



**Universidade Federal de Santa Catarina**  
**Centro Tecnológico**  
Departamento de Informática e Estatística  
Curso de Graduação em Ciências da Computação



# **Sistemas Digitais**

**INE 5406**

## **Aula 13-T**

**5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT. Estudo de Caso. Alocação de Unidades Funcionais, de Registradores, de Barramentos, *Chaining*.**

**Prof. José Luís Güntzel**  
**[guntzel@inf.ufsc.br](mailto:guntzel@inf.ufsc.br)**

**[www.inf.ufsc.br/~guntzel/ine5406/ine5406.html](http://www.inf.ufsc.br/~guntzel/ine5406/ine5406.html)**

# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

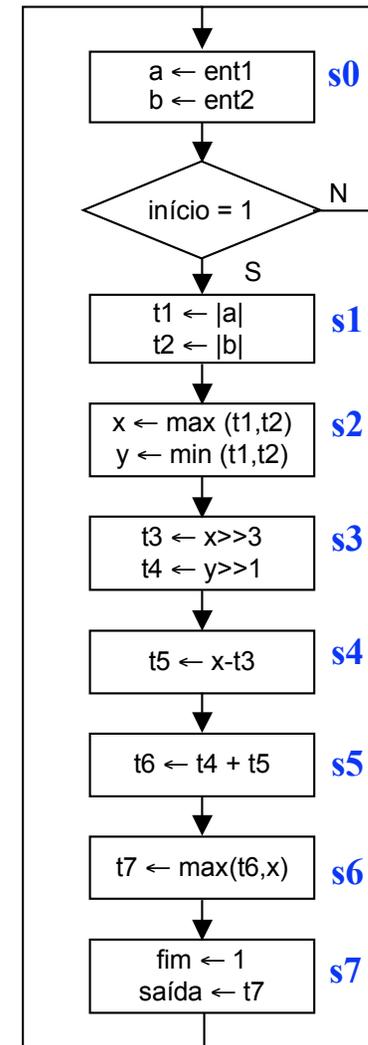
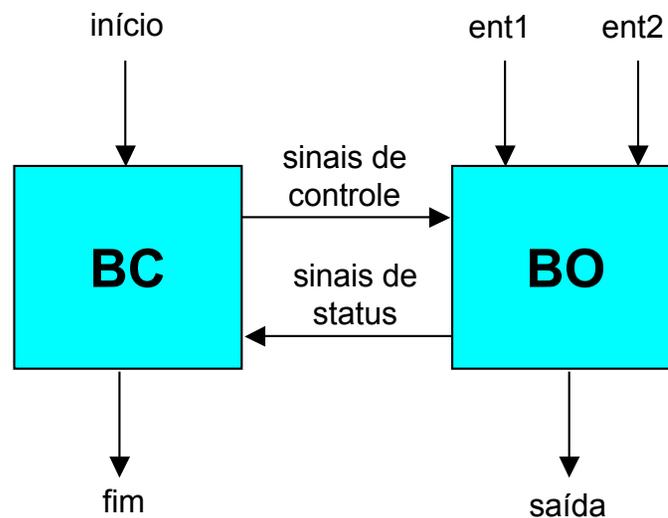
## Exemplo 2

### Aproximação da raiz quadrada (SRA)

$$\sqrt{a^2 + b^2} \approx \max((0,875x + 0,5y), x)$$

onde  $x = \max(|a|, |b|)$  e  $y = \min(|a|, |b|)$

### Diagrama de blocos (interfaces)

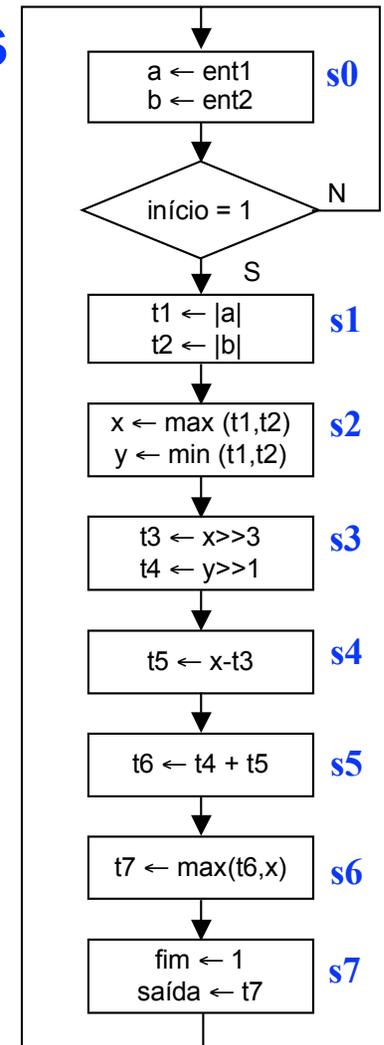


# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de Registradores

Tempo de vida das variáveis

Variável ↓ / estado →	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
a								
b								
t1								
t2								
x								
y								
t3								
t4								
t5								
t6								
t7								
número de variáveis vivas								



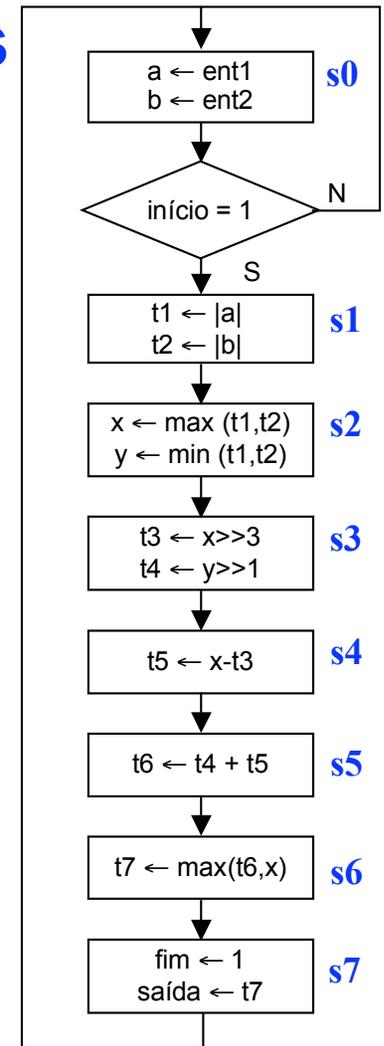
# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de Registradores

Tempo de vida das variáveis

Variável ↓ / estado →	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
a		X						
b		X						
t1			X					
t2			X					
x				X	X	X	X	
y				X				
t3					X			
t4					X	X		
t5						X		
t6							X	
t7								X
número de variáveis vivas	0	2	2	2	3	3	2	1

**Número mínimo de registradores = 3**

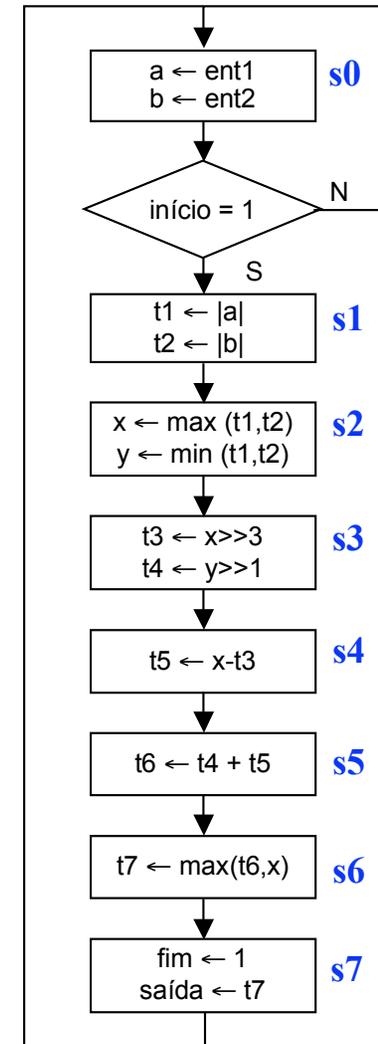


# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## Exemplo 2: Alocação de Unidades Funcionais

Tabela de uso dos operadores

Estado→ ↓ Operação	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	número max. de unidades por estado
		2							2
min			1						1
max			1				1		1
>>1				1					1
>>3				1					1
-					1				1
+						1			1
número de operações	0	2	2	2	1	1	1		



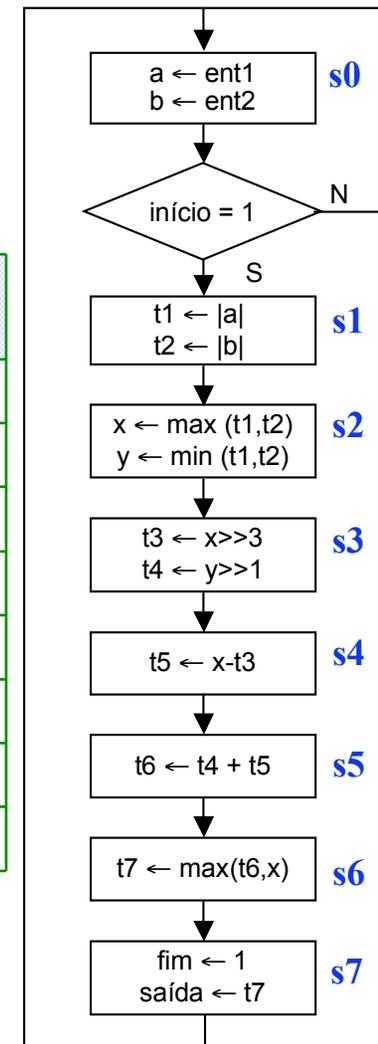
# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## Exemplo 2: Rede de Interconexão (Alocação de Barramentos e/ou Seletores)

Tabela de Conectividade

Variável→ ↓ operação	a	b	t1	t2	x	y	t3	t4	t5	t6	t7
	I		O								
		I		O							
max			I	I	I/O					I	O
min			I	I		O					
>>3					I		O				
>>1						I		O			
-					I		I		O		
+								I	I	O	

Conexões de entrada: **14** Conexões de saída: **9** Total: **23**  
 Porém, apenas alguns poucas são usadas a cada estado.

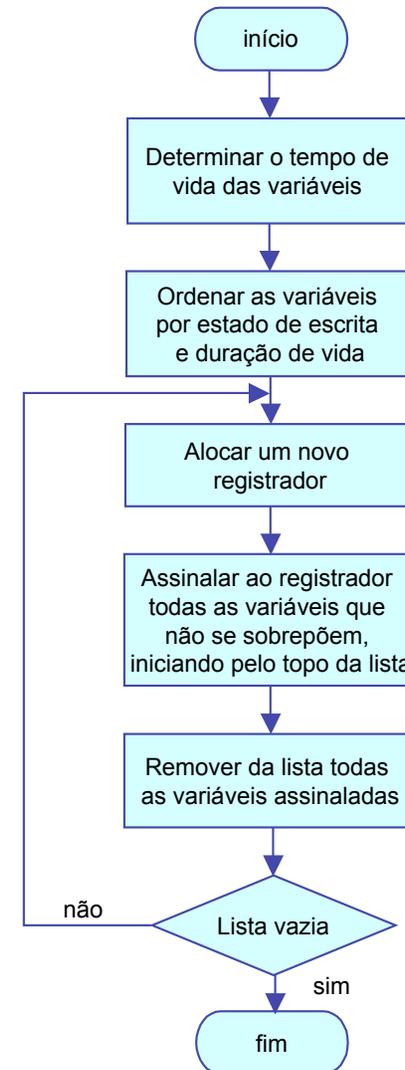


# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de Registradores

O algoritmo *left-edge*

- Agrupamento de variáveis
- Compartilhamento de registradores



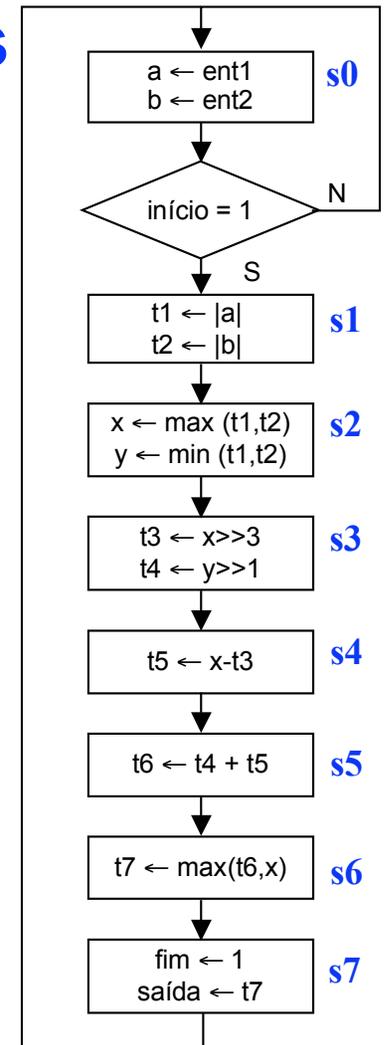
# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## Exemplo 2: Alocação de Registradores

Tempo de vida das variáveis

Variável ↓ / estado →	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
a		X						
b		X						
t1			X					
t2			X					
x				X	X	X	X	
y				X				
t3					X			
t4					X	X		
t5						X		
t6							X	
t7								X
número de variáveis vivas	0	2	2	2	3	3	2	1

**Número mínimo de registradores = 3**

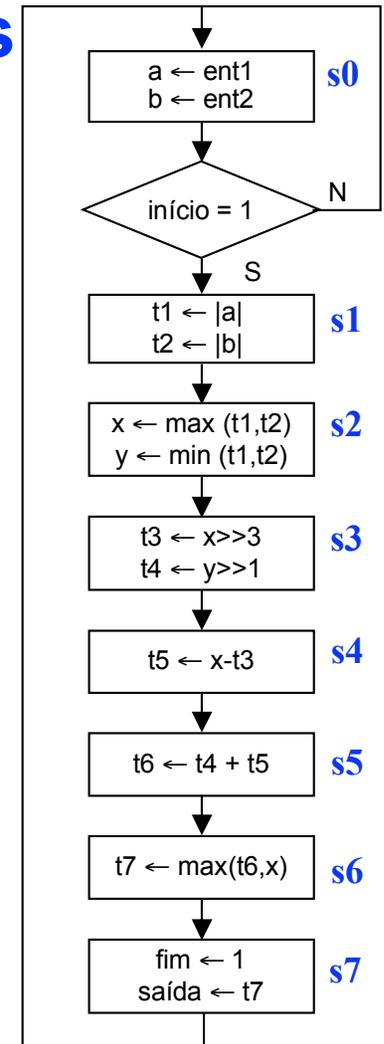


# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## Exemplo 2: Alocação de Registradores

Lista ordenada das variáveis, segundo o algoritmo *left-edge*

Variável ↓ / estado →	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
a		X						
b		X						
t1			X					
t2			X					
x				X	X	X	X	
y				X				
t4					X	X		
t3					X			
t5						X		
t6							X	
t7								X
número de variáveis vivas	0	2	2	2	3	3	2	1



# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de Registradores

- Alocar um novo registrador
- Assinalar ao registrador todas as variáveis que não se sobrepõem, iniciando pelo topo da lista

Variável ↓ / estado →	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
a		X						
b		X						
t1			X					
t2			X					
x				X	X	X	X	
y				X				
t4					X	X		
t3					X			
t5						X		
t6							X	
t7								X
número de variáveis vivas	0	2	2	2	3	3	2	1

**R1:**  
a, t1, x, t7

# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de Registradores

- Retirando da lista as variáveis já agrupadas

Variável ↓ / estado →	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
b		X						
t2			X					
y				X				
t4					X	X		
t3					X			
t5						X		
t6							X	
número de variáveis vivas	0	2	2	2	3	3	2	1

**R1:**  
a, t1, x, t7

# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de Registradores

- Alocar um novo registrador
- Assinalar ao registrador todas as variáveis que não se sobrepõem, iniciando pelo topo da lista

Variável ↓ / estado →	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
b		X						
t2			X					
y				X				
t4					X	X		
t3					X			
t5						X		
t6							X	
número de variáveis vivas	0	2	2	2	3	3	2	1

**R1:**

a, t1, x, t7

**R2:**

b, t2, y, t4, t6

# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de Registradores

- Retirando da lista as variáveis já agrupadas

Variável ↓ / estado →	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
t3					x			
t5						x		
número de variáveis vivas	0	2	2	2	3	3	2	1

**R1:**  
a, t1, x, t7

**R2:**  
b, t2, y, t4, t6

# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de Registradores

- Alocar um novo registrador
- Assinalar ao registrador todas as variáveis que não se sobrepõem, iniciando pelo topo da lista

Variável ↓ / estado →	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
t3					x			
t5						x		
número de variáveis vivas	0	2	2	2	3	3	2	1

**R1:**  
a, t1, x, t7

**R2:**  
b, t2, y, t4, t6

**R3:**  
t3, t5

# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

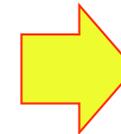
## ▶ Exemplo 2: Alocação de Registradores

- Retirando da lista as variáveis já agrupadas

**Lista Vazia! (Fim do Algoritmo...)**

Variável ↓ / estado →	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
número de variáveis vivas	0	2	2	2	3	3	2	1

Assinalamento de variáveis



**R1:**  
a, t1, x, t7

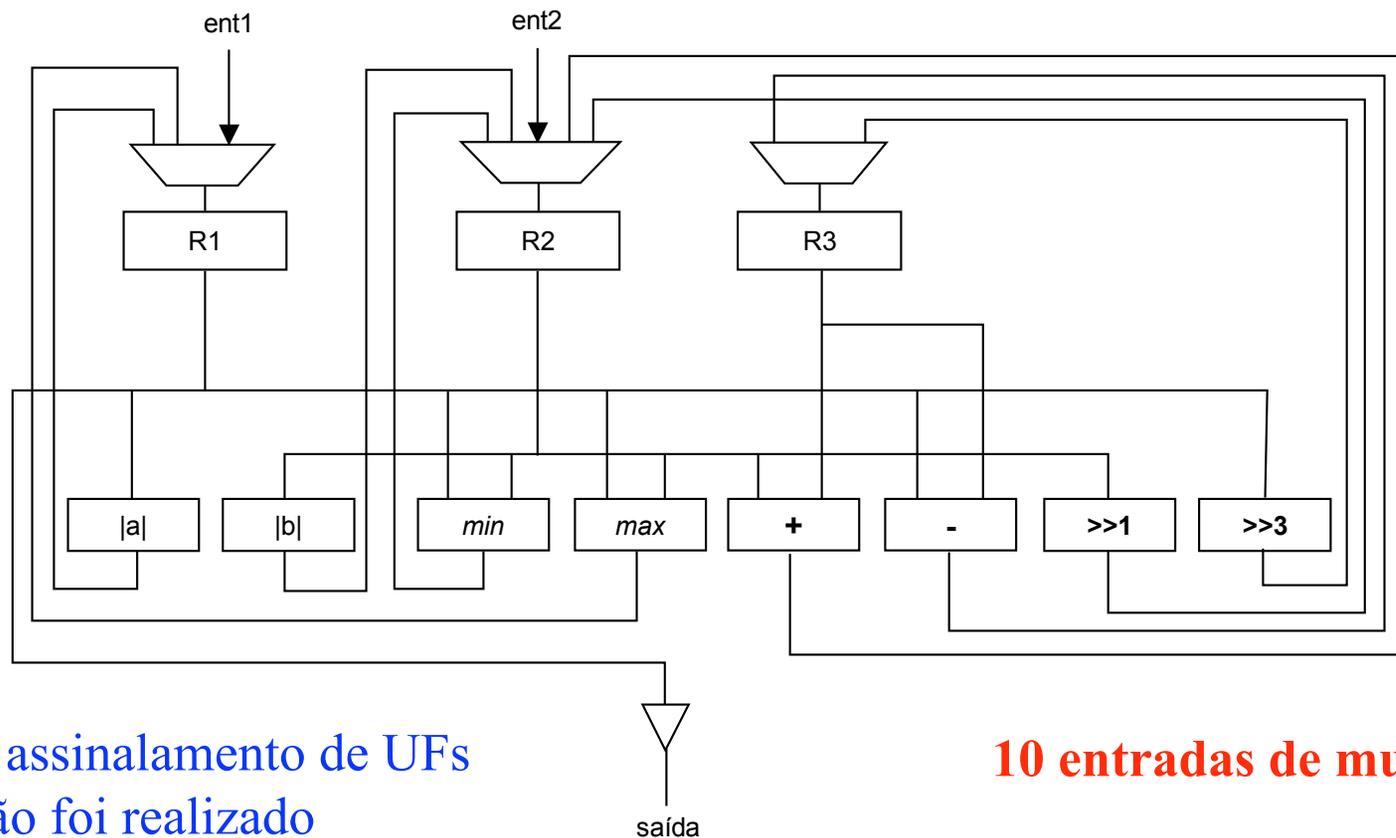
**R2:**  
b, t2, y, t4, t6

**R3:**  
t3, t5

# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de Registradores

Bloco Operativo resultante da aplicação do algoritmo *left-edge*



**OBS:** o assinalamento de UFs ainda não foi realizado

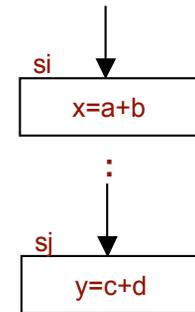
**10 entradas de mux**

# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

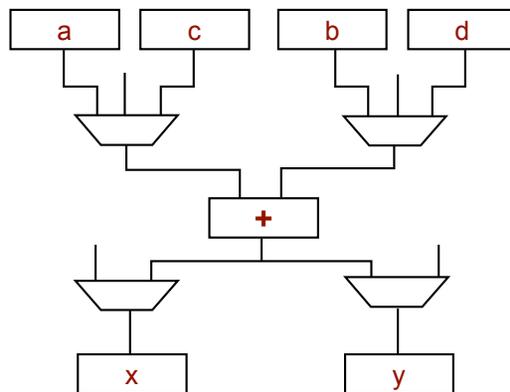
## ▶ Exemplo 2: Alocação de Registradores

### Filosofia:

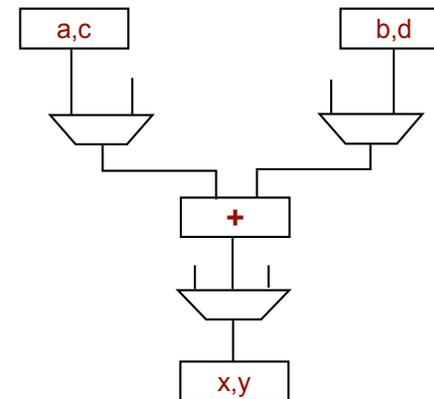
- Priorizar o agrupamento de variáveis que possuem fontes e/ou destinos comuns (para reduzir o número de entradas de mux)



(a) Fluxograma parcial



(b) Bloco operativo sem compartilhamento de registradores (10 entradas de mux)



(c) Bloco operativo com compartilhamento de registradores (7 entradas de mux)

# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de Registradores

### Uso de grafo de compatibilidade

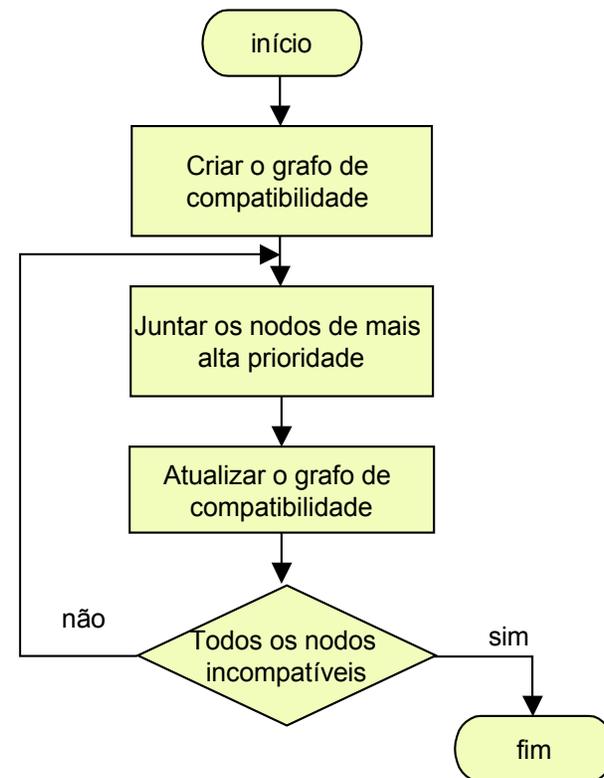
- Cada variável é representada por um nodo
- Aresta de incompatibilidade entre dois nodos (aresta pontilhada): indica variáveis cujos tempos de vida se sobrepõem
- Aresta de prioridade entre dois nodos: indica variáveis com tempos de vida que não se sobrepõem e que sevem como fonte ou como destino para as mesmas unidades funcionais

# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de Registradores

- Agrupamento de variáveis
- Compartilhamento de registradores

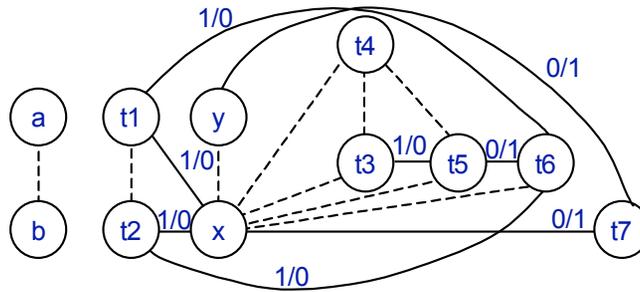
### O algoritmo de Particionamento do grafo de compatibilidade



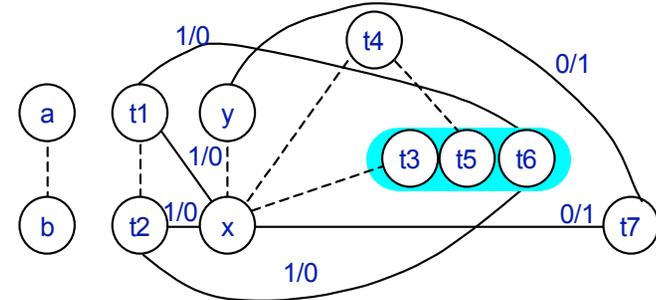
# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

Assumindo:

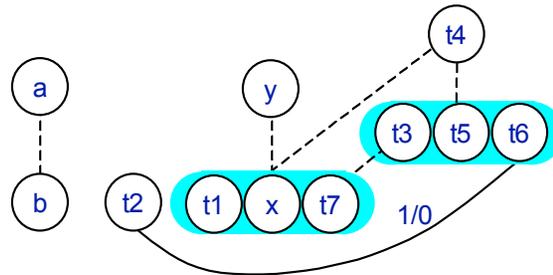
- Min/max
- +/-
- >>1 / >>3



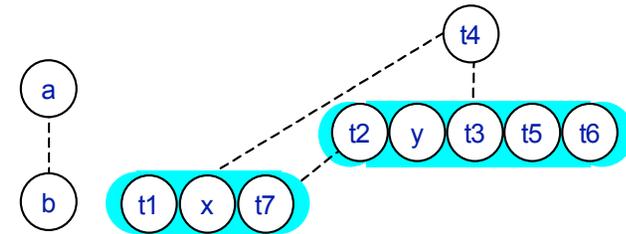
(a) Grafo de compatibilidade inicial



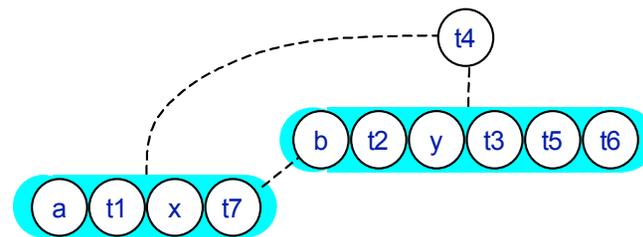
(b) Grafo de compatibilidade após agrupar t3, t5 e t6



(c) Grafo de compatibilidade após agrupar t1, x e t7



(d) Grafo de compatibilidade após agrupar t2 e y



(e) Grafo de compatibilidade final  
slide 13T.20

$$R1 = [ a , t1 , x , t7 ]$$

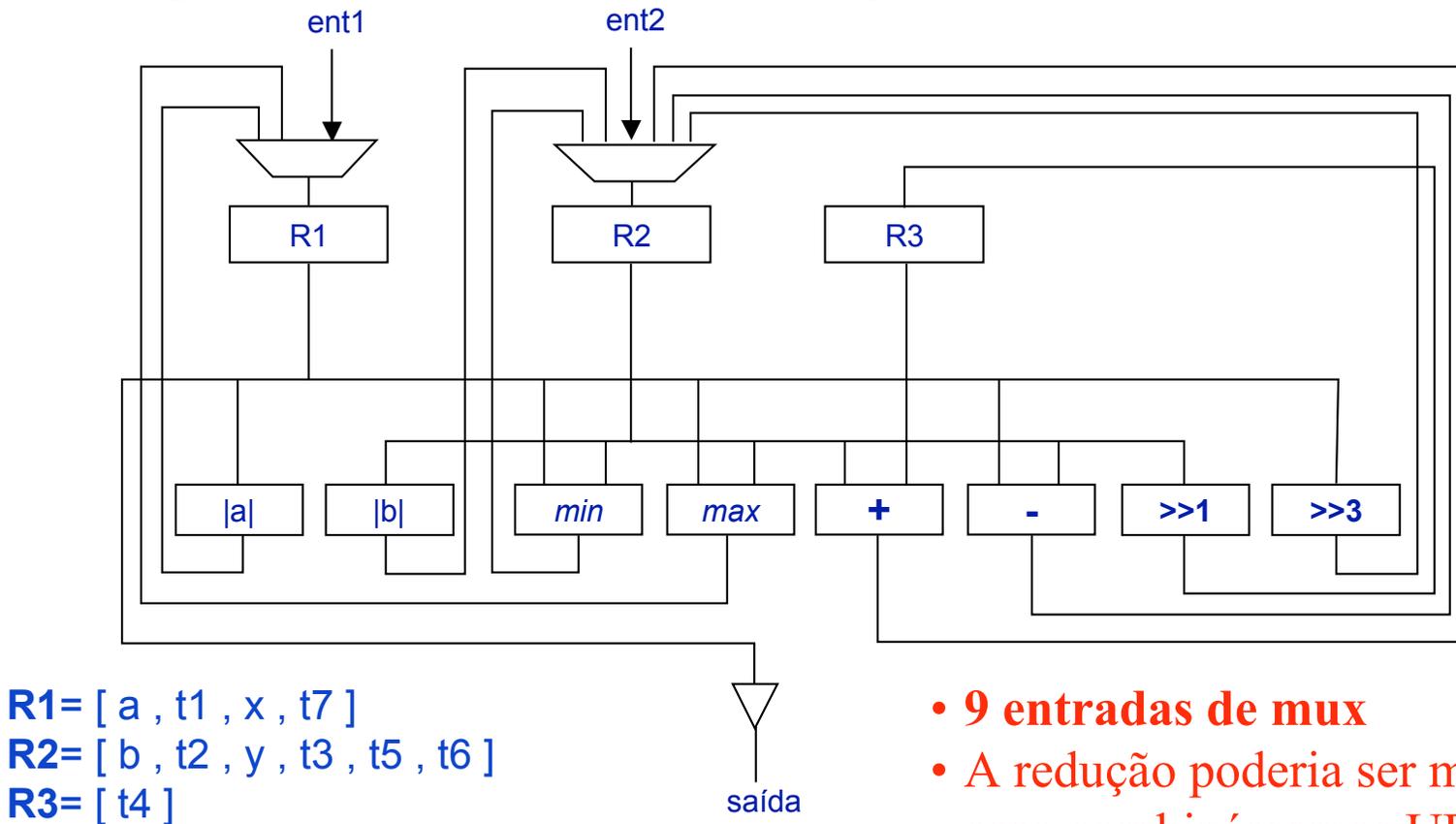
$$R2 = [ b , t2 , y , t3 , t5 , t6 ]$$

$$R3 = [ t4 ]$$

# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de Registradores

### Bloco Operativo Resultando do Algoritmo de Particionamento



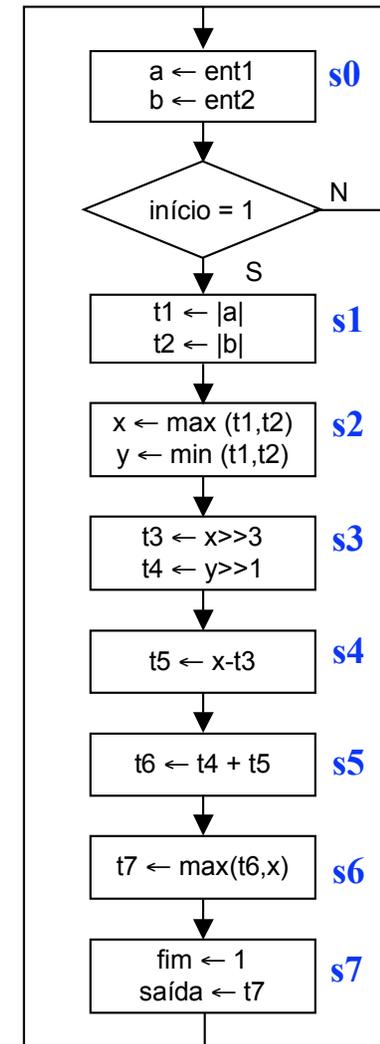
- 9 entradas de mux
- A redução poderia ser maior caso combinássemos UFs

# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de UFs

### Tabela de uso dos operadores

Estado→ ↓ Operação	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	número max. de unidades por estado
		2							2
min			1						1
max			1				1		1
>>1				1					1
>>3				1					1
-					1				1
+						1			1
número de operações	0	2	2	2	1	1	1		



# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de UFs

### Tabela de uso dos operadores

Estado→ ↓ Operação	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	número max. de unidades por estado
		2							2
min			1						1
max			1				1		1
>>1				1					1
>>3				1					1
-					1				1
+						1			1
número de operações	0	2	2	2	1	1	1		

### Solução trivial:

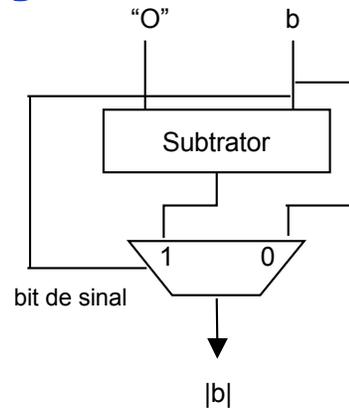
- 2 ||
- 1 min
- 1 max
- 1 >>1
- 1 >>3
- 1 +
- 1 -

**Será que há alguma vantagem em agrupar operadores?**

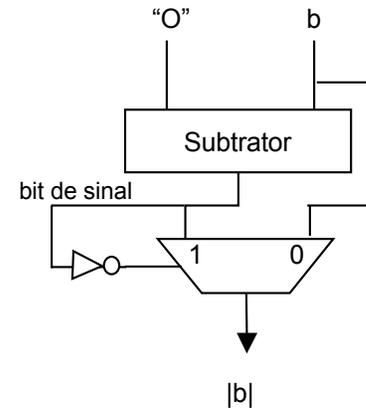
# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## Exemplo 2: Alocação de UFs

Opções para valor absoluto

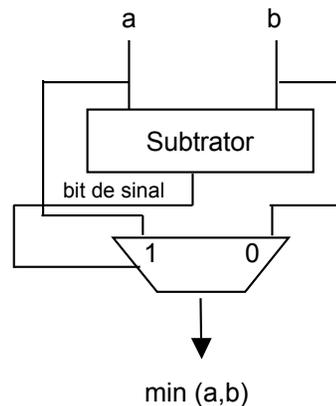


(a) Unidade de valor absoluto (versão 1)

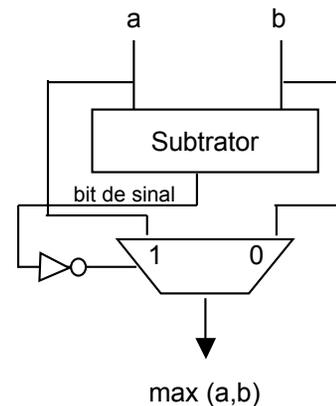


(b) Unidade de valor absoluto (versão 2)

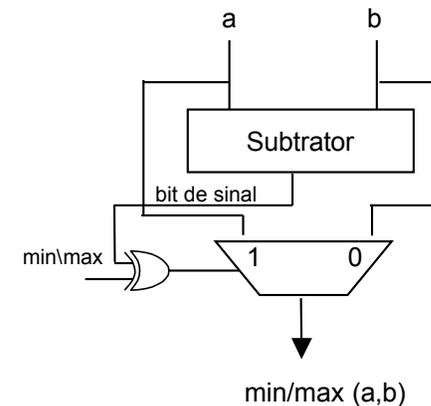
Opções para max e min



(c) Unidade min(a,b)



(d) Unidade max(a,b)

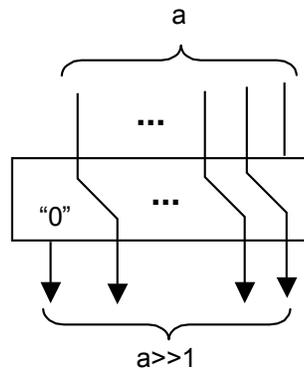


(e) Unidade min(a,b)/max(a,b)

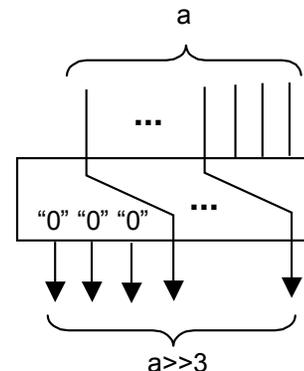
# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de UFs

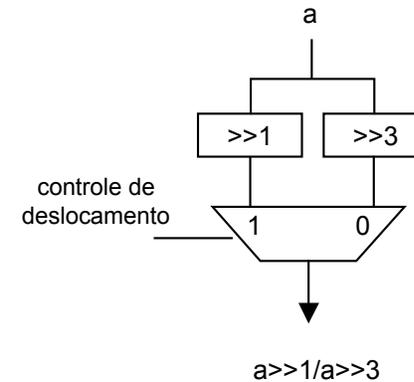
Opções para  
 $\gg 1$  e  $\gg 3$



(f) Deslocador de 1 bit

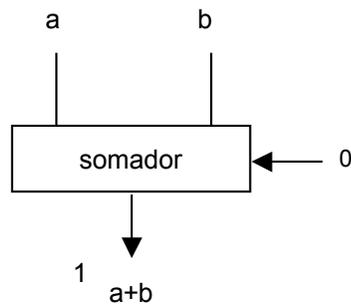


(g) Deslocador de 3 bits

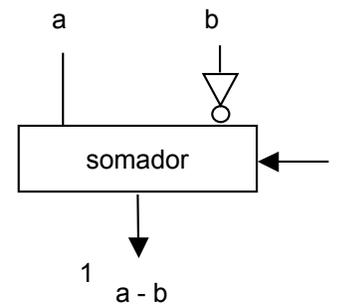


(h) Deslocador de 1 e de 3 bits

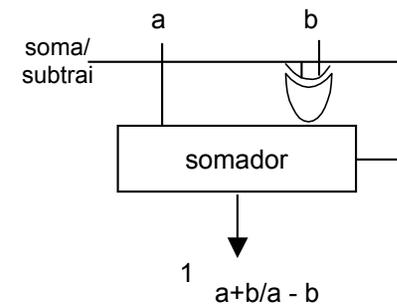
Opções para  
 $+$  e  $-$



(i) somador



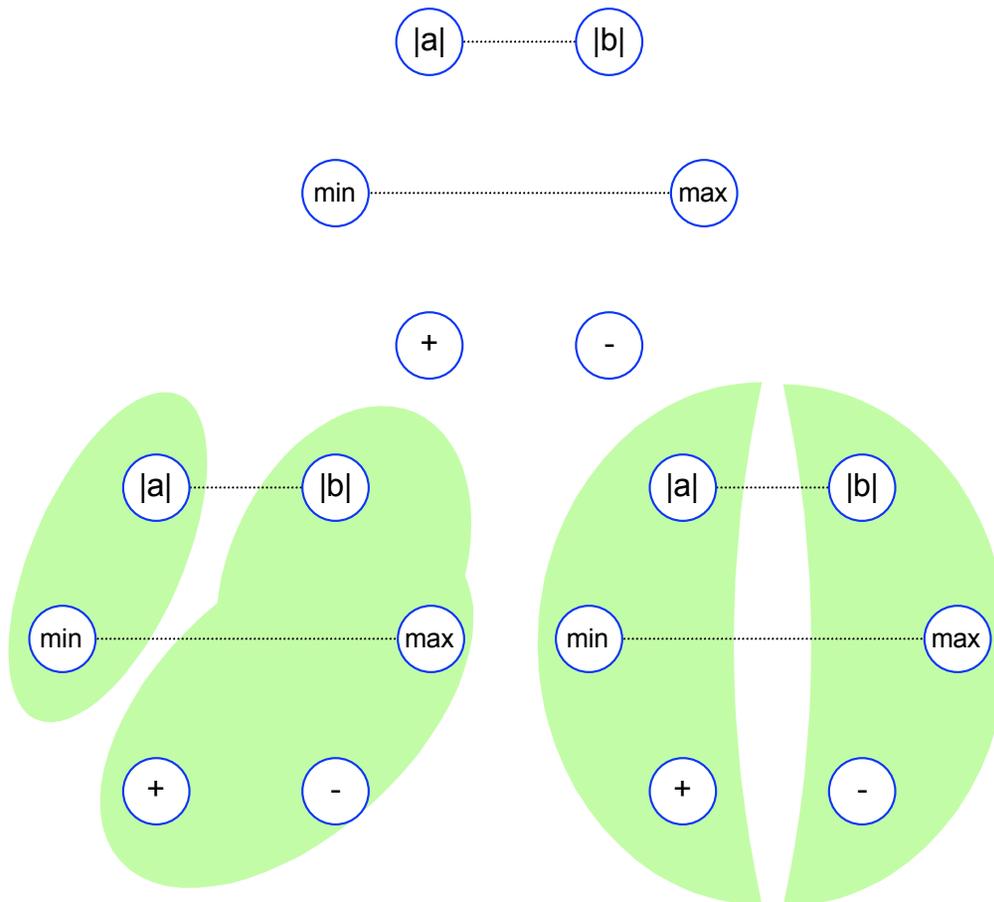
(j) subtrator



(k) somador/subtrator

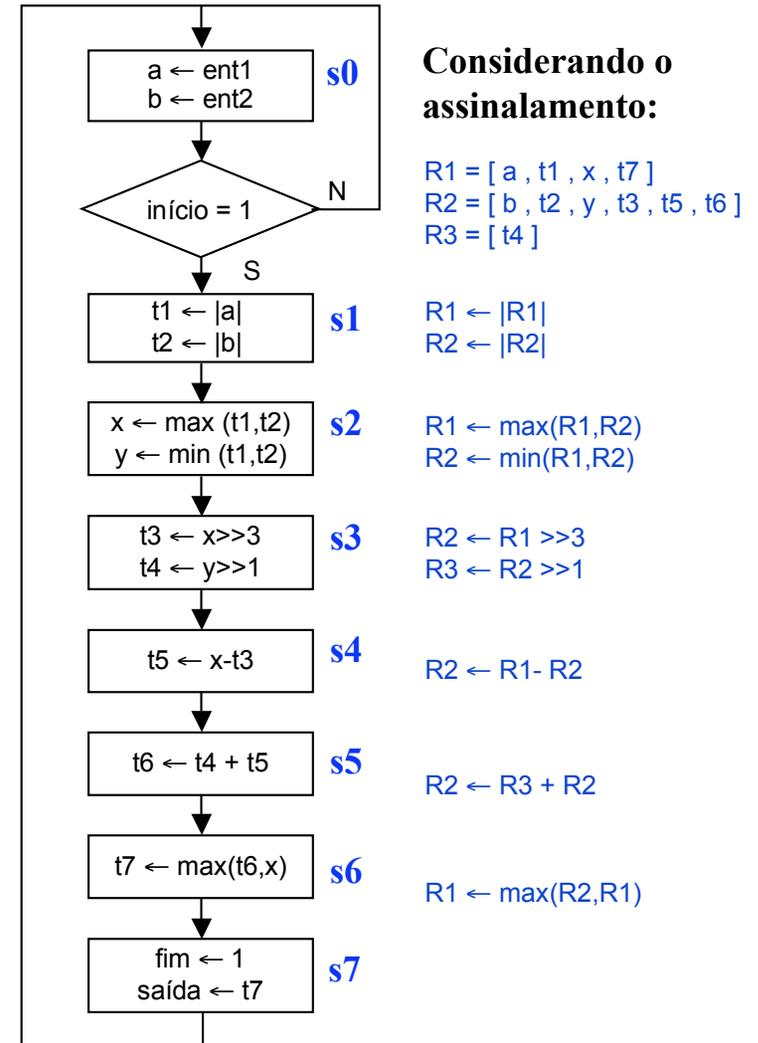
# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## Exemplo 2: Alocação de UFs Considerando Incompatibilidades



INE/CTC/UFSC  
Sistemas Digitais - semestre 2007/2

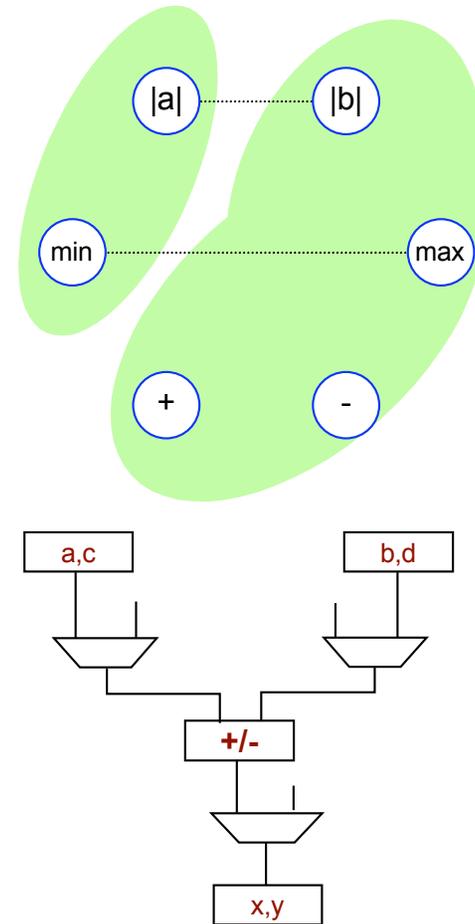
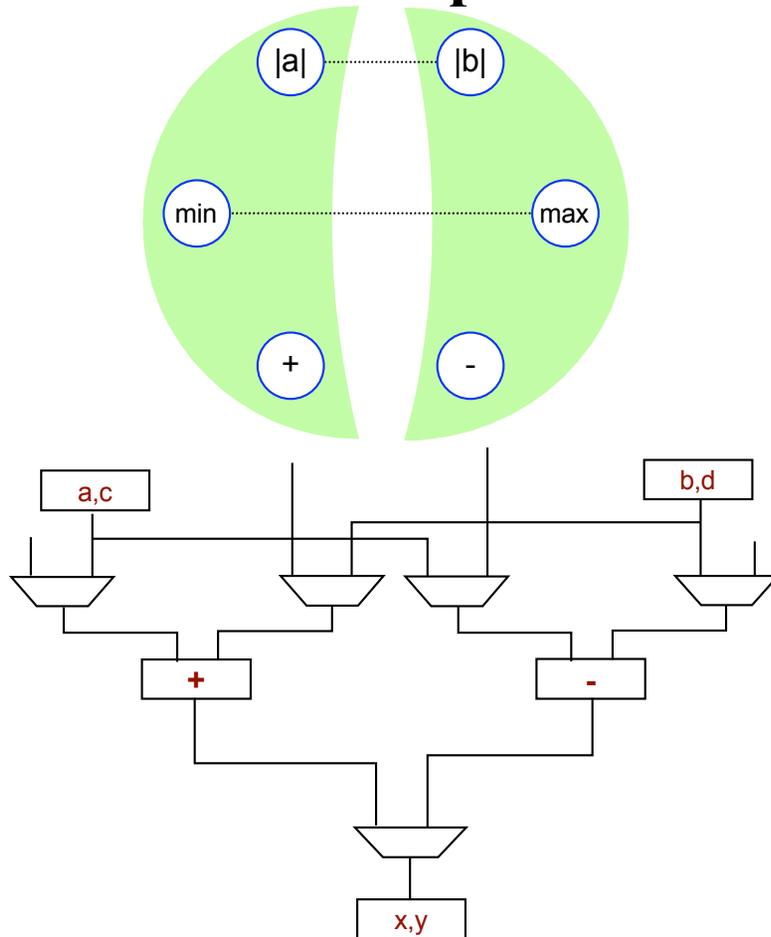
slide 13T.26



Prof. José Luís Güntzel

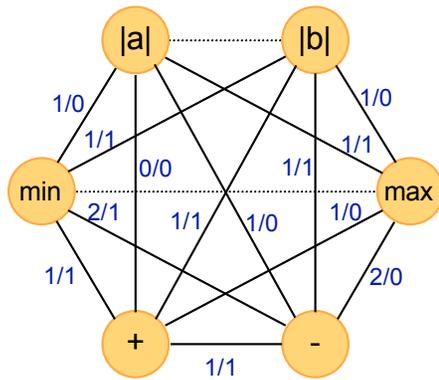
# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de UFs Considerando Incompatibilidades

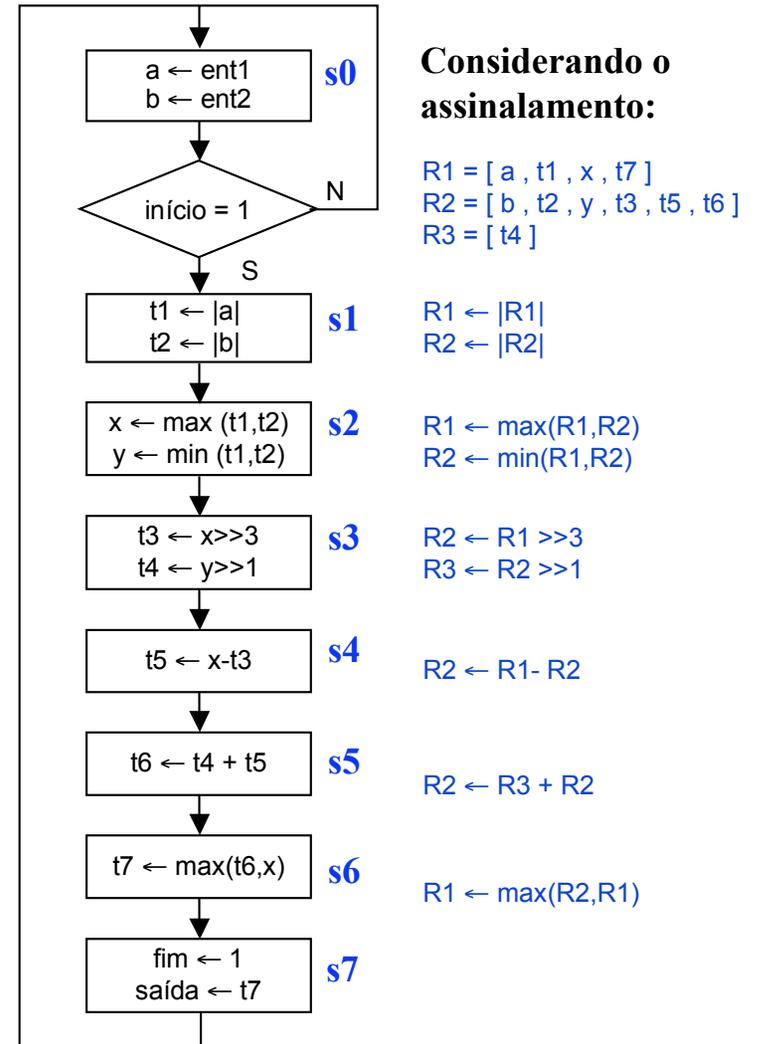
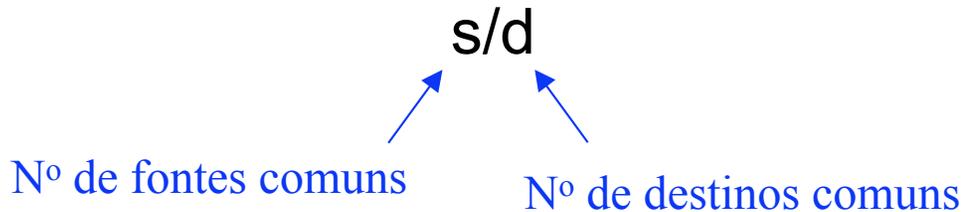


# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## Exemplo 2: Alocação de UFs Construção do grafo de restrições

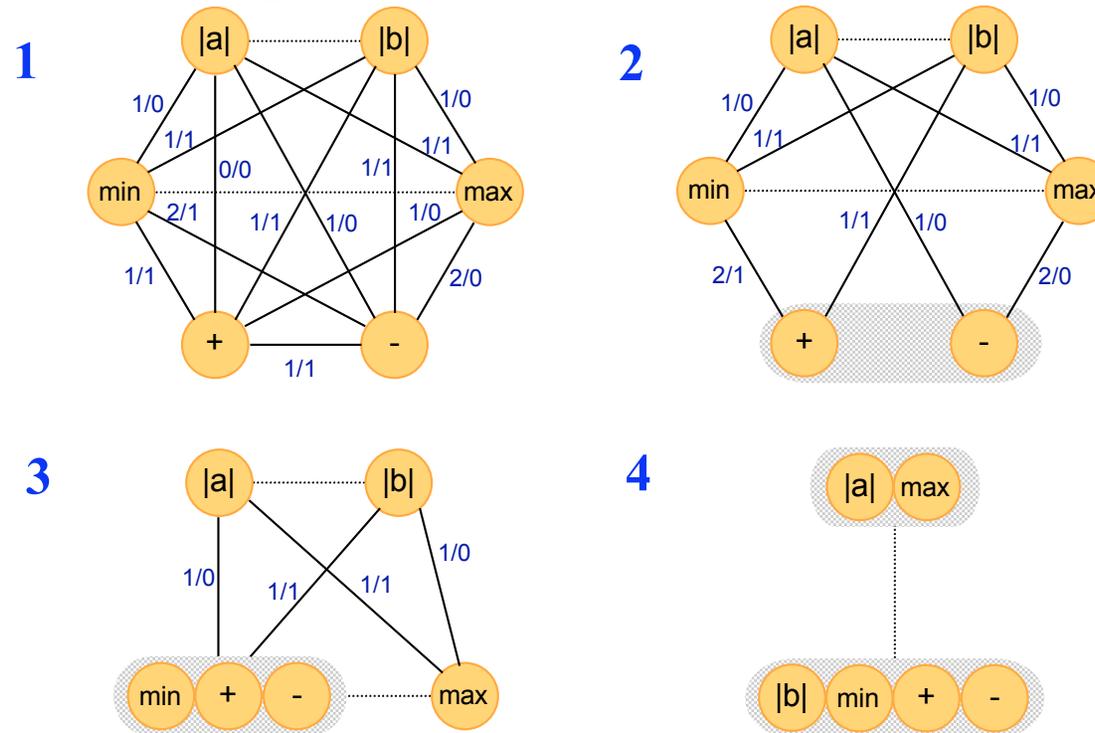


Pesos das arestas:



# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de UFs Particionamento do grafo de restrições



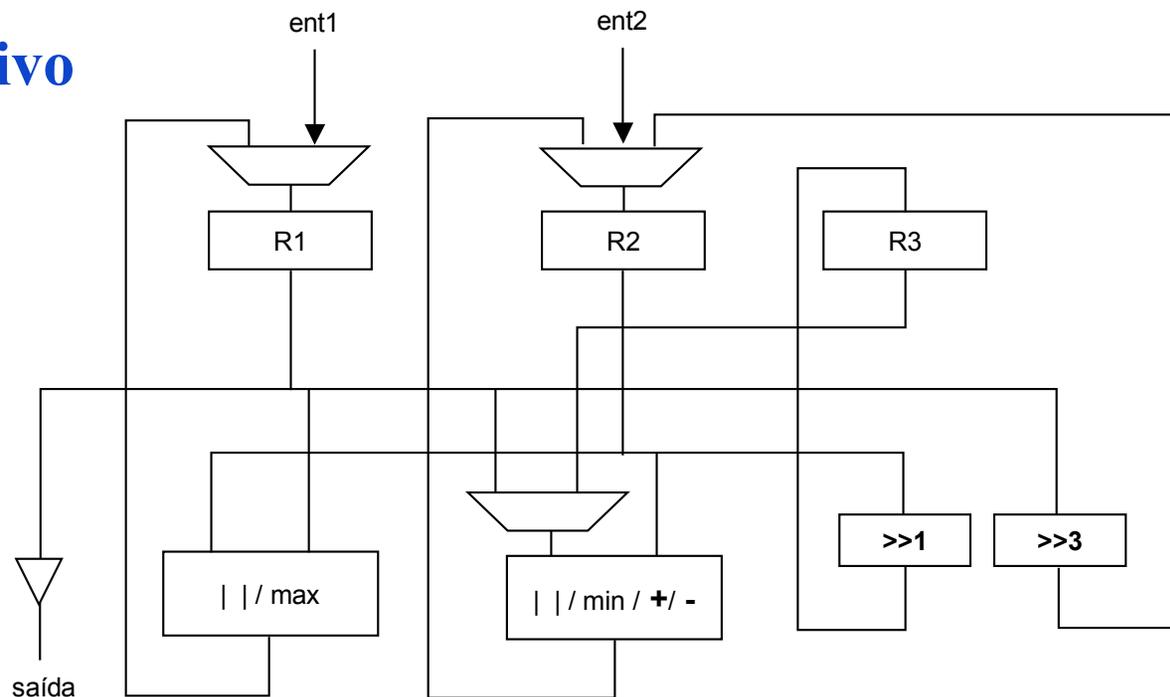
**Resultado:** UA1 = [ |b| / min / + / - ]  
UA2 = [ |a| / max ]

DESL1 = [ >>1 ]  
DESL2 = [ >>3 ]

# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de UFs

Bloco operativo  
resultante



7 entradas de mux

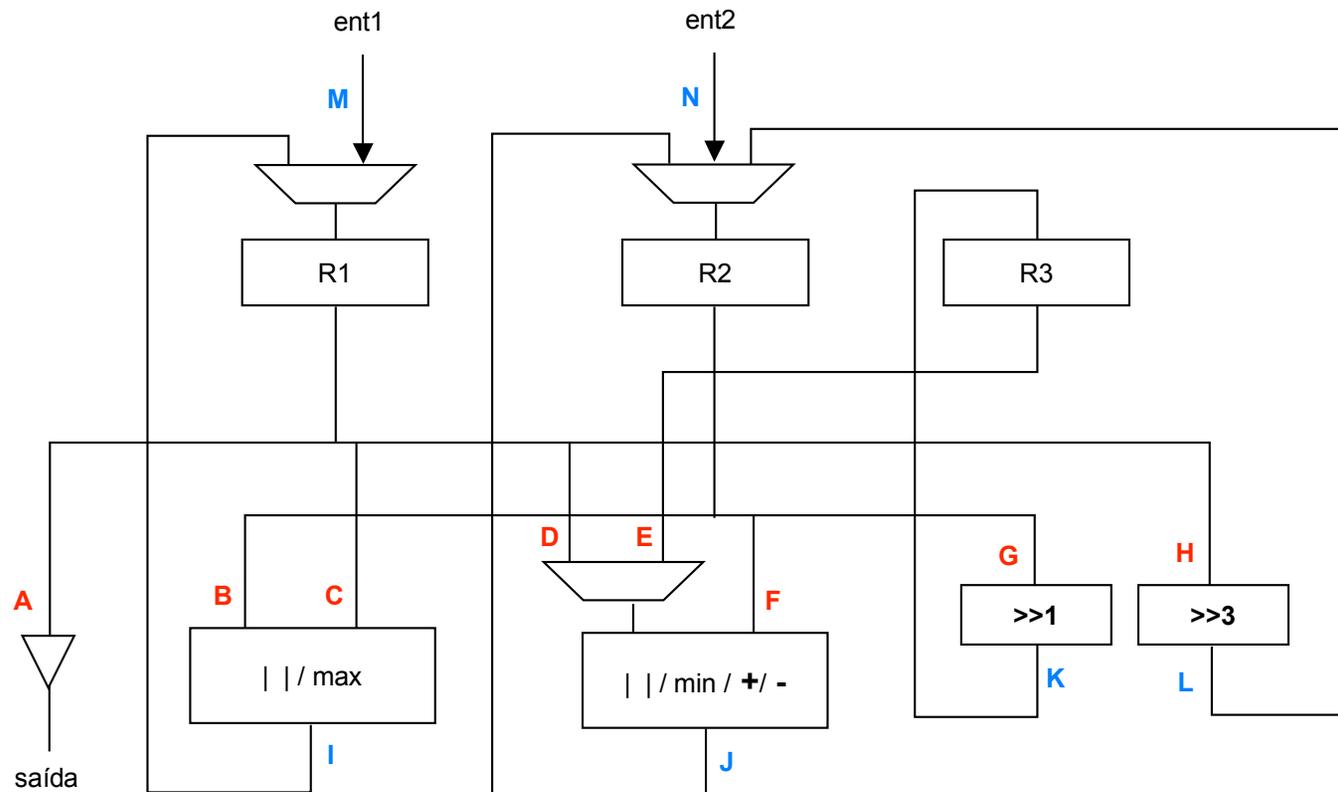
R1 = [ a , t1 , x , t7 ]  
R2 = [ b , t2 , y , t3 , t5 , t6 ]  
R3 = [ t4 ]

UA1 = [ |b| / min / + / - ]  
UA2 = [ |a| / max ]

DESL1 = [ >>1 ]  
DESL2 = [ >>3 ]

# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Alocação de Barramentos



# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

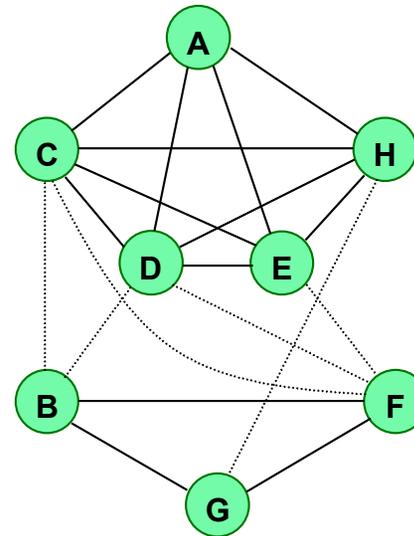
## ▶ Exemplo 2: Alocação de Barramentos

### Grafo de Restrições

	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
A								X
B			X				X	
C		X	X				X	
D			X		X			
E						X		
F		X	X		X	X		
G				X				
H				X				
I		X	X				X	
J		X	X		X	X		
K				X				
L				X				
M	X							
N	X							

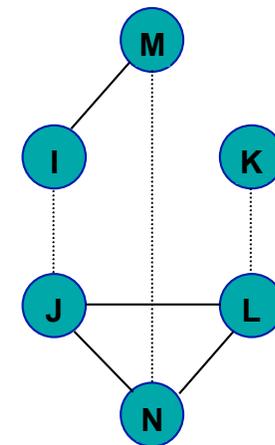
### conexões de entrada:

ligam saídas de registradores a entradas de unidades funcionais



### conexões de saída:

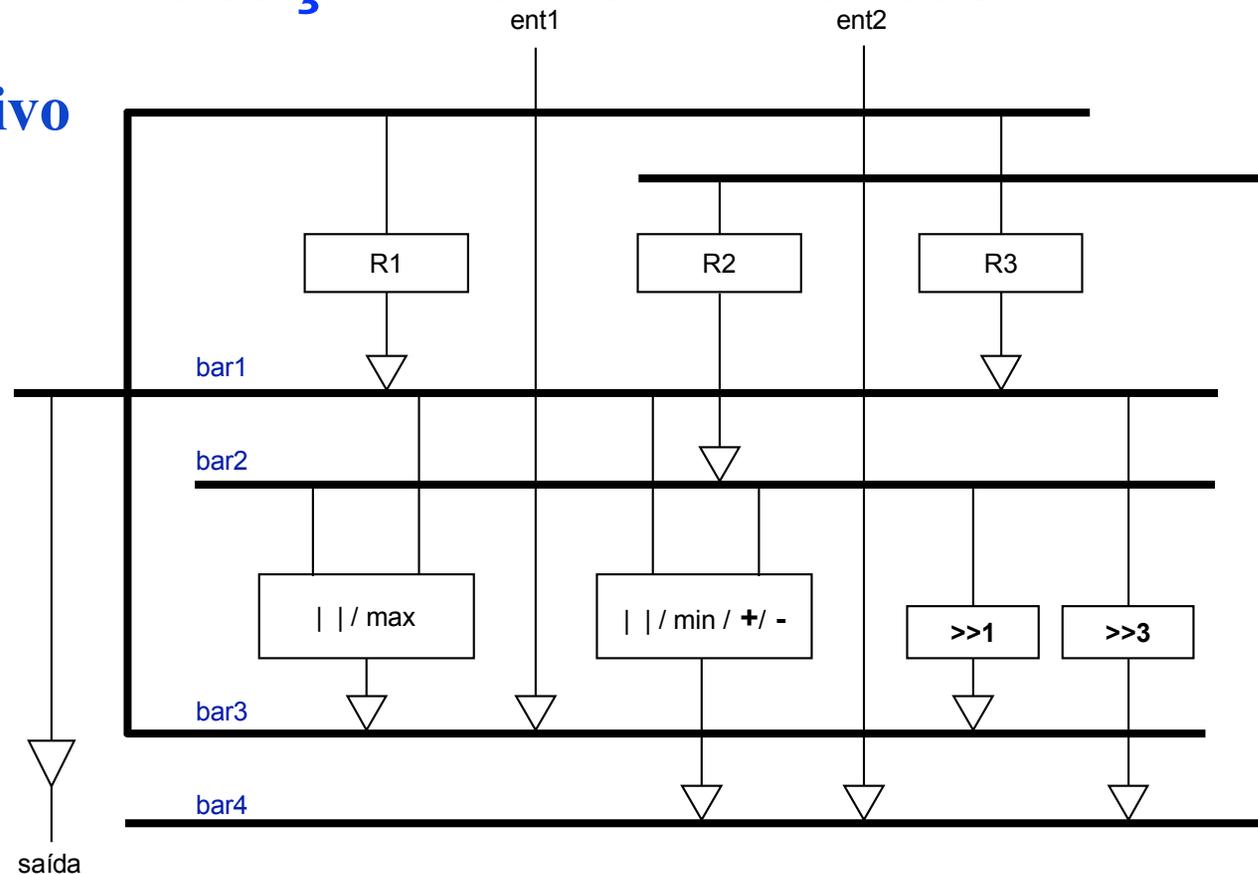
ligam saídas de unidades funcionais a entradas de registradores



# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## Exemplo 2: Alocação de Barramentos

Bloco operativo resultante



bar1 = [ A , C , D , E , H ]  
bar2 = [ B , F , G ]

bar3 = [ I , K , M ]  
bar4 = [ J , L , N ]

R1 = [ a , t1 , x , t7 ]  
R2 = [ b , t2 , y , t3 , t5 , t6 ]  
R3 = [ t4 ]

**nenhum mux**

# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Agrupamento de Registradores

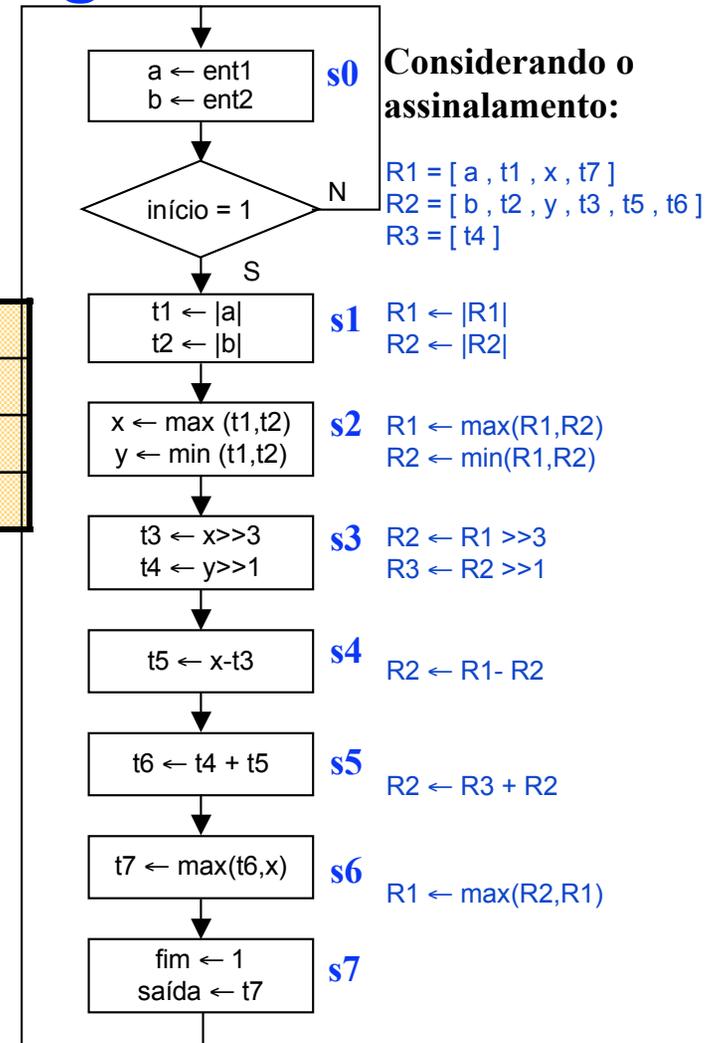
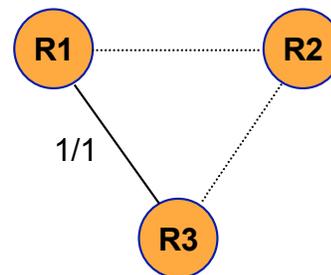
### Tabela de acessos aos registradores

borda ascendente do relógio (troca de estado)

	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
R1		▶▶	▶▶	▶▶	▶▶		▶▶	▶▶
R2		▶▶	▶▶	▶▶	▶▶	▶▶	▶▶	
R3				▶▶		▶▶		

▶ escrita      ▶ leitura

### Grafo de restrições

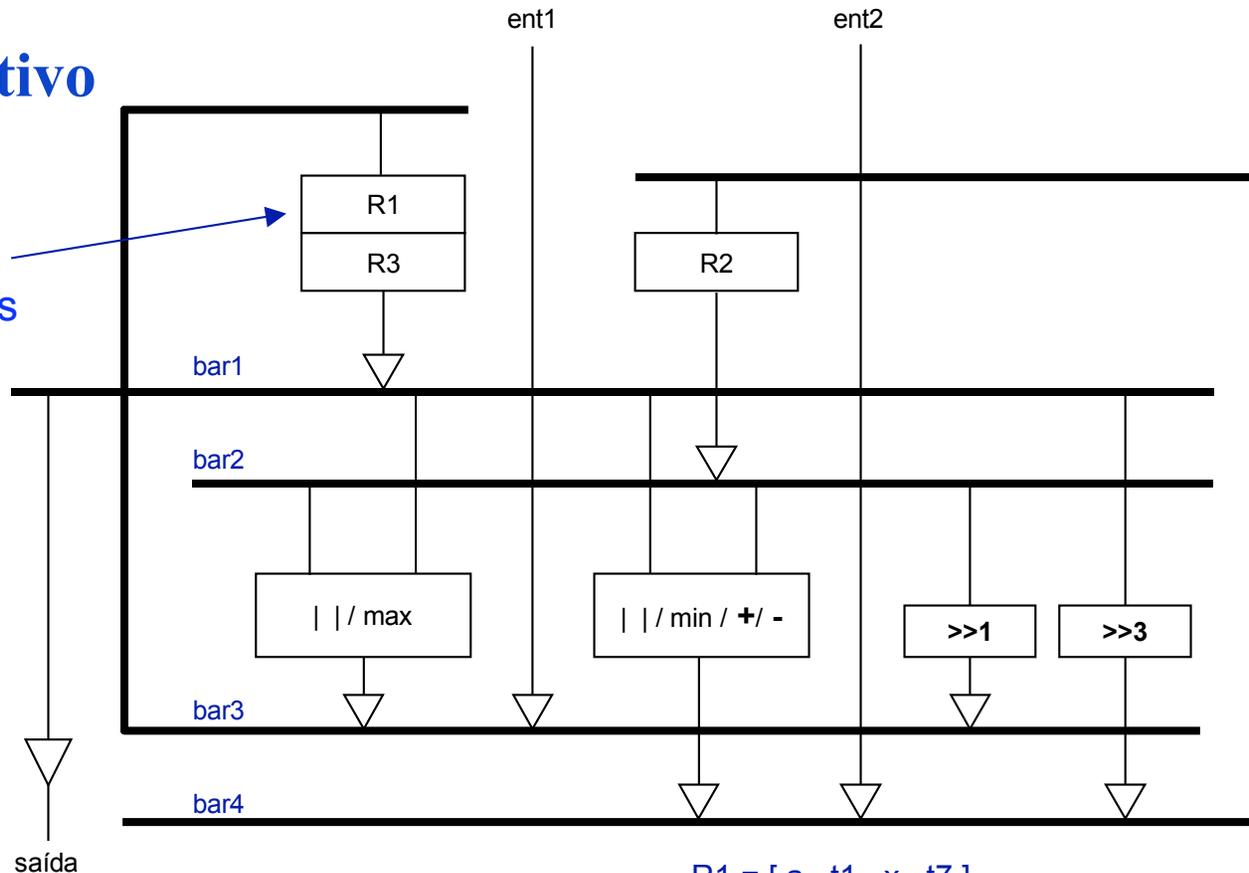


# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Agrupamento de Registradores

Bloco operativo  
resultante

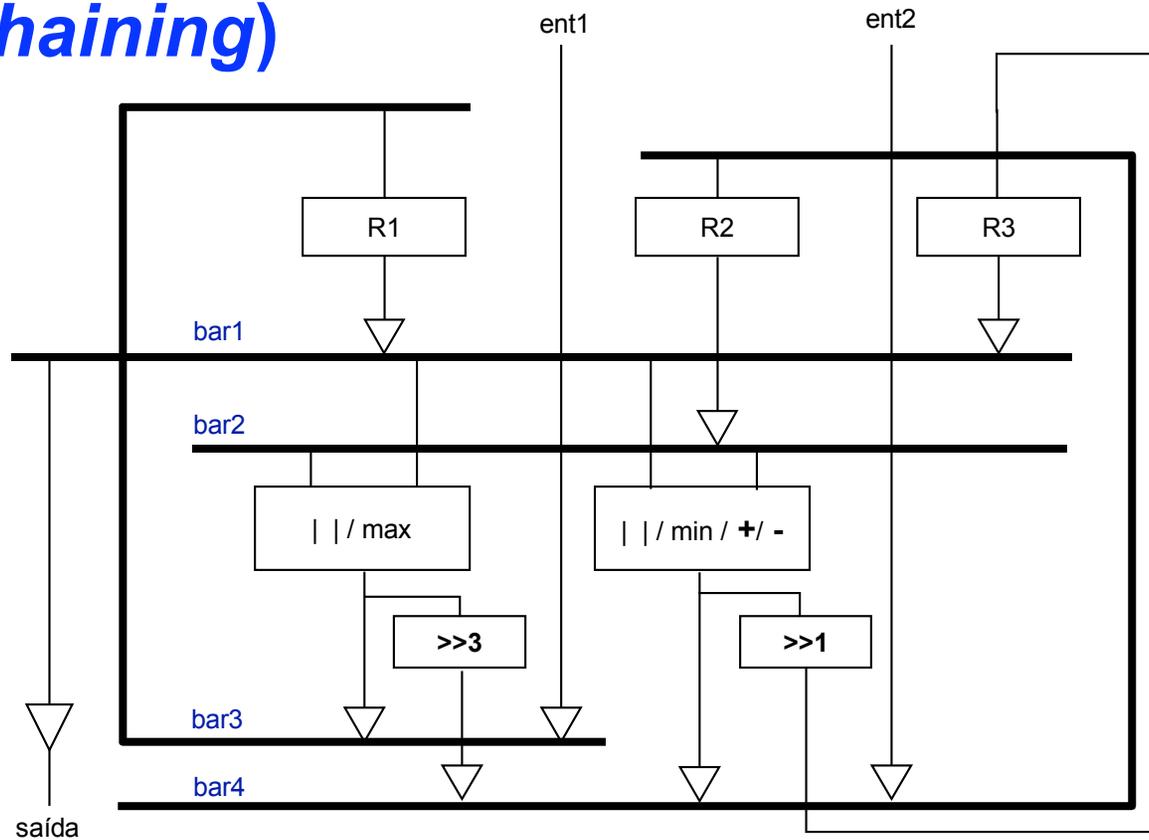
banco de  
registradores



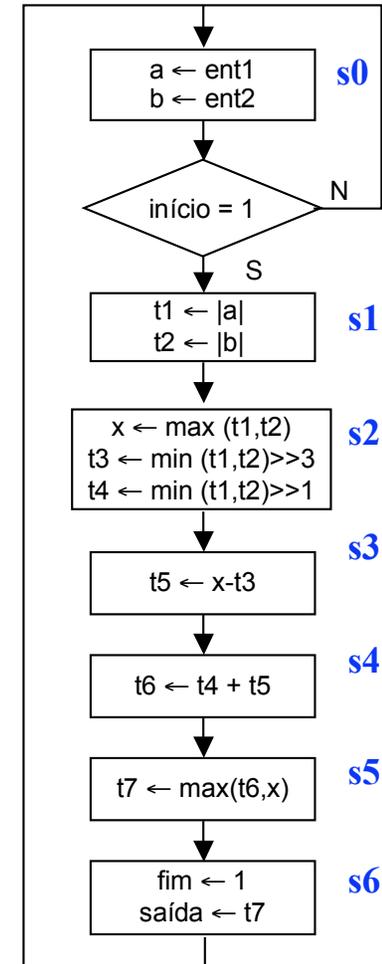
R1 = [ a , t1 , x , t7 ]  
R2 = [ b , t2 , y , t3 , t5 , t6 ]  
R3 = [ t4 ]

# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## ▶ Exemplo 2: Encadeamento de Operações (Chaining)

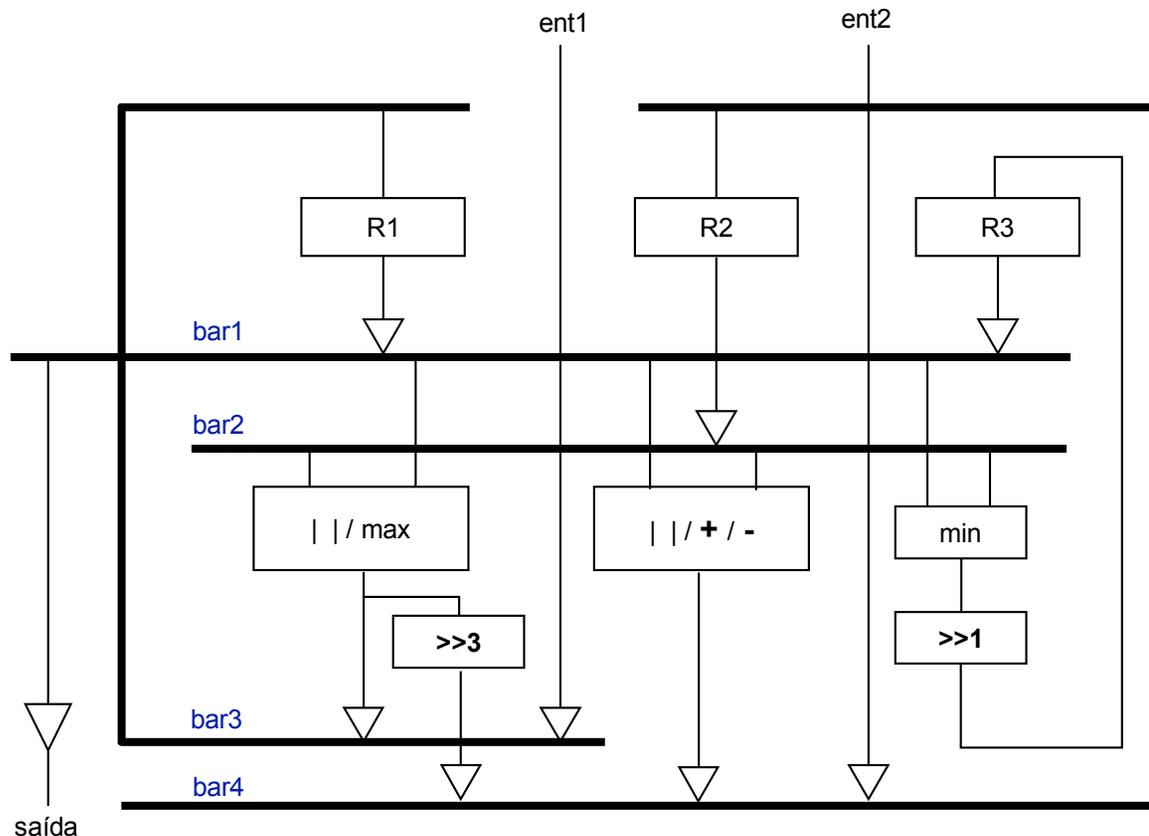


$R1 = [ a , t1 , x , t7 ]$   
 $R2 = [ b , t2 , y , t3 , t5 , t6 ]$   
 $R3 = [ t4 ]$



# 5. Projeto de Sistemas Digitais no Nível RT

## Exemplo 2: Multiciclos



$R1 = [ a , t1 , x , t7 ]$   
 $R2 = [ b , t2 , y , t3 , t5 , t6 ]$   
 $R3 = [ t4 ]$

