 3 + 0.5 \cdot 1) / (50 \cdot 1000000) = 1.6 \cdot 10^{-5} \text{ seg.}$$

## ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

### CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

**1.18.** Al ejecutar un conjunto de programas en un sistema de cómputo, se obtiene que el tiempo de ejecución que corresponde a cada tipo de instrucciones es el siguiente:

Tipo Instr	Enteros	Coma Flotante	Lecturas	Escrituras
Tiempo (seg)	40	50	5	5

- a) Se introduce una primera mejora en la unidad de enteros que permite reducir a 5 segundos la ejecución de las instrucciones de este tipo. ¿Cuál es la mejora parcial obtenida? ¿y la mejora global? ¿Qué porcentaje de tiempo de ejecución debería corresponder en los programas a las instrucciones de enteros para conseguir una mejora global de 5?
- b) El objetivo final es conseguir una aceleración global de 5 y para ello además de la mejora anterior solo se puede mejorar la unidad de coma flotante. ¿Qué mejora será necesario conseguir en la unidad de coma flotante?

a)  $Am1 = 40/5 = 8$   
 $Fm1 = 0,4$   
 $Ag1 = 100/65 = 1,54$

$$5 = 1 / ((1 - fm) + fm/8) ; fm = 32/35 = 0,914 ; 91,4\%$$

b)  $Ag = 5 = 100/20 ;$   
 $Am2 = 10$

# ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

## CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

**1.19.** Se rediseña el set de instrucciones (ISA) de un procesador y se evalúa el cambio compilando el mismo programa para obtener la secuencia de instrucciones asociada a cada ISA.

Las diferencias entre las secuencias de instrucciones se muestra en la tabla, donde se detallan los ciclos que emplea cada clase de instrucción y el número de instrucciones de cada clase para cada una de las secuencias, según se utilice el set de instrucciones inicial (ISA1) o el set de instrucciones modificado (ISA2)

Clase de instrucción	A	B	C
CPI con ISA1 (ciclos)	2	4	2
CPI con ISA2 (ciclos)	1	3	4
Nº instr Secuencia con ISA1	3	3	6
Nº instr Secuencia con ISA2	6	2	2

a) ¿Cuál es el CPI promedio de la secuencia de instrucciones según se utilice el ISA1 o el ISA2?

$$CPI (ISA1) = (3 \cdot 2 + 3 \cdot 4 + 6 \cdot 2) / (3 + 2 + 6) = 30 / 12 = 2,5$$

$$CPI (ISA2) = (6 \cdot 1 + 2 \cdot 3 + 2 \cdot 4) / (6 + 2 + 2) = 20 / 10 = 2$$

b) ¿Cuál es la aceleración obtenida al cambiar el set de instrucciones?

$$A = (30 / 20) = 1,5$$

c) ¿Cuál es la aceleración parcial conseguida en el programa para cada tipo de instrucción?

Clase A = no acelera

$$Clase B = A_{m1} = 3 \cdot 4 / 2 \cdot 3 = 2$$

$$Clase C = A_{m2} = 6 \cdot 2 / 2 \cdot 4 = 1,5$$

d) ¿Qué porcentaje del tiempo de ejecución se aplica cada mejora?

$$F_m B = F_{m1} = (3 \cdot 4) / (3 \cdot 2 + 3 \cdot 4 + 6 \cdot 2) = 12 / 30 = 0,4 \text{ un } 40\%$$

$$F_m C = F_{m2} = (6 \cdot 2) / (3 \cdot 2 + 3 \cdot 4 + 6 \cdot 2) = 12 / 30 = 0,4$$

e) ¿Qué porcentaje del tiempo de ejecución no se mejora?

$$F_m A = 1 - F_{m1} - F_{m2} = 0,2 = (2 \cdot 3) / (3 \cdot 2 + 3 \cdot 4 + 6 \cdot 2) = 6 / 30 = 0,2$$

COMPROBACION:

$$A = 1 / [(1 - F_{m1} - F_{m2}) + F_{m1} / A_{m1} + F_{m2} / A_{m2}] = 1 / [0,2 + 0,4 / 2 + 0,4 / 1,5] = 1,5$$

## ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

### CAPÍTULO 1. ABSTRACCIONES, TECNOLOGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS COMPUTADORES.

**1.20.** Para dos máquinas, A y B y una máquina de referencia (REF), se ejecutan tres programas de prueba, Test 1, Test 2 y Test 3, obteniendo los siguientes tiempos de ejecución:

	Ejecución Test1 (seg)	Ejecución Test2 (seg)	Ejecución Test3 (seg)
Máquina A	10	100	500
Máquina B	1	500	5000
Máquina de Referencia	100	1000	5000

- a) Calcule la mayor y la menor variación de rendimiento respecto a la máquina de referencia que se haya producido. ¿ Qué criterio elegirá para decidir que máquina es mejor?
- b) Calcule el SPECxx de cada máquina realizando la media geométrica para los 3 programas de test, normalizando respecto a la máquina de referencias y asignando por convenio el valor 10 como SPECxx de la máquina de referencia.

#### SOLUCION

a) mayor variación : En la ejecución de T1 por la máquina B ,  
 $R_b/R_{ref} = 100$  para T1 con un 9900 % de mejora

menor variación: En la ejecución de T3 por la máquina B,  $R_b/R_{ref} = 1$  para T3 no mejora

La máquina A para solucionar los tres Test tarda 610 seg que es muy inferior a los 5501 seg que tarda la máquina B.

b)

	T1 norm	T2 norm	T3 norm	Media geom	SPECxx
Máquina A	10	10	10	10	100
Máquina B	100	2	1	5,8	58
Máquina de Referencia	1	1	1	1	10