

# DCC007 – Organização de Computadores II

## **Aula 8 – Superescalar 2 Scoreboarding**

**Prof. Omar Paranaíba Vilela Neto**

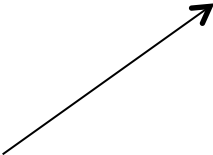


# Introdução

- Processadores estudados até aqui estão limitados a  $CPI \geq 1$
- Processadores superescalares permitem  $CPI < 1$ 
  - Executam múltiplas instruções em paralelo
- Tipos de processadores superescalares
  - In-order
  - Out-of-order

# Introdução

Fetch e Decode



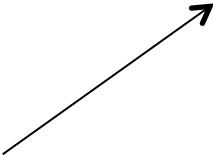
Name	Frontend
I4	IO
I202	IO
I201	IO
I03	IO
I021	IO

IO – In-order

OOO – Out-of-Order

# Introdução

Fetch e Decode



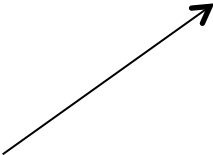
Name	Frontend	Issue
I4	IO	IO
I202	IO	IO
I201	IO	IO
I03	IO	OOO
I021	IO	OOO

IO – In-order

OOO – Out-of-Order

# Introdução

Fetch e Decode



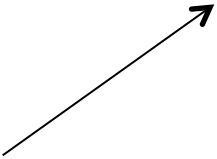
Name	Frontend	Issue	Writeback
I4	IO	IO	IO
I202	IO	IO	OOO
I201	IO	IO	OOO
I03	IO	OOO	OOO
I021	IO	OOO	OOO

IO – In-order

OOO – Out-of-Order

# Introdução

Fetch e Decode



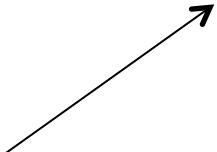
Name	Frontend	Issue	Writeback	Commit
I4	IO	IO	IO	IO
I202	IO	IO	OOO	OOO
I201	IO	IO	OOO	IO
I03	IO	OOO	OOO	OOO
I021	IO	OOO	OOO	IO

IO – In-order

OOO – Out-of-Order

# Introdução

Fetch e Decode



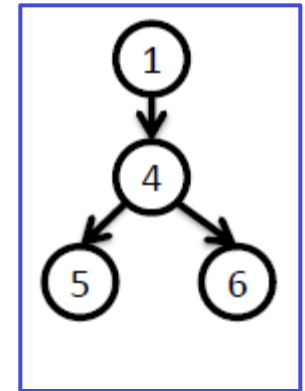
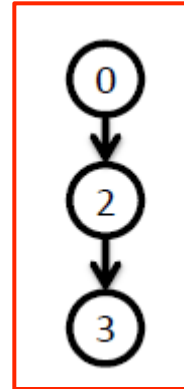
Name	Frontend	Issue	Writeback	Commit	
I4	IO	IO	IO	IO	Fixed Length Pipelines Scoreboard
I2O2	IO	IO	OOO	OOO	Scoreboard
I2O1	IO	IO	OOO	IO	Scoreboard, Reorder Buffer, and Store Buffer
IO3	IO	OOO	OOO	OOO	Scoreboard and Issue Queue
IO2I	IO	OOO	OOO	IO	Scoreboard, Issue Queue, Reorder Buffer, and Store Buffer

IO – In-order

OOO – Out-of-Order

# Motivação

```
0 MUL    R1, R2, R3
1 ADDIU  R11, R10, 1
2 MUL    R5, R1, R4
3 MUL    R7, R5, R6
4 ADDIU  R12, R11, 1
5 ADDIU  R13, R12, 1
6 ADDIU  R14, R12, 2
```

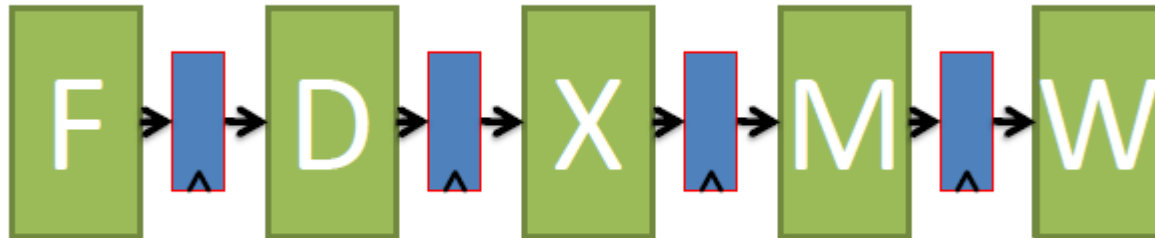


- 
- Duas sequências independentes
    - Permite flexibilizar a ordem em que instruções são planejadas
  - Estaticamente em Software
  - Dinamicamente em Hardware



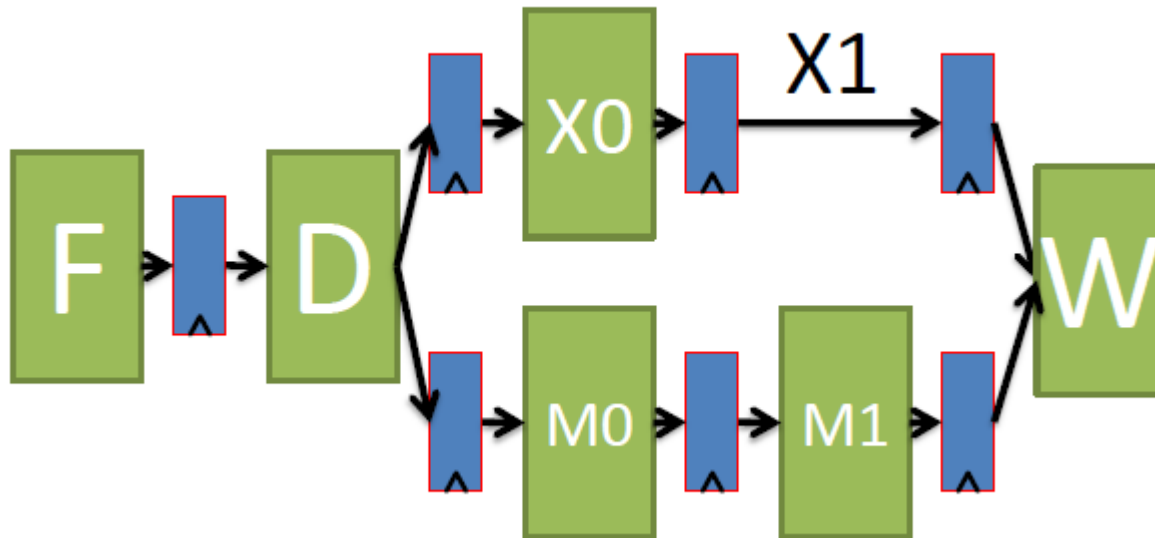
# Processador I4

- In-order
  - Usado para motivar Out-of-Order



# Processador I4

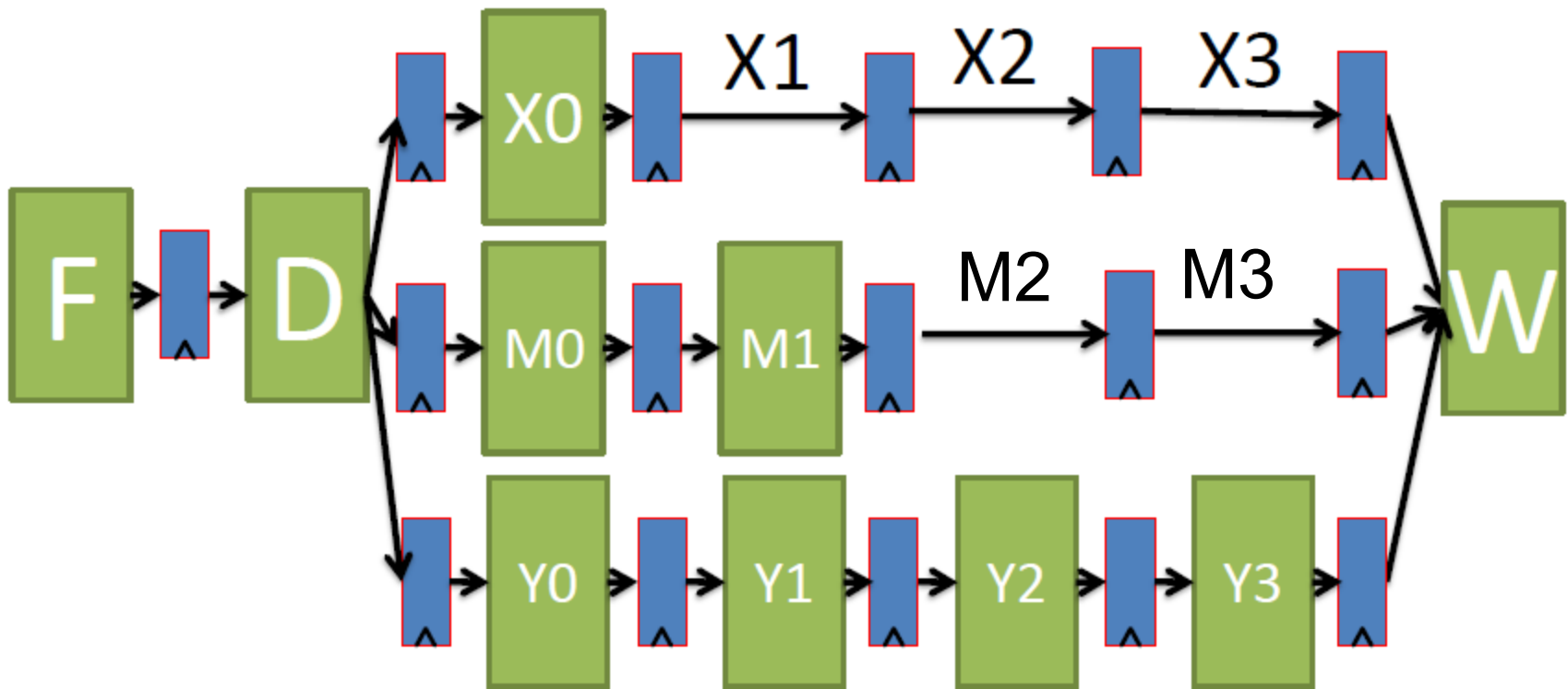
- In-order
  - Usado para motivar Out-of-Order



Vamos considerar uma máquina com 1 único disparo!

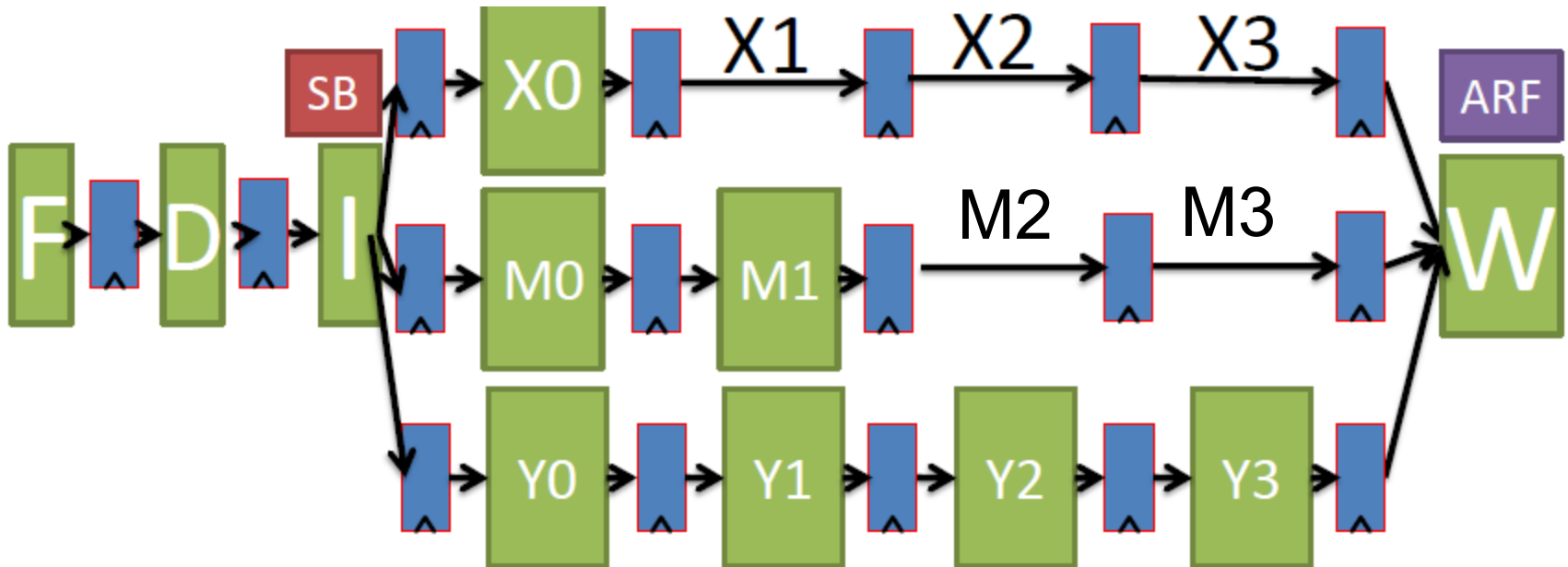
# Processador I4

- In-order (Multiplicação em 4 estágios)



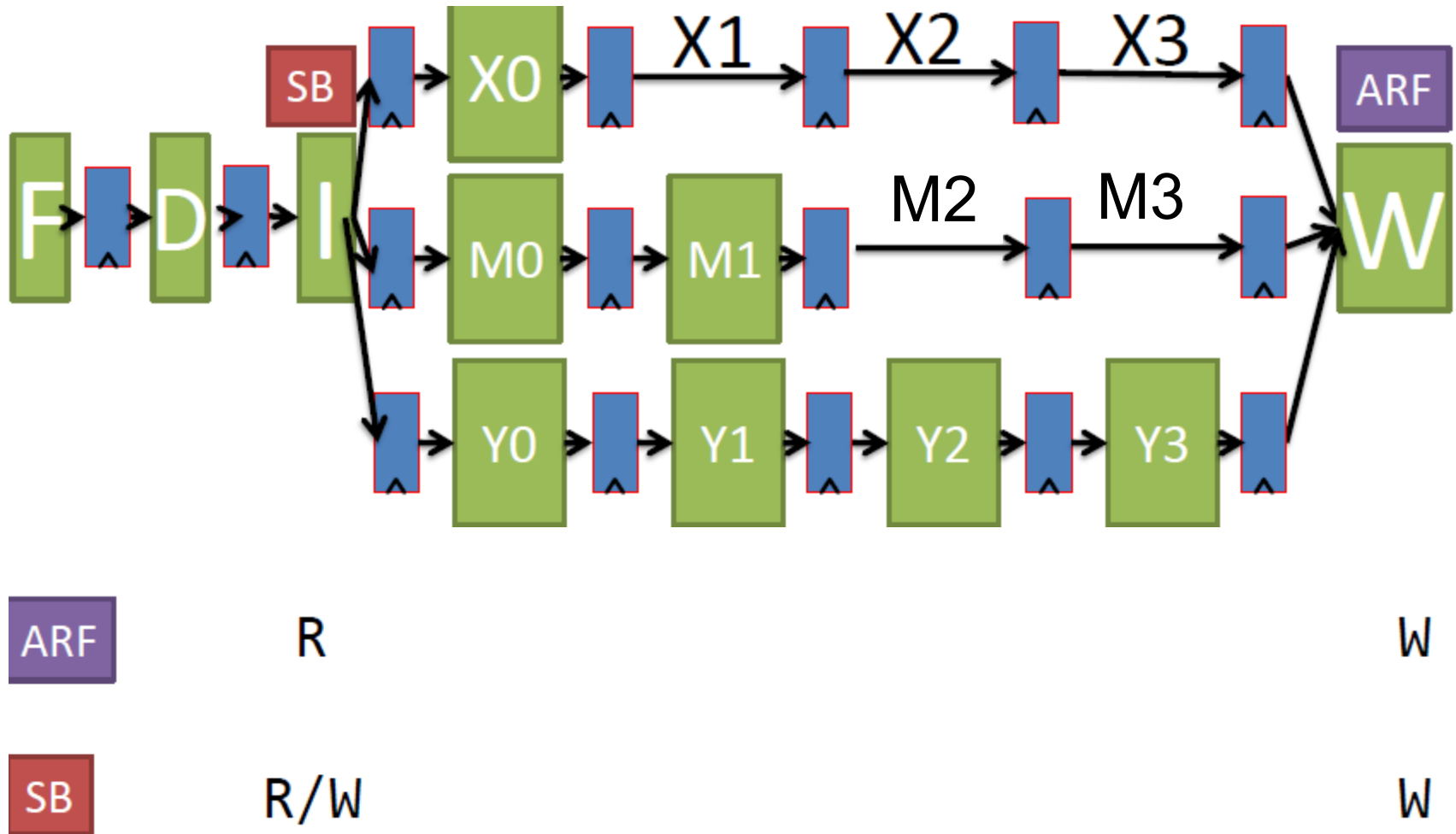
Considerar encaminhamento grande.

# Processador I4



- **ARF (Architecture Register File):** Onde mantemos o estado da máquina;
- **SB (ScoreBoard):** Onde conseguimos as informações de onde os dados estão no pipeline.

# Processador I4



# ScoreBoard Básico

	Dado Disponível						
	P	F	4	3	2	1	0
R1							→
R2							→
R3							→
...							→
R31							→

**P:** Pendente, Escrita a caminho;

**F:** Qual Unidade Funcional  
Escreverá no registrador;

**Dado Disponível:** Onde está o  
dado no pipeline da Unidade  
Funcional.

- Um bit 1 em **Dado Disponível** na coluna **I** significa que o **resultado** está no **estágio I** da unidade funcional **F**;
- Pode usar os **campos F e Dado Disponível** para **determinar quando e de onde vem o encaminhamento**;
- Um bit 1 na coluna **0** significa que a unidade funcional está no **estágio WB**.
- Os bits em **Dado Disponível** são **deslocados a cada ciclo**.

0	MUL	R1, R2, R3	F	D	I	Y0	Y1	Y2	Y3	W											
1	ADDIU	R11,R10,1		F	D	I	X0	X1	X2	X3	W										
2	MUL	R5, R1, R4			F	D	I	I	I	Y0	Y1	Y2	Y3	W							
3	MUL	R7, R5, R6				F	D	D	D	I	I	I	I	Y0	Y1	Y2	Y3	W			
4	ADDIU	R12,R11,1					F	F	F	D	D	D	D	I	X0	X1	X2	X3	W		
5	ADDIU	R13,R12,1								F	F	F	F	D	I	X0	X1	X2	X3	W	
6	ADDIU	R14,R12,2												F	D	I	X0	X1	X2	X3	W

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.



```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2	1	1					
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2	1	1					
5	3	2	1	1					
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2	1	1					
5	3	2		1	1				
6	3	2		1	1				
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2	1	1					
5	3	2		1	1				
6	3	2			1	1			
7	4	3	1		1	1			
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2	1	1					
5	3	2		1	1				
6	3	2			1	1			
7	4	3	1		1	1			
8	4	3		1		1			
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.



```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2	1	1					
5	3	2		1	1				
6	3	2			1	1			
7	4	3	1		1	1			
8	4	3		1		1			
9	4	3			1				
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2	1	1					
5	3	2		1	1				
6	3	2			1	1			
7	4	3	1		1	1			
8	4	3		1		1			
9	4	3			1				
10	4	3				1			
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2	1	1					
5	3	2		1	1				
6	3	2		1	1				
7	4	3	1		1	1			
8	4	3		1		1			
9	4	3			1				
10	4	3			1				
11	5	4	1			1			
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2	1	1					
5	3	2		1	1				
6	3	2			1	1			
7	4	3	1		1	1			
8	4	3		1		1			
9	4	3			1				
10	4	3				1			
11	5	4	1			1			
12	6	5	1	1					
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

```

0 MUL    R1, R2, R3 F  D  I  Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1    F  D  I  X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4    F  D  I  I  I  Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6    F  D  D  D  I  I  I  I  Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1      F  F  F  D  D  D  D  I  X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1      F  F  F  F  D  I  X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2      F  D  I  X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2	1	1					
5	3	2		1	1				
6	3	2			1	1			
7	4	3		1		1	1		
8	4	3			1		1		
9	4	3				1			
10	4	3					1		
11	5	4		1				1	
12	6	5		1	1				
13		6		1	1	1			
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

```

0 MUL    R1, R2, R3 F  D  I  Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1    F  D  I  X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4    F  D  I  I  I  Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6    F  D  D  D  I  I  I  I  Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1      F  F  F  D  D  D  D  I  X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1      F  F  F  F  D  I  X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2      F  D  I  X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2	1	1					
5	3	2		1	1				
6	3	2			1	1			
7	4	3	1		1	1			
8	4	3		1		1			
9	4	3			1				
10	4	3				1			
11	5	4	1			1			
12	6	5	1	1					
13		6	1	1	1				
14			1	1	1	1			
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

```

0 MUL    R1, R2, R3 F  D  I  Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1    F  D  I  X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4    F  D  I  I  I  Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6    F  D  D  D  I  I  I  I  Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1      F  F  F  D  D  D  D  I  X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1      F  F  F  F  D  I  X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2      F  D  I  X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2	1	1					
5	3	2		1	1				
6	3	2			1	1			
7	4	3	1		1	1			
8	4	3		1		1			
9	4	3			1				
10	4	3				1			
11	5	4	1			1			
12	6	5	1	1					
13		6	1	1	1				
14			1	1	1	1			
15				1	1	1	1		
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2	1	1					
5	3	2		1	1				
6	3	2			1	1			
7	4	3	1		1	1			
8	4	3		1		1			
9	4	3			1				
10	4	3				1			
11	5	4	1			1			
12	6	5	1	1					
13		6	1	1	1				
14			1	1	1	1			
15				1	1	1	1		
16					1	1	1		
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.



```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2	1	1					
5	3	2		1	1				
6	3	2			1	1			
7	4	3	1		1	1			
8	4	3		1		1			
9	4	3			1				
10	4	3				1			
11	5	4	1			1			
12	6	5	1	1					
13		6	1	1	1				
14			1	1	1	1			
15				1	1	1	1		
16					1	1	1		
17						1	1		
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 X1 X2 X3 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 X1 X2 X3 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 X1 X2 X3 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I X0 X1 X2 X3 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2	1	1					
5	3	2		1	1				
6	3	2			1	1			
7	4	3	1		1	1			
8	4	3		1		1			
9	4	3			1				
10	4	3				1			
11	5	4	1			1			
12	6	5	1	1					
13		6	1	1	1				
14			1	1	1	1			
15				1	1	1	1		
16					1	1	1		
17						1	1		
18							1		

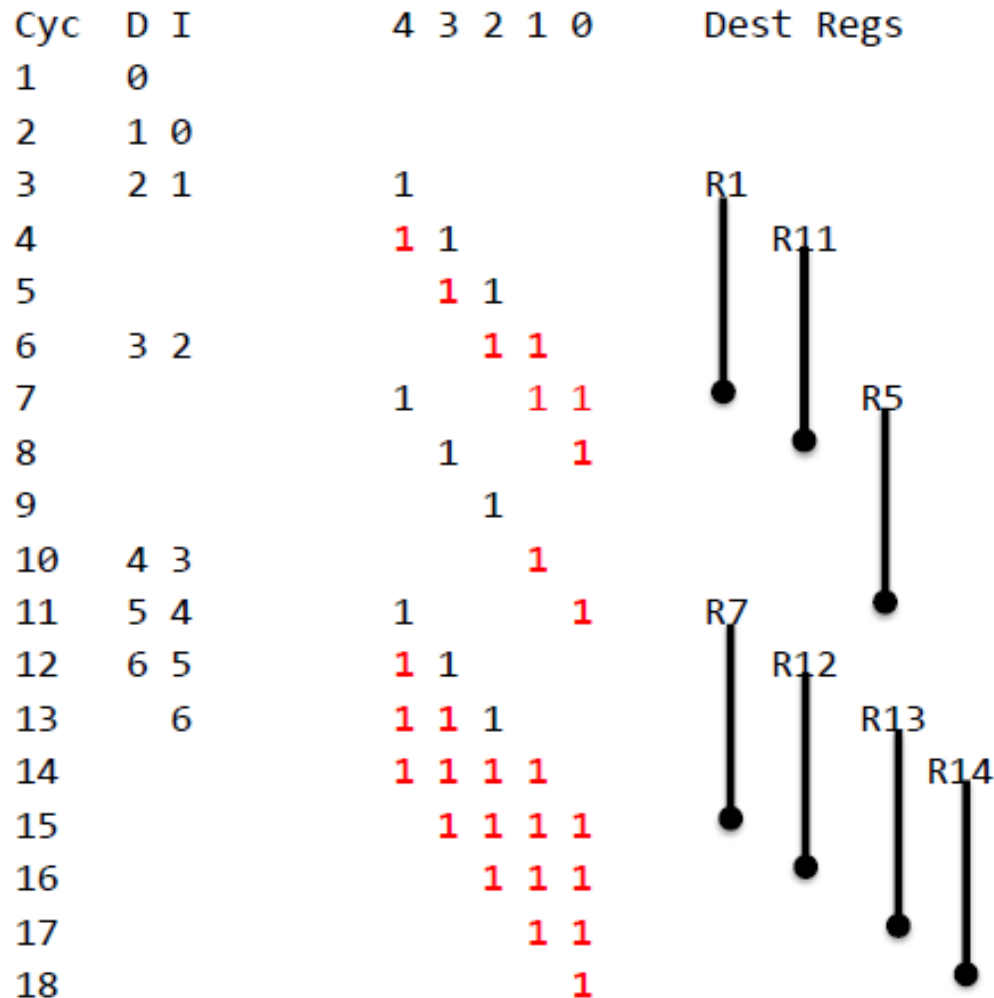
**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

0	MUL	R1, R2, R3	F	D	I	Y0	Y1	Y2	Y3	W									
1	ADDIU	R11, R10, 1		F	D	I	X0	X1	X2	X3	W								
2	MUL	R5, R1, R4		F	D	I	I	I	Y0	Y1	Y2	Y3	W						
3	MUL	R7, R5, R6			F	D	D	D	I	I	I	I	Y0	Y1	Y2	Y3	W		
4	ADDIU	R12, R11, 1				F	F	F	D	D	D	D	I	X0	X1	X2	X3	W	
5	ADDIU	R13, R12, 1							F	F	F	F	D	I	X0	X1	X2	X3	W
6	ADDIU	R14, R12, 2								F	D	I	X0	X1	X2	X3	W		



**D:** Qual instrução em Decode.

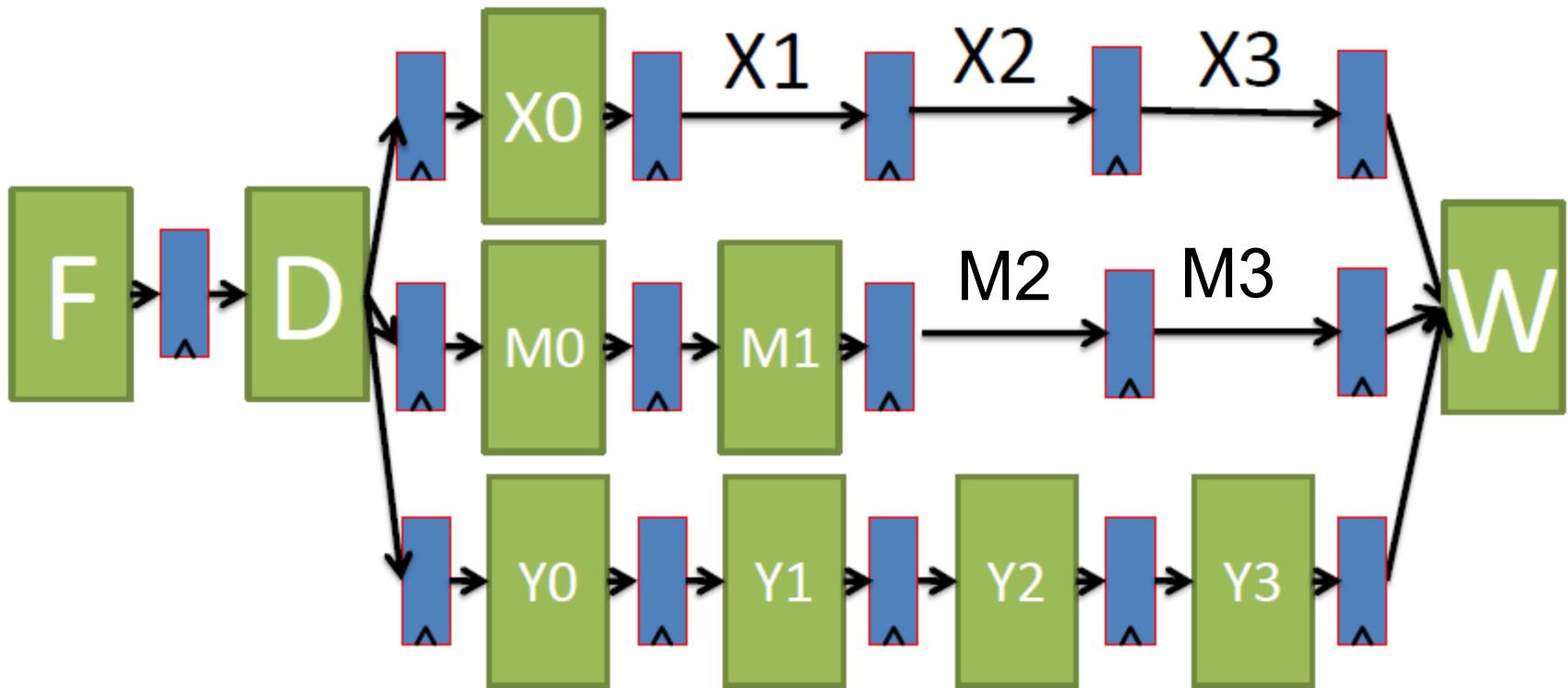
**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

# Processador I4

- In-order (Multiplicação em 4 estágios)

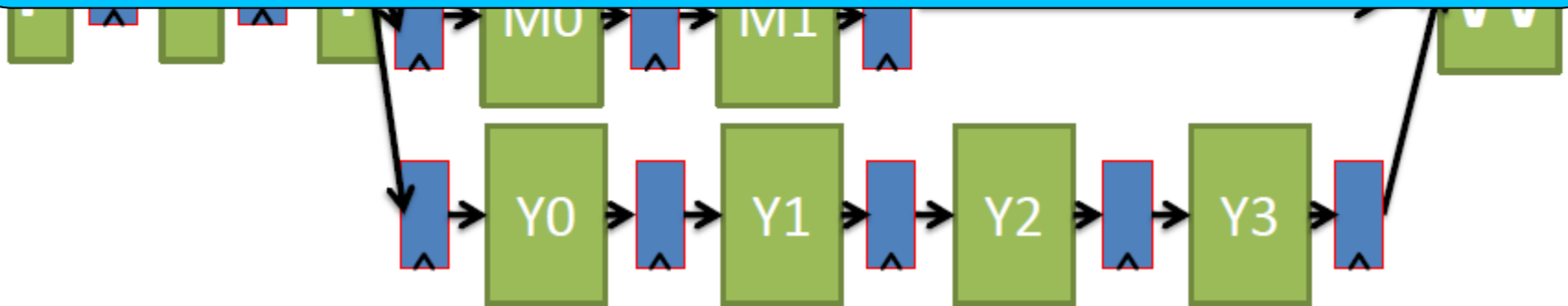


Considerar encaminhamento grande.

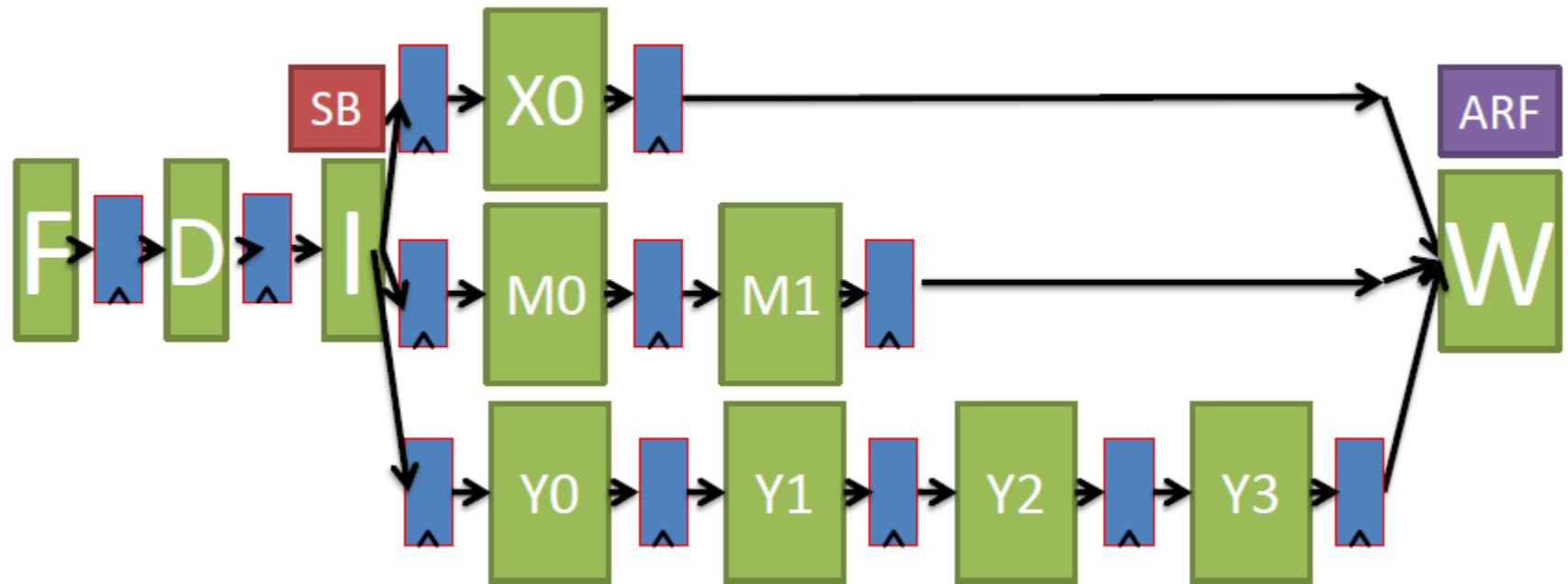
# Processador I2O2

- In-order Frontend/Issue
- Out-of-Order Writeback/Commit

Semelhante ao caso de execução em múltiplos ciclos.



# Processador I2O2



ARF

R

W

SB

R

R/W

W

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**



```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1	1						
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2		1		1			
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2		1		1			
5	3	2			1		1		
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1	1						
4	3	2	1	1					
5	3	2		1	1				
6	3	2			1				
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2		1		1			
5	3	2			1		1		
6	3	2				1			
7	4	3		1			1		
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2		1		1			
5	3	2			1		1		
6	3	2				1			
7	4	3		1			1		
8	4	3		1					
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2		1		1			
5	3	2			1		1		
6	3	2				1			
7	4	3		1			1		
8	4	3		1					
9	4	3			1				
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**



```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2		1		1			
5	3	2			1		1		
6	3	2				1			
7	4	3		1			1		
8	4	3		1					
9	4	3			1				
10	4	3				1			
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2		1		1			
5	3	2			1		1		
6	3	2				1			
7	4	3		1			1		
8	4	3		1					
9	4	3			1				
10	4	3				1			
11	5	4		1			1		
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1	1						
4	3	2	1			1			
5	3	2			1		1		
6	3	2				1			
7	4	3	1				1		
8	4	3	1						
9	4	3			1				
10	4	3				1			
11	5	4	1				1		
12	6	5	1		1				
13									
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1	1						
4	3	2		1		1			
5	3	2			1		1		
6	3	2				1			
7	4	3	1				1		
8	4	3		1					
9	4	3			1				
10	4	3				1			
11	5	4	1				1		
12	6	5		1		1			
13		6			1	1	1		
14									
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2		1		1			
5	3	2			1		1		
6	3	2				1			
7	4	3		1			1		
8	4	3		1					
9	4	3			1				
10	4	3				1			
11	5	4		1			1		
12	6	5		1		1			
13		6			1	1	1		
14		6				1	1		
15									
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2		1		1			
5	3	2			1		1		
6	3	2				1			
7	4	3		1			1		
8	4	3		1					
9	4	3			1				
10	4	3				1			
11	5	4		1			1		
12	6	5		1		1			
13		6			1	1	1		
14		6				1	1		
15						1	1		
16									
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**

```

0 MUL    R1, R2, R3 F D I Y0 Y1 Y2 Y3 W
1 ADDIU  R11,R10,1   F D I X0 W
2 MUL    R5, R1, R4   F D I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
3 MUL    R7, R5, R6   F D D D I I I I Y0 Y1 Y2 Y3 W
4 ADDIU  R12,R11,1    F F F D D D D I X0 W
5 ADDIU  R13,R12,1    F F F F D I X0 W
6 ADDIU  R14,R12,2    F D I I X0 W

```

Cyc	D	I	4	3	2	1	0	Dest	Regs
1	0								
2	1	0							
3	2	1		1					
4	3	2		1		1			
5	3	2			1		1		
6	3	2				1			
7	4	3		1			1		
8	4	3		1					
9	4	3			1				
10	4	3				1			
11	5	4		1			1		
12	6	5		1		1			
13		6			1	1	1		
14		6				1	1		
15						1	1		
16							1		
17									
18									

**D:** Qual instrução em Decode.

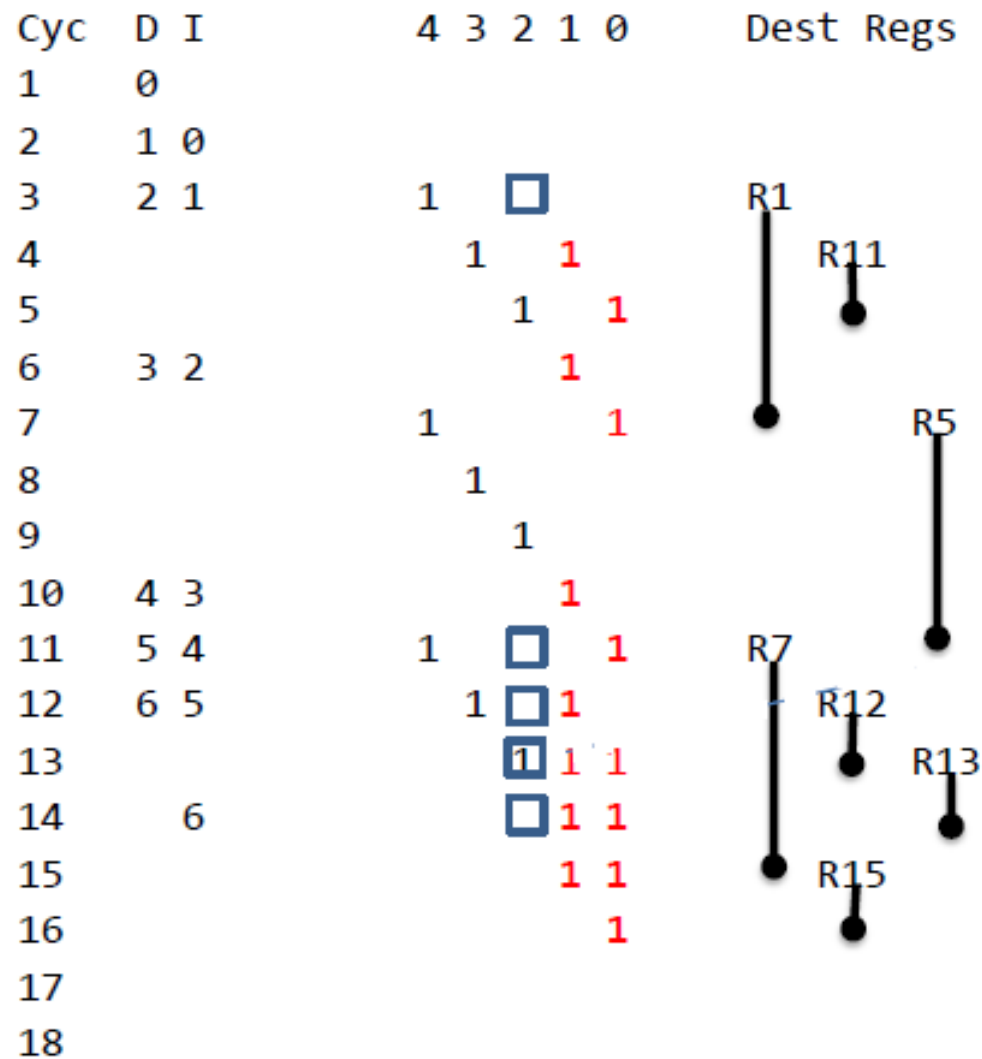
**I:** Qual instrução em Disparo.

**0 a 4:** Onde está o dado no pipeline da Unidade Funcional.

**Vermelho:** Dado está disponível.

**Agora para o I2O2**

0	MUL	R1, R2, R3	F	D	I	Y0	Y1	Y2	Y3	W								
1	ADDIU	R11,R10,1		F	D	I	X0	W										
2	MUL	R5, R1, R4		F	D	I	I	I	Y0	Y1	Y2	Y3	W					
3	MUL	R7, R5, R6			F	D	D	D	I	I	I	I	Y0	Y1	Y2	Y3	W	
4	ADDIU	R12,R11,1				F	F	F	D	D	D	D	I	X0	W			
5	ADDIU	R13,R12,1							F	F	F	F	D	I	X0	W		
6	ADDIU	R14,R12,2											F	D	I	I	X0	W





# Agradecimiento

David Wentzlaff (Princeton University)