

# Esercizi sulla sintesi per SSE

Tiziano Villa

Anno Accademico 2019-20

Nome e Cognome:

Matricola:

Posta elettronica:

problema	punti massimi	i tuoi punti
problema 1	X	
problema 2	X	
problema ...	X	
totale	X	

1. Sia  $f$  una funzione completamente specificata dove

$$f = x_2x'_3x'_4 + x_1x_2x'_3 + x_1x'_3x_4 + x_1x'_2x_4 + x_1x_3x_4 + x_2x_3x_4 + x'_1x_2x'_3x_4.$$

Si calcolino gl'implicanti primi di  $\mathcal{F}$  usando il paradigma di ricorsione monotona.

2. Sia  $\mathcal{F} = \{f, d, r\}$  una funzione incompletamente specificata dove

$$f = a'b'c'e' + ab'e' + ab + a'b'ce,$$

$$d = a'bce' + ab'ce + a'bce.$$

Si calcolino gl'implicanti primi di  $\mathcal{F}$  usando il paradigma di ricorsione monotonica.

3. Sia  $\mathcal{F} = \{f, d, r\}$  una funzione incompletamente specificata dove

$$f = a'b'c'e' + ab'e' + ab + a'b'ce,$$

$$d = a'bce' + ab'ce + a'bce.$$

Si calcoli una copertura del complemento di  $\mathcal{F}$  (cioe' dei punti dove la funzione vale 0), usando il paradigma di ricorsione monotona.

E' vero che calcolando il complemento con il paradigma di ricorsione monotona si ottiene sempre una copertura di cardinalita' minima ?

La copertura ottenuta ha una cardinalita' minima ? Se no, se ne trovi una di cardinalita' minima.

La copertura ottenuta di cardinalita' minima ha un numero minimo di letterali ? Se no, se ne trovi una con un numero minimo di letterali.

Traccia di soluzione.

I punti dove la funzione vale 0 sono quelli in cui non vale 1 e non e' indeterminata, quindi si tratta di trovare una copertura del complemento della funzione la cui copertura e' l'unione delle coperture  $f$  e  $d$ .

```
.i 4
.o 1
0000 1
10-0 1
11-- 1
0011 1
0110 1
1011 1
0111 1
.end
```

Una copertura del complemento e'

$$r = ab'c'e + a'bc'e + a'bc'e' + a'b'v'e + a'b'ce'.$$

In generale, non e' vero che calcolando il complemento con il paradigma di ricorsione monotona se ne ottiene una copertura di cardinalita' minima. Ad esempio, la precedente copertura si puo' semplificare come

$$r = a'bc' + a'b'ce' + b'c'e.$$

Inoltre in questo caso la copertura precedente puo' essere minimizzata ancora rispetto al numero di letterali, sfruttando i punti dove la funzione non e' completamente specificata

$$r = a'bc' + a'b'ce' + b'c'e.$$

$$d = a'bce' + ab'ce + a'bce.$$

da cui si ottiene

$$r = a'b + a'ce' + b'c'e.$$

4. Si consideri la funzione con 3 uscite rappresentata dalla seguente copertura (ingressi:  $x, y, z$ ; uscite  $f1, f2, f3$ ):

x	y	z	f1	f2	f3
1	1	0	1	1	0
0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	1	1
0	0	1	0	1	0
0	0	0	0	1	1

Se ne calcolino gl'implicanti primi usando il paradigma di ricorsione monotonica.

Traccia di soluzione.

Una decomposizione ricorsiva e' la seguente

				xyz	f1	f2	f3				
				110	1	1	0				
				011	0	1	1				
				100	1	1	1				
				001	0	1	0				
				000	0	1	1				
				(i)							
		x					!x				
		210	110				211 011				
		200	111				201 010				
							200 011				
		(g)					(h)				
		y	!y				y	!y			
		220	110	220	111		221	011	221	010	
									220	011	
		(c)	(d)				(e)		(f)		
								z	!z		
								222	010	222	011
								(a)		(b)	

I seguenti primi sono associati ai vari stadi del processo:

- (a): 222 010

- (b): 222 011
- (c): 220 110
- (d): 220 111
- (e): 221 011
- (f): i massimali in  $\{221\ 010, 220\ 011, 222\ 010\}$ , cioè  $\{220\ 011, 222\ 010\}$
- (g): i massimali in  $\{210\ 110, 200\ 111, 220\ 110\}$ , cioè  $\{200\ 111, 220\ 110\}$
- (h): i massimali in  $\{211\ 011, 200\ 011, 202\ 010, 221\ 010\}$ , che sono tutti
- (i): i massimali in  $\{100\ 111, 120\ 110, 011\ 011, 000\ 011, 002\ 010, 021\ 010, 200\ 011, 200\ 010, 200\ 010, 200\ 010\}$ ,  
cioè  $\{100\ 111, 120\ 110, 011\ 011, 002\ 010, 021\ 010, 200\ 011\}$  che sono  
gl'implicanti primi cercati.

Nel fondere i primi di due sottoalberi non si dimentichi di eseguire i prodotti incrociati.

5. (a) Per una funzione a due valori, si risponda ai seguenti quesiti:
- i. Si definisca la nozione di copertura minima,
  - ii. Si definisca la nozione di copertura minimale o irridondante,
  - iii. Si definisca la nozione di copertura minimale rispetto al contenimento da parte di implicanti singoli.
  - iv. Una copertura irridondante e' minimale rispetto al contenimento da parte di implicanti singoli ?
  - v. Una copertura minimale rispetto al contenimento da parte di implicanti singoli e' irridondante ?

Traccia di soluzione.

Una copertura e' un insieme d'implicanti che contengono i punti dove la funzione vale 1 (eventualmente punti dove la funzione non e' specificata), e non contengono punti dove la funzione vale 0.

Una copertura minima e' una copertura di cardinalita' minima.

Una copertura e' minimale o irridondante se nessun suo sottoinsieme proprio e' una copertura.

Una copertura e' minimale rispetto al contenimento da parte d'implicanti singoli se nessun implicante della copertura e' contenuto in alcun altro implicante della copertura.

Una copertura irridondante e' minimale rispetto al contenimento da parte d'implicanti singoli.

Una copertura minimale rispetto al contenimento da parte d'implicanti singoli non e' detto che sia irridondante, perche' un suo implicante puo' essere ridondante in quanto contenuto nell'unione di un insieme d'implicanti della copertura (ma non essere contenuto tutto in un implicante singolo).



(b) Si consideri la funzione a 3 ingressi e 2 uscite  $f_1 = a'b'c' + a'b'c + ab'c + abc + abc'$ ,  $f_2 = a'b'c + ab'c$ .

Si mostrino le seguenti coperture, sia disegnando gli ipercubi e gl'implicanti, che scrivendo le coperture in forma matriciale:

- i. copertura minima di cardinalita' 3,
- ii. copertura irridondante di cardinalita' 4,
- iii. copertura ridondante di cardinalita' 5 minimale rispetto a implicanti singoli.

Traccia di soluzione.

Esempio di copertura minima di cardinalita' 3.

```
00- 10
-01 11
11- 10
```

Esempio di copertura irridondante di cardinalita' 4.

```
00- 10
-01 01
1-1 10
11- 10
```

Esempio di copertura ridondante di cardinalita' 5 minimale rispetto a implicanti singoli.

```
00- 10
-01 01
-01 10
1-1 10
11- 10
```

Questa copertura e' ridondante perche' il terzo implicante e' contenuto nell'unione del primo e quarto implicante.

6. (a) Si descriva l'algoritmo per calcolare il complemento di una funzione Booleana con il paradigma di ricorsione monotona.
- (b) Si consideri la seguente funzione Booleana completamente specificata  $f$  rappresentata dalla copertura

$$F = xy + x'y'z + xy'z'.$$

Si calcoli una copertura del complemento della funzione con il paradigma di ricorsione monotona.

7. Data la definizione di cofattore generalizzato come funzione incompletamente specificata

$$co(f, g) = (fg, \bar{g}, \bar{f}g),$$

si dimostri che il cofattore di Shannon  $f_x$  e' una copertura di  $co(f, x)$ ,  
cioe'

$$fx \subseteq f_x \subseteq fx + \bar{x};$$

inoltre si dimostri che e' l'unica copertura di  $co(f, x)$  indipendente da  $x$ .

Si dimostrino le seguenti proprieta' del cofattore di Shannon:

(a)  $xf_x + \bar{x}f_{\bar{x}} = f$

(b)  $(f_x)_y = f_{xy}$

(c)  $(fg)_x = f_x g_x$

(d)  $(\bar{f})_x = \overline{(f_x)}$

Si dimostrino le seguenti proprieta' del cofattore generalizzato:

(a)  $f = g co(f, g) + \bar{g} co(f, \bar{g})$

(b)  $co(co(f, g), h) = co(f, gh)$

(c)  $co(fg, h) = co(f, h)co(g, h)$

(d)  $co(\bar{f}, g) = \overline{co(f, g)}$

8. (a) Si definisca il cofattore di Shannon per le funzioni a due valori (a piu' uscite) e poi lo si definisca per le funzioni a piu' valori.
- (b) Si mostri che la definizione per le funzioni a due valori e' un caso speciale di quella a piu' valori.

9. (a) Si definisca il cofattore generalizzato per funzioni completamente specificate e incompletamente specificate.
- (b) Si stabilisca la relazione tra il cofattore generalizzato e quello di Shannon.

10. (a) Si dimostri che  $\overline{f} = x(\overline{f_x}) + \overline{x}(f_x)$ .  
 (b) Si applichi il paradigma di ricorsione monotona per complementare la funzione:

$$f = xy'z' + wxy' + wy'z + wx'z + wyz + xyz$$

usando il processo di fusione giustificato dal punto precedente.

- (c) Si complementi  $f$  usando la legge di De Morgan.  
 (d) Si calcoli

$$U \# \mathcal{F},$$

dove  $U$  e' il cubo universale e  $\mathcal{F}$  e' la copertura data sopra

$$\mathcal{F} = \{xy'z', wxy', wy'z, wx'z, wyz, xyz\}.$$

L'operazione  $\#$  tra due cubi  $\alpha$  e  $\beta$  e' definita come segue:

$$\alpha \# \beta = \begin{cases} a_1.b'_1 & a_2 & \dots & a_n \\ a_1 & a_2.b'_2 & \dots & a_n \\ \dots & & & \\ a_1 & a_2 & \dots & a_n.b'_n \end{cases}$$

Che cosa si ottiene ?

Traccia di soluzione.

Si veda lo svolgimento all'esercizio successivo.

- (e) Si calcoli

$$U \# (U \# \mathcal{F}).$$

Che cosa si ottiene ? Data una qualsiasi copertura  $\mathcal{F}$  di una funzione  $f$ , si puo' dimostrare un'affermazione generale sul risultato del calcolo  $U \# (U \# \mathcal{F})$  ?

11. (a) Si applichi il paradigma di ricorsione monotona per complementare la funzione:

$$f = xy'z' + wxy' + wy'z + wx'z + wyz + xyz.$$

- (b) Si calcoli

$$U \# \mathcal{F},$$

dove  $U$  e' il cubo universale e  $\mathcal{F}$  e' la copertura data sopra

$$\mathcal{F} = \{xy'z', wxy', wy'z, wx'z, wyz, xyz\}.$$

L'operazione  $\#$  tra due cubi  $\alpha$  e  $\beta$  e' definita come segue:

$$\alpha \# \beta = \begin{cases} a_1.b'_1 & a_2 & \dots & a_n \\ a_1 & a_2.b'_2 & \dots & a_n \\ \dots & & & \\ a_1 & a_2 & \dots & a_n.b'_n \end{cases}$$

Che cosa si ottiene ?

Traccia di soluzione.

Ordine:  $w, x, y, z$ .

$U=1$	11	11	11	11
$xy'z'$	11	01	10	10
$wxy'$	01	01	10	11
$wy'z$	01	11	10	01
$wx'z$	01	10	11	01
$wyz$	01	11	01	01
$xyz$	11	01	01	01

$U \# \mathcal{F}$  si calcola iterando l'operazione  $\#$  (che e' una sottrazione) per tutti i cubi di  $\mathcal{F}$  sulla copertura parziale ottenuta, cioe' si sottrae da  $U$  il primo cubo di  $\mathcal{F}$ , dal risultato ottenuto si sottrae il secondo cubo di  $\mathcal{F}$  e cosi' via sino ad aver sottratto tutti i cubi di  $\mathcal{F}$ .

**Sottrazione di  $xy'z'$ .**

$U \# xy'z'$ :

11 10 11 11     $x'$   
11 11 01 11     $y$   
11 11 11 01     $z$

**Sottrazione di  $wxy'$ .**

$x' \# wxy' = x'(x' \cap wxy' = \emptyset)$

11 10 11 11     $x'$

$y \# wxy' = y(y \cap wxy' = \emptyset)$

11 11 01 11     $y$

$z \# wxy'$ :

10 11 11 01     $w'z$   
11 10 11 01     $x'z$   
11 11 01 01     $yz$

**Il risultato parziale e':**

11 10 11 11     $x'$   
11 11 01 11     $y$   
10 11 11 01     $w'z$   
11 10 11 01     $x'z$   
11 11 01 01     $yz$

semplificabile come segue (il penultimo cubo e' contenuto nel primo, l'ultimo cubo e' contenuto nel secondo):

11 10 11 11     $x'$   
11 11 01 11     $y$   
10 11 11 01     $w'z$



**Sottrazione di  $wy'z$ .**

$x' \# wy'z$ :

10 10 11 11  $w' x'$

11 10 01 11  $x' y$

11 10 11 10  $x' z'$

$y \# wy'z = y(y \cap wy'z = \emptyset)$

11 11 01 11  $y$

$w'z \# wy'z = w'z(w'z \cap wy'z = \emptyset)$

10 11 01 01  $w' z$

**Il risultato parziale e':**

10 10 11 11  $w' x'$

11 10 01 11  $x' y$

11 10 11 10  $x' z'$

11 11 01 11  $y$

10 11 01 01  $w' z$

**semplificabile come segue (il secondo cubo e' contenuto nel primo):**

10 10 11 11  $w' x'$

11 10 11 10  $x' z'$

11 11 01 11  $y$

10 11 01 01  $w' z$

**Sottrazione di  $wx'z$ .**

$$w'x' \# wx'z = w'x'(w'x' \cap wx'z = \emptyset)$$

$$10 \ 10 \ 11 \ 11 \quad w' \ x'$$

$$x'z' \# wx'z = x'z'(x'z' \cap wx'z = \emptyset)$$

$$11 \ 10 \ 11 \ 10 \quad x' \ z'$$

$$y \# wx'z:$$

$$10 \ 11 \ 01 \ 11 \quad w' \ y$$

$$11 \ 01 \ 01 \ 11 \quad xy$$

$$11 \ 11 \ 01 \ 10 \quad yz'$$

$$w'z \# wx'z = w'z(w'z \cap wx'z = \emptyset)$$

$$10 \ 11 \ 11 \ 01 \quad w' \ z$$

**Il risultato parziale e':**

$$10 \ 10 \ 11 \ 11 \quad w' \ x'$$

$$11 \ 10 \ 11 \ 10 \quad x' \ z'$$

$$10 \ 11 \ 01 \ 11 \quad w' \ y$$

$$11 \ 01 \ 01 \ 11 \quad xy$$

$$11 \ 11 \ 01 \ 10 \quad yz'$$

$$10 \ 11 \ 11 \ 01 \quad w' \ z$$

**Sottrazione di  $wyz$ .**

$$w'x' \# wyz = w'x'(w'x' \cap wyz = \emptyset)$$

$$10 \ 10 \ 11 \ 11 \quad w' \ x'$$

$$x'z' \# wyz = x'z'(x'z' \cap wyz = \emptyset)$$

$$11 \ 10 \ 11 \ 10 \quad x' \ z'$$

$$w'y \# wyz = w'y(w'y \cap wyz = \emptyset)$$

$$10 \ 11 \ 01 \ 11 \quad w' \ y$$

$$xy \# wyz:$$

$$10 \ 01 \ 01 \ 11 \quad w' \ xy$$

$$11 \ 01 \ 01 \ 10 \quad xyz'$$

$$yz' \# wyz = yz'(yz' \cap wyz = \emptyset)$$

$$11 \ 11 \ 01 \ 10 \quad yz'$$

$$w'z \# wyz = w'z(w'z \cap wyz = \emptyset)$$

$$10 \ 11 \ 11 \ 01 \quad w' \ z$$

**Il risultato parziale e':**

$$10 \ 10 \ 11 \ 11 \quad w' \ x'$$

$$11 \ 10 \ 11 \ 10 \quad x' \ z'$$

$$10 \ 11 \ 01 \ 11 \quad w' \ y$$

$$10 \ 01 \ 01 \ 11 \quad w' \ xy$$

$$11 \ 01 \ 01 \ 10 \quad xyz'$$

$$11 \ 11 \ 01 \ 10 \quad yz'$$

$$10 \ 11 \ 11 \ 01 \quad w' \ z$$

semplificabile come segue (il quarto cubo e' contenuto nel terzo, il quinto cubo e' contenuto nel sesto):

$$10 \ 10 \ 11 \ 11 \quad w' \ x'$$

$$11 \ 10 \ 11 \ 10 \quad x' \ z'$$

$$10 \ 11 \ 01 \ 11 \quad w' \ y$$

$$11 \ 11 \ 01 \ 10 \quad yz'$$

$$10 \ 11 \ 11 \ 01 \quad w' \ z$$

**Sottrazione di  $xyz$ .**

$$w'x' \# xyz = w'x'(w'x' \cap xyz = \emptyset)$$

$$10 \ 10 \ 11 \ 11 \quad w' \ x'$$

$$x'z' \# xyz = x'z'(x'z' \cap xyz = \emptyset)$$

$$11 \ 10 \ 11 \ 10 \quad x' \ z'$$

$$w'y \# xyz:$$

$$10 \ 10 \ 01 \ 11 \quad w' \ x' \ y$$

$$10 \ 11 \ 01 \ 10 \quad w' \ yz'$$

$$yz' \# xyz = yz'(yz' \cap xyz = \emptyset)$$

$$11 \ 11 \ 01 \ 10 \quad yz'$$

$$w'z \# xyz:$$

$$10 \ 10 \ 11 \ 01 \quad w' \ x' \ z$$

$$10 \ 11 \ 10 \ 01 \quad w' \ y' \ z$$

**Il risultato finale e':**

$$10 \ 10 \ 11 \ 11 \quad w' \ x'$$

$$11 \ 10 \ 11 \ 10 \quad x' \ z'$$

$$10 \ 10 \ 01 \ 11 \quad w' \ x' \ y$$

$$10 \ 11 \ 01 \ 10 \quad w' \ yz'$$

$$11 \ 11 \ 01 \ 10 \quad yz'$$

$$10 \ 10 \ 11 \ 01 \quad w' \ x' \ z$$

$$10 \ 11 \ 10 \ 01 \quad w' \ y' \ z$$

semplificabile come segue (il terzo cubo e sesto cubo sono contenuti nel primo, il quarto cubo e' contenuto nel quinto):

$$10 \ 10 \ 11 \ 11 \quad w' \ x'$$

$$11 \ 10 \ 11 \ 10 \quad x' \ z'$$

$$11 \ 11 \ 01 \ 10 \quad yz'$$

$$10 \ 11 \ 10 \ 01 \quad w' \ y' \ z$$

*Si ottiene una copertura del complemento della funzione.*

12. (a) Si consideri la funzione completamente specificata  $f'$  rappresentata dalla seguente copertura  $\mathcal{F}'$  del suo complemento

$$\mathcal{F}' = \{w'x', x'z', yz', w'y'z\}.$$

Si applichi il paradigma di ricorsione monotona per ottenere una copertura  $\mathcal{F}$  della funzione  $f$ .

Traccia di soluzione.

Una copertura  $\mathcal{F}$  della funzione  $f$  e' la seguente:  $\{wyz, xyz, w\bar{y}z, x\bar{y}\bar{z}\}$ .

- (b) Si applichi il paradigma di ricorsione monotona per calcolare i primi della funzione  $f$ .

Traccia di soluzione.

I primi della funzione  $f$  sono:  $xyz, wx\bar{y}, x\bar{y}\bar{z}, wz$ .

13. Si applichi il paradigma di ricorsione monotona per complementare la funzione:

$$f = ab'c' + ab'd + b'cd + a'cd + bcd + abc + ab'cd'$$

(a) E' noto che l'operazione di fusione delle chiamate ricorsive si esegue con la seguente procedura MERGE\_WITH\_CONTAINMENT, dove data una funzione  $g$  s'indicano rispettivamente con  $H_0 = \{\cup_{i=1}^l c_i\}$  e  $H_1 = \{\cup_{j=1}^k d_j\}$  le coperture di  $g_{x'}$  e  $g_x$ :

```

MERGE_WITH_CONTAINMENT( $H_0, H_1$ ) {
   $H_2 = \{c_j \mid \exists i \text{ s.t. } c_j \subseteq d_i\} \cup \{d_j \mid \exists i \text{ s.t. } d_j \subseteq c_i\}$ 
   $H_0 = H_0 \setminus H_2$ 
   $H_1 = H_1 \setminus H_2$ 
  return( $x'H_0 + xH_1 + H_2$ )
}

```

Un'alternativa alla procedura MERGE\_WITH\_CONTAINMENT e' la seguente procedura MERGE\_WITH\_COVER:

```

MERGE_WITH_COVER( $H_0, H_1$ ) {
   $H_2 = \{c_j \mid c_j \subseteq \{\cup d_i\}\} \cup \{d_j \mid d_j \subseteq \{\cup c_i\}\}$ 
   $H_0 = H_0 \setminus H_2$ 
   $H_1 = H_1 \setminus H_2$ 
  return( $x'H_0 + xH_1 + H_2$ )
}

```

Si ripeta il calcolo del complemento di

$$f = ab'c' + ab'd + b'cd + a'cd + bcd + abc + ab'cd'$$

usando MERGE\_WITH\_COVER invece che MERGE\_WITH\_CONTAINMENT e si confrontino i risultati.

Che cosa si puo' dire delle proprieta' delle coperture del complemento ottenute usando l'una o l'altra procedura di fusione ?

Traccia. Che cosa si puo' dire circa l'irridondanza o la primalita' delle coperture ottenute ?

14. Sia  $f$  una funzione con copertura  $F = w'x'y'z' + wx'z' + wx + w'x'yz$ .

(a) Si complementi  $f$  con il metodo di ricorsione monotona. Si mostrino i risultati ad ogni passo.

Traccia di soluzione.

Cofattorizzando con l'ordine  $w, x, y, z$ , si ottiene la seguente copertura del complemento  $F'_1 = wx'z + w'x + w'yz' + w'y'z$ .

(b) Dati due cubi  $\alpha$  e  $\beta$ , si definisca la seguente operazione  $\alpha \tilde{\#} \beta$ :

$$\alpha \tilde{\#} \beta = \begin{cases} a_1.b'_1 & a_2 & \dots & a_n \\ a_1.b_1 & a_2.b'_2 & \dots & a_n \\ \dots & & & \\ a_1.b_1 & a_2.b_2 & \dots & a_n.b'_n \end{cases}$$

Si analizzi l'effetto di tale operazione e la si usi per calcolare il complemento di  $f$ , mostrando i passi del calcolo.

Traccia di soluzione.

Calcolando  $U \tilde{\#} F$  (dove  $U$  e' l'universo su  $x, y, z, w$ ), si ottiene la seguente copertura disgiunta del complemento  $F'_2 = wx'z + w'x + w'x'yz' + w'x'y'z$ .



(c) Si usi la legge di De Morgan per ottenere il complemento di  $f$ . Si semplifichi tale risultato rispetto al contenimento per cubo singolo. Ci sono primi di  $\bar{f}$  che mancano dalla lista così ottenuta? Questo fatto a quale congettura induce?

Traccia di soluzione.

Si ottiene la seguente copertura del complemento  $F'_3 = w'x + w'yz' + w'y'z + wx'z + x'y'z$ .

Tale copertura contiene tutti i primi di  $\bar{f}$ .

E' una proprietà generale di questo procedimento di produrre tutti i primi del complemento.

15. (a) Si dimostri che  $p$  e' un primo di  $f$  se e solo se e' un cubo massimale (un cubo massimale non e' contenuto in nessun altro cubo) dell'insieme che contiene i seguenti cubi:

i.  $p = qx$ ,  $q$  e' un primo di  $f_x$ ,  $q \notin f_{\bar{x}}$

ii.  $p = r\bar{x}$ ,  $r$  e' un primo di  $f_{\bar{x}}$ ,  $r \notin f_x$

iii.  $p = qr$ ,  $q$  e' un primo di  $f_x$ ,  $r$  e' un primo di  $f_{\bar{x}}$

(b) Si dimostri il teorema precedente anche nel caso in cui la terza clausola iii. sia sostituita da

**iii.**  $p = \text{CONSENSO}(qx, r\bar{x})$ ,  $q$  e' un primo di  $f_x$ ,  $r$  e' un primo di  $f_{\bar{x}}$ .

L'operazione CONSENSO tra due cubi  $\alpha$  e  $\beta$  e' definita come segue:

$$\text{CONSENSO}(\alpha, \beta) = \begin{cases} a_1 + b_1 & a_2 \cdot b_2 & \dots & a_n \cdot b_n \\ a_1 \cdot b_1 & a_2 + b_2 & \dots & a_n \cdot b_n \\ \dots & & & \\ a_1 \cdot b_1 & a_2 \cdot b_2 & \dots & a_n + b_n \end{cases}$$

16. Si considerino le seguenti due affermazioni:

**Teorema** Data una funzione  $ff = (f, d, r)$ , sia  $\mathcal{F} = \mathcal{G} \cup \{\alpha\}$ , dove  $\mathcal{F}$  e' una copertura di  $ff$  ed  $\alpha$  e' un implicante primo disgiunto da  $\mathcal{G}$ .

Allora  $\alpha$  e' un primo essenziale se e solo se

$$\text{CONSENSO}(\mathcal{G}, \{\alpha\})$$

non copre  $\alpha$ .

L'operazione CONSENSO tra due cubi  $\alpha = a_1a_2 \dots a_n$  e  $\beta = b_1b_2 \dots b_n$  ( $a_i$  e  $b_i, i = 1, \dots, n$  sono i letterali in notazione posizionale) e' definita come segue:

$$\text{CONSENSO}(\alpha, \beta) = \begin{cases} a_1 + b_1 & a_2.b_2 & \dots & a_n.b_n \\ a_1.b_1 & a_2 + b_2 & \dots & a_n.b_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1.b_1 & a_2.b_2 & \dots & a_n + b_n \end{cases}$$

Nota:

- e' vuoto quando distanza  $\geq 2$ ;
- contiene un solo cubo quando distanza = 1;
- contiene  $n$  cubi quando distanza = 0.

**Corollario** Data una funzione  $ff = (f, d, r)$ , sia  $\mathcal{F}$  una copertura di  $f$ ,  $\mathcal{D}$  una copertura di  $d$  e  $\alpha$  un implicante primo di  $ff$ .

Allora  $\alpha$  e' un primo essenziale se e solo se  $\mathcal{H} \cup \mathcal{D}$  non copre  $\alpha$ , dove

$$\mathcal{H} = \text{CONSENSO}((\mathcal{F} \cup \mathcal{D}) \# \alpha, \alpha),$$

e l'operazione  $\#$  tra due cubi  $\alpha$  e  $\beta$  e' definita come segue:

$$\alpha \# \beta = \begin{cases} a_1.b'_1 & a_2 & \dots & a_n \\ a_1 & a_2.b'_2 & \dots & a_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1 & a_2 & \dots & a_n.b'_n \end{cases}$$

Si noti che invece di  $\#$  si puo' usare l'operazione  $\tilde{\#}$  definita come:

$$\alpha \tilde{\#} \beta = \begin{cases} a_1.b'_1 & a_2 & \dots & a_n \\ a_1.b_1 & a_2.b'_2 & \dots & a_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1.b_1 & a_2.b_2 & \dots & a_n.b'_n \end{cases}$$

- (a) Si dimostrino informalmente le affermazioni precedenti, spiegando che cosa si ottiene applicando le operazioni indicate.
- (b) Sfruttando il corollario precedente e' possibile ridurre la prova di essenzialita' a una verifica di contenimento. Indicare di quale verifica si tratta. A quale operazione puo' a sua volta ridursi la verifica di contenimento? Per quale motivo tale riduzione e' conveniente?
- (c) Si calcolino tutti gl'implicanti primi della funzione  $f = a'b'c' + a'b'c + ab'c + abc + abc'$ . Quali primi sono essenziali?

Traccia di soluzione.

La copertura  $\mathcal{F} = a'b' + b'c + ac + ab$  contiene tutti e soli i primi di  $f$ .

I primi essenziali sono  $a'b'$  e  $ab$ .

- (d) Applicando il corollario precedente, si determini quali implicanti primi della copertura  $\mathcal{F} = a'b' + b'c + ac + ab$  sono essenziali. Si mostrino i calcoli in dettaglio.

Applicando il corollario precedente, si determini se l'implicante primo  $a'b'$  e' essenziale. Si mostrino i calcoli in dettaglio.

Traccia di soluzione.

Il cubo  $a'b'$  in notazione posizionale si scrive come  $a_1a_2a_3 = 10\ 10\ 11$ , etc.

In base al corollario dobbiamo calcolare se  $\mathcal{H} \cup \mathcal{D}$  copre  $\alpha$ .

Si consideri la copertura iniziale  $\mathcal{F}$  ( $\mathcal{D} = \emptyset$ ) e  $\alpha = 10\ 10\ 11$ :

$a'b'c'$	10	10	10
$a'b'c$	10	10	01
$ab'c$	01	10	01
$abc$	01	01	01
$abc'$	01	01	10

$(\mathcal{F} \cup \mathcal{D}) \# \alpha$  si ottiene come unione dei cubi generati applicando l'operazione  $\#$  tra i singoli cubi di  $(\mathcal{F} \cup \mathcal{D})$  e il cubo  $\alpha$ .

10 10 10  $\#$  10 10 11:

00	10	10
10	00	10
10	10	00

(si tratta di cubi vuoti come ci aspetta dalla definizione dell'operatore  $\#$  che sottrae i punti del secondo cubo da quelli del primo cubo).

10 10 01  $\#$  10 10 11:

00 10 01  
10 00 01  
10 10 00

(si tratta di cubi vuoti come ci aspetta dalla definizione dell'operatore  $\#$  che sottrae i punti del secondo cubo da quelli del primo cubo).

01 10 01  $\#$  10 10 11:

01 10 01  
01 00 01  
01 10 00

(genera il cubo  $ab'c$ ).

01 01 01  $\#$  10 10 11:

01 01 01  
01 01 01  
01 01 00

(genera il cubo minuendo  $abc$ ).

01 01 10  $\#$  10 10 11:

01 01 10  
01 01 10  
01 01 00

(genera il cubo minuendo  $abc'$ ).

In conclusione,  $(\mathcal{F} \cup \mathcal{D}) \# \alpha$ :

01 10 01  
01 01 01  
01 01 10

$\mathcal{H} = \text{CONSENSO}((\mathcal{F} \cup \mathcal{D}) \# \alpha, \alpha)$  si ottiene come unione dei cubi generati applicando l'operazione di consenso tra i singoli cubi di  $(\mathcal{F} \cup \mathcal{D}) \# \alpha$  e il cubo  $\alpha$ .

$\text{CONSENSO}(01\ 10\ 01, 10\ 10\ 11)$ :

11 10 01  
00 10 01  
00 10 11

(genera il cubo ponte  $b'c$ ).

$\text{CONSENSO}(01\ 01\ 01, 10\ 10\ 11)$ :

11 00 01  
00 11 01  
00 00 11

(non genera alcun cubo ponte).

$\text{CONSENSO}(01\ 01\ 10, 10\ 10\ 11)$ :

11 00 10  
00 11 10  
00 00 11

(non genera alcun cubo ponte).

In conclusione,  $\mathcal{H} = \text{CONSENSO}((\mathcal{F} \cup \mathcal{D}) \# \alpha, \alpha)$ :

11 10 01

che è il cubo  $b'c$ .

$\mathcal{H} \cup \mathcal{D}$  copre  $\alpha$  ?

Sappiamo che  $\alpha \subseteq \mathcal{H} \cup \mathcal{D}$  se e solo se  $(\mathcal{H} \cup \mathcal{D})_\alpha = 1$ .

$(\mathcal{H} \cup \mathcal{D})_\alpha = (11\ 10\ 01)_{(10\ 10\ 11)} = 11\ 11\ 01$ , che è il cubo  $c$  e perciò non è la tautologia (cioè non è l'universo che sarebbe il cubo  $11\ 11\ 11$ ). Perciò  $\alpha$  non è contenuto in  $\mathcal{H} \cup \mathcal{D}$  e quindi  $\alpha$  è essenziale.

- (e) Applicando il corollario precedente, si determini se l'implicante primo  $b'c$  è essenziale. Si mostrino i calcoli in dettaglio.

Traccia di soluzione.

Il cubo  $b'c$  in notazione posizionale si scrive come  $a_1a_2a_3 = 11\ 10\ 01$ , etc.

In base al corollario dobbiamo calcolare se  $\mathcal{H} \cup \mathcal{D}$  copre  $\alpha$ .

Si consideri la copertura iniziale  $\mathcal{F}$  ( $\mathcal{D} = \emptyset$ ) e  $\alpha = 11\ 10\ 01$ :

$a'b'c'$	10	10	10
$a'b'c$	10	10	01
$ab'c$	01	10	01
$abc$	01	01	01
$abc'$	01	01	10

$\mathcal{D} = \emptyset$ .

$(\mathcal{F} \cup \mathcal{D}) \# \alpha$  si ottiene come unione dei cubi generati applicando l'operazione  $\#$  tra i singoli cubi di  $(\mathcal{F} \cup \mathcal{D})$  e il cubo  $\alpha$ .

10 10 10  $\#$  11 10 01:

00	10	10
10	00	10
10	10	10

(genera il cubo minuendo  $a'b'c'$ ).

10 10 01  $\#$  11 10 01:

00	10	01
10	00	01
10	10	00

(si tratta di cubi vuoti come ci aspetta dalla definizione dell'operatore  $\#$  che sottrae i punti del secondo cubo da quelli del primo cubo).

01 10 01  $\#$  11 10 01:

00	10	01
01	00	01
01	10	00

(si tratta di cubi vuoti come ci aspetta dalla definizione dell'operatore  $\#$  che sottrae i punti del secondo cubo da quelli del primo cubo).

01 01 01 # 11 10 01:

00 01 01  
01 01 01  
01 01 00

(genera il cubo minuendo abc).

01 01 10 # 11 10 01:

00 01 10  
01 01 10  
01 01 10

(genera il cubo minuendo abc').

In conclusione,  $(\mathcal{F} \cup \mathcal{D}) \# \alpha$ :

10 10 10  
01 01 01  
01 01 10



$\mathcal{H} = \text{CONSENSO}((\mathcal{F} \cup \mathcal{D}) \# \alpha, \alpha)$  si ottiene come unione dei cubi generati applicando l'operazione di consenso tra i singoli cubi di  $(\mathcal{F} \cup \mathcal{D}) \# \alpha$  e il cubo  $\alpha$ .

$\text{CONSENSO}(10\ 10\ 10, 11\ 10\ 01)$ :

11 10 00  
10 10 00  
10 10 11

(genera il cubo ponte a'b').

$\text{CONSENSO}(01\ 01\ 01, 11\ 10\ 01)$ :

11 00 01  
01 11 01  
01 00 01

(genera alcun cubo ponte  $ac$ ).

$\text{CONSENSO}(01\ 01\ 10, 11\ 10\ 01)$ :

11 00 01  
01 11 00  
01 00 11

(non genera alcun cubo ponte).

In conclusione,  $\mathcal{H} = \text{CONSENSO}((\mathcal{F} \cup \mathcal{D}) \# \alpha, \alpha)$ :

a'b' 10 10 11  
ac 01 11 01

$\mathcal{H} \cup \mathcal{D}$  copre  $\alpha$ ?

Sappiamo che  $\alpha \subseteq \mathcal{H} \cup \mathcal{D}$  se e solo se  $(\mathcal{H} \cup \mathcal{D})_\alpha = 1$ .

$(\mathcal{H} \cup \mathcal{D})_\alpha = (10\ 10\ 11 \cup 01\ 11\ 01)_{(11\ 10\ 01)} = (10\ 11\ 11 \cup 01\ 11\ 11)$ , che e' la somma di cubi  $a' + a$  e quindi e' la tautologia (cioe' e' l'universo 11 11 11). Percio'  $\alpha$  e' contenuto in  $\mathcal{H} \cup \mathcal{D}$  e quindi  $\alpha$  non e' essenziale.

- (f) Applicando il corollario precedente, si stabilisca quali implicanti primi della seguente copertura di una funzione multi-valore sono essenziali:

```

.mv 3 0 5 5 5
11111 00001 11110
01100 00011 01010
01010 00100 11111
00110 01001 11010
00001 11111 10110
.e

```

Si ricordi che nel caso multi-valore la distanza tra i termini prodotto  $S$  and  $T$  e' il numero di letterali vuoti dell'intersezione  $S \cap T$  e che il consenso si definisce in generale come:

$$\text{CONSENSO}(S, T) = \emptyset \text{ se } \text{distanza}(S, T) \geq 2,$$

$$\text{CONSENSO}(S, T) = \bigcup_{i=1}^n X_1^{S_1 \cap T_1} \dots X_i^{S_i \cup T_i} \dots X_n^{S_n \cap T_n} \text{ altrimenti.}$$

17. Date le funzioni

$$f_1 = \bar{a}\bar{b}c + \bar{a}b\bar{c} + a\bar{b}\bar{c}$$
$$f_2 = \bar{a}bc + \bar{a}\bar{b}c + abc + a\bar{b}\bar{c}$$

- (a) Si generino tutti i primi di  $f_1$  usando la procedura monotona ricorsiva di generazione dei primi;
- (b) Si generino tutti i primi di  $f_2$  usando la procedura monotona ricorsiva di generazione dei primi;
- (c) Si generi con l'algoritmo di tautologia la tavola di Quine-McCluskey ridotta di  $f_1$ ;
- (d) Si generi con l'algoritmo di tautologia la tavola di Quine-McCluskey ridotta di  $f_2$ ;

Nota: in alternativa alla procedura monotona si possono calcolare i primi con l'algoritmo di espansione rispetto al complemento della funzione.

18. (a) Si generino tutti i primi della funzione multi-uscita  $(f_1, f_2)$  (dove  $f_1$  e  $f_2$  sono date nel problema precedente), usando l'algoritmo di espansione rispetto al complemento della funzione.
- (b) Si generi la tavola di Quine-McCluskey ridotta della funzione multi-uscita  $(f_1, f_2)$  del problema precedente:

$$f_1 = \bar{a}\bar{b}c + \bar{a}b\bar{c} + a\bar{b}\bar{c}$$
$$f_2 = \bar{a}bc + \bar{a}\bar{b}c + abc + a\bar{b}\bar{c}$$

19. (a) Data la seguente funzione Booleana incompletamente specificata:

$$f = wx'y' + wxz'$$

$$d = xy'z + x'yz'$$

dove  $d$  sono i punti dove non e' specificata, si trovino tutti i primi con il metodo di ricorsione monotona.

Traccia di soluzione.

Una decomposizione ricorsiva e' la seguente

wxyz			
1002			
1120			
2101			
2010			
(g)			
x		!x	
1220		1202	
2201		2210	
(e)		(f)	
z	!z	y	!y
2202	1222	2220	1222
(a)	(b)	(c)	(d)

I seguenti primi sono associati ai vari stadi del processo:

- (a):  $\bar{y}$
- (b):  $w$
- (c):  $\bar{z}$
- (d):  $w$
- (e): i massimali in  $\{\bar{y}z, w\bar{z}, w\bar{y}\}$ , cioe'  $\bar{y}z, w\bar{z}, w\bar{y}$
- (f): i massimali in  $\{y\bar{z}, w\bar{y}, w\bar{z}\}$ , cioe'  $y\bar{z}, w\bar{y}, w\bar{z}$
- (g): i massimali in  $\{wx\bar{y}, x\bar{y}z, wx\bar{z}, \bar{x}y\bar{z}, w\bar{x}y, w\bar{x}z, w\bar{y}, w\bar{y}z, w\bar{y}z, wy\bar{z}, w\bar{z}\}$ ,  
cioe'  $w\bar{y}, w\bar{z}, \bar{x}y\bar{z}, x\bar{y}z$

Nel fondere i primi di due sottoalberi non si dimentichi di eseguire i prodotti incrociati.

(b) Data la funzione Booleana a 3 ingressi e 2 uscite

$$f_1 = xz' + x'z$$

$$f_2 = yz' + x'z + xy$$

e il cubo

x	y	z	f1	f2
-	1	-	0	1

si calcoli se il cubo e' contenuto nella funzione riducendo il problema a una verifica di tautologia.

Traccia.

Si tratti la funzione a due uscite come una funzione a piu' valori e una sola uscita (dove le uscite diventano un nuovo ingresso a due valori).

Traccia della soluzione.

L'idea e' di usare il teorema per cui dati un cubo  $c$  e una copertura  $F$ ,  $c \subseteq F \Leftrightarrow F_c = 1$ .

La funzione a piu' uscite data si puo' rappresentare con la seguente copertura  $F$ :

x	y	z	w
1	2	0	0
0	2	1	0
2	1	0	1
0	2	1	1
1	1	2	1

dove  $w$  e' la variabile ausiliaria binaria per rappresentare le uscite; inoltre si ha  $c$

x	y	z	w
2	1	2	1

Allora si tratta di verificare se  $F_c = 1$ , dove  $F_c$  si riduce a:

x	y	z	w
2	2	0	2
0	2	1	2
1	2	2	2

Applicando la ricorsione monotona si vede che si ha una tautologia in tutte le foglie.

	xyzw	
	2202	
	0212	
	1222	
x		!x
2202		2202
2222		2212
tautologia	z	!z
	2222	2222
	taut.	taut.

Perciò il cubo  $c$  dato è contenuto nella funzione  $(f_1, f_2)$ .

Per maggiore semplicità si poteva osservare che essendo  $c$  contenuto banalmente in  $f_1$  (come cubo vuoto nella prima uscita), il problema si poteva ridurre a verificare subito il contenimento solo per  $f_2$  per le tre variabili d'ingresso (senza introdurre la variabile  $w$  per le uscite).

20. (a) Si consideri la seguente funzione non completamente specificata  $\mathcal{F}$  il cui insieme di punti dove vale 1 e' rappresentato dalla copertura  $F = wx'y' + wxz'$ , e il cui insieme dei punti dove la funzione non e' specificata e' rappresentato dalla copertura  $D = xy' + x'yz'$ .

Si calcolino i primi della funzione con il paradigma di ricorsione monotona. Inoltre si ottenga una rappresentazione minima con il metodo di Quine-McCluskey.

Traccia di soluzione.

Si richiede di applicare il calcolo dei primi con il paradigma di ricorsione monotona decomponendo secondo Shannon la copertura e continuando fino a che alle foglie sono associate coperture monotone. Poi si risale per ottenere i primi delle coperture cofattorizzate.

I primi sono  $xy'$ ,  $x'yz'$ ,  $wz'$ ,  $wy'$ .



- (b) Si determini se la funzione completamente specificata  $f$  rappresentata dalla copertura  $F = wxy + wyz' + w'x'y' + w'z + xy' + w'y$  e' una tautologia usando il metodo di ricorsione monotona, mostrando il procedimento di calcolo.

Traccia di soluzione.

Si richiede di verificare la tautologia con il paradigma di ricorsione monotona, applicando tutte le condizioni strutturali note per stabilire quando una copertura rappresenta la tautologia.

Si decomponga rispetto a  $w$ . Si ottiene una copertura monotona positiva in  $x$  e monotona negativa in  $z$ . Se si cofattorizza rispetto a  $x'z$  si trova la funzione nulla. Percio' il cubo 1021 non e' coperto da  $F$  e la funzione non e' una tautologia.

21. (a) Si consideri la seguente funzione Booleana  $f$  rappresentata dalla copertura

$$F = v'xyz + v'w'x + v'x'z' + v'wxz + w'yz' + vw'z + vwx'z.$$

Si calcolino i primi della funzione con il paradigma di ricorsione monotona.

**Avvertenza** Nelle risposte a tutte le domande di questo esercizio si richiede di scrivere i cubi mantenendo l'ordine delle variabili  $v, w, x, y, z$ .

- (b) Si ottenga una copertura di cardinalità minima con il metodo di Quine-McCluskey, eseguendo iterativamente i seguenti passi: essenziali, dominanza di righe, dominanza di colonne, e infine risoluzione del nucleo ciclico finale.
- (c) Si ottenga una copertura di cardinalità minima con il metodo di Quine-McCluskey, eseguendo iterativamente i seguenti passi: essenziali, dominanza di colonne, dominanza di righe, e infine risoluzione del nucleo ciclico finale.

Si commentino i risultati delle due procedure. E' garantito che produrranno la medesima copertura ? E' garantito che produrranno coperture della medesima cardinalità ?

22. Sia dato un circuito che puo' avere uno dei seguenti otto guasti:

$$\{g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6, g_7, g_8\}.$$

Si sono calcolati sei vettori di collaudo:

$$\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\},$$

ciascuno dei quali puo' rilevare alcuni dei guasti, secondo la seguente lista:

- (a)  $v_1$  rileva la presenza dei guasti  $\{g_1, g_3, g_5\}$ ;
- (b)  $v_2$  rileva la presenza dei guasti  $\{g_2, g_4, g_6\}$ ;
- (c)  $v_3$  rileva la presenza dei guasti  $\{g_1, g_2, g_4, g_7\}$ ;
- (d)  $v_4$  rileva la presenza dei guasti  $\{g_3, g_5, g_8\}$ ;
- (e)  $v_5$  rileva la presenza dei guasti  $\{g_2, g_6, g_8\}$ ;
- (f)  $v_6$  rileva la presenza dei guasti  $\{g_3, g_4, g_7\}$ .

Si trovi un sottoinsieme minimo dei vettori di guasto che rilevi tutti gli otto possibili guasti, se presenti. Si supponga che il circuito abbia al piu' un guasto e che tutti i vettori di collaudo abbiano lo stesso costo.

Traccia. Lo si modelli come un problema di copertura monotona.

23. Si descriva la procedura basata sull'espansione di Shannon per il calcolo degli'implicanti primi di una funzione a piu' valori. Si spieghino le operazioni usate nel calcolo e se ne argomenti informalmente la correttezza.

24. (a) Per una funzione a due valori, si definiscano le seguenti nozioni:

- i. monotonia crescente rispetto a una variabile,
- ii. monotonia decrescente rispetto a una variabile,
- iii. monotonia rispetto a una variabile,
- iv. monotonia.

Traccia di soluzione.

Intuitivamente, una funzione Booleana  $f$  e' monotona crescente in  $x_i$  se cambiando  $x_i$  da 0 a 1 la funzione  $f$  rimane invariata o cambia da 0 a 1.

Una funzione  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  si dice monotona crescente in  $x_i$  se e solo se  $f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n) \subseteq f(x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n)$ ,

$\forall x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n$ .

Una funzione  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  si dice monotona decrescente in  $x_i$  se e solo se  $f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n) \supseteq f(x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n)$ ,

$\forall x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n$ .

Se non e' vera nessuna delle due proprieta',  $f$  non e' monotona in  $x_i$ .

Una funzione  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  si dice monotona in  $x_i$  se e solo se e' o monotona crescente o monotona decrescente in  $x_i$ .

Una funzione  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  si dice monotona se e solo se e' monotona in tutte le sue variabili.

(b) Si definisca la nozione di monotonia crescente e di monotonia decrescente rispetto a una variabile di una copertura  $F$  di una funzione  $f$  a due valori.

Traccia di soluzione.

Una copertura  $F$  si dice monotona crescente nella variabile  $x_i$  se e solo  $x_i$  non appare mai in fase negativa nei termini prodotto di  $F$ . Una copertura  $F$  si dice monotona decrescente nella variabile  $x_i$  se e solo  $x_i$  non appare mai in fase positiva nei termini prodotto di  $F$ . Se non e' vera nessuna delle due proprieta',  $F$  non e' monotona in  $x_i$ .

Se una funzione  $f$  e' monotona in  $x_1$  allora esiste una copertura di  $f$  monotona in  $x_i$ . Se una copertura  $F$  di  $f$  e' monotona in  $x_i$ , allora  $f$  e' monotona in  $x_i$ .

(c) Si consideri la seguente copertura  $F$  della funzione  $f(w, x, y, z)$ :

$w$	$x$	$y$	$z$
1	-	0	-
-	1	1	-
0	-	-	0
1	0	0	-
-	1	-	0

Si determini in quali variabili tale copertura  $F$  e' monotona.

Traccia di soluzione.

La copertura  $F$  e' monotona decrescente in  $z$ .

(d) Si consideri la funzione espressa dalla precedente copertura  $f = wy' + xy + w'z' + wx'y' + xz'$ . Si determini se ci sono delle variabili rispetto a cui  $f$  sia monotona crescente o decrescente, mostrando il procedimento per ottenere la risposta.

Traccia di soluzione.

Variabile  $z$ . La funzione  $f$  e' monotona decrescente in  $z$ , poiche' lo e' la sua copertura  $F$ .

Variabile  $x$ . Il quarto cubo e' contenuto nel primo cubo, percio' e' ridondante e si puo' eliminare. Si ottiene una copertura di  $f$  monotona crescente anche in  $x$ , per cui  $f$  e' monotona crescente anche in  $x$ .

Variabile  $w$ . Si verifichi se  $f_{\bar{w}} \subseteq f_w$ , cioe' se vale  $xy + z' + xz' \subseteq y' + xy + x'y' + xz'$ . Poiche'  $w'x'y'z' \in xy + z' + xz'$ , ma  $w'x'y'z' \notin y' + xy + x'y' + xz'$ , la disuguaglianza e' falsa. Anche la disuguaglianza  $f_w \subseteq f_{\bar{w}}$ , cioe'  $y' + xy + x'y' + xz' \subseteq xy + z' + xz'$ , e' falsa, poiche'  $w'x'y'z' \in y' + xy + x'y' + xz'$ , ma  $w'x'y'z' \notin xy + z' + xz'$ . Quindi  $f$  non e' monotona in  $w$ .

Variabile  $y$ . Si verifichi se  $f_{\bar{y}} \subseteq f_y$ , cioe' se vale  $w + w'z' + wx' + xz' \subseteq x + w'z' + xz'$ . Poiche'  $wx'y'z' \in w + w'z' + wx' + xz'$ , ma  $wx'y'z' \notin x + w'z' + xz'$ , la disuguaglianza e' falsa. Anche la disuguaglianza  $f_y \subseteq f_{\bar{y}}$ , cioe'  $x + w'z' + xz' \subseteq w + w'z' + wx' + xz'$ , e' falsa, poiche'  $w'xy'z' \in x + w'z' + xz'$ , ma  $w'xy'z' \notin w + w'z' + wx' + xz'$ . Quindi  $f$  non e' monotona in  $y$ .

Un metodo sistematico di trovare i punti di controesempio e' quello di ridurre il problema del contenimento (es.  $f_{\bar{w}} \subseteq f_w$ ) alla verifica di tautologia (es.  $(f_w)_{(f_{\bar{w}})} = 1$ ).

25. (a) Si dimostri o si trovi un controesempio alla seguente affermazione: una funzione Booleana a due valori e' monotona se e solo se ogni sua copertura e' monotona.

Traccia di soluzione.

Se una copertura  $F$  e' monotona in  $x_j$ , la funzione corrispondente e' monotona in  $x_j$ . Infatti, sia  $F$  monotona crescente in  $x_j$ , allora essa si puo' rappresentare come somma di prodotti dove in ogni prodotto o  $x_j$  non compare (valore 2) o compare in fase positiva (valore 1). Percio', dato un mintermine, cambiando  $x_j$  da 0 a 1, il valore della funzione o rimane invariato (c'e' un prodotto contenente il mintermine con  $x_j$  cambiato da 0 a 1 in cui la variabile  $x_j$  ha il valore 2) o cambia da 0 a 1 (in ogni prodotto contenente il mintermine con  $x_j$  cambiato da 0 a 1 la variabile  $x_j$  ha il valore 1).

E' falso che ogni copertura di una funzione monotona sia monotona. Si consideri il seguente semplice contro-esempio: la copertura  $F_1 = x'y'z' + x'yz' + x'z$  non e' monotona, ma esiste una copertura monotona equivalente  $F_2 = x'$  per cui la funzione  $f$  di cui  $F_1$  e  $F_2$  sono coperture e' monotona. Similmente la copertura  $G_1 = x'z' + y'z + z$  non e' monotona, ma esiste una copertura monotona equivalente  $G_2 = x' + z$  per cui la funzione  $g$  di cui  $G_1$  e  $G_2$  sono coperture e' monotona.

Pero' se una funzione e' monotona, c'e' almeno una copertura monotona. Supponiamo che  $f$  sia monotona crescente in  $x_j$ . Dato un mintermine con  $x_j = 0$  per cui la funzione vale 1, dato che cambiando il valore della coordinata  $x_j$  da 0 a 1 il valore di  $f$  non cambia oppure cambia da 0 a 1, vuol dire che si puo' definire un cubo dove la variabile  $x_j$  vale 2 (e il resto e' uguale al mintermine considerato); dato un mintermine con  $x_j = 0$  per cui la funzione vale 0, mentre cambiando  $x_j$  da 0 a 1 per lo stesso mintermine la funzione vale 1, si puo' definire un cubo dove la variabile  $x_j$  vale 1 e il resto e' uguale al mintermine considerato. In questo modo per ogni mintermine dove la funzione vale 1 si puo' definire un cubo dove la variabile  $x_j$  vale 2 o 1 e in tal modo si costruisce una copertura monotona crescente in  $x_j$ .

- (b) Si elenchino le proprietà principali delle funzioni binarie monotone e se ne commentino brevemente le loro applicazioni.

Traccia di soluzione.

- i. Il complemento di una funzione monotona è monotona.
- ii. I cofattori di una funzione monotona sono monotoni.
- iii. Ogni implicante primo di una funzione monotona è essenziale.
- iv. Una copertura di primi di una funzione monotona è monotona.
- v. Una copertura monotona è una tautologia se e solo se contiene il cubo tautologo.
- vi. Una copertura minimale rispetto al contenimento cubo a cubo è una copertura minima di primi.
- vii. Una copertura monotona minimale rispetto al contenimento cubo a cubo è la copertura minima unica.



26. (a) Si consideri la funzione  $f(a, b, c)$  rappresentata dalla seguente copertura  $F$ :

a	b	c
0	0	0
0	1	0
0	1	1
1	0	0
1	0	1
1	1	0
1	1	1

Si determini in quali variabili tale copertura  $F$  e' monotona.

Traccia di soluzione.

La copertura  $F$  non e' monotona in alcuna variabile.

(b) Si consideri la funzione  $f$  espressa dalla precedente copertura. Si determini se ci sono delle variabili rispetto a cui  $f$  sia monotona crescente o decrescente, mostrando il procedimento per ottenere la risposta.

Traccia di soluzione.

La funzione  $f$  e' monotona crescente nelle variabili  $a$  e  $b$ , e monotona decrescente nella variabile  $c$ . Cio' e' testimoniato dalla copertura  $f = a + b + c'$ .

27. (a) Si consideri la funzione  $f(a, b, c, d)$  rappresentata dalla seguente copertura  $F$ :

a	b	c	d
0	0	0	0
0	0	0	1
0	0	1	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	0	1
0	1	1	0
0	1	1	1
1	0	1	0
1	0	1	1
1	1	1	0
1	1	1	1

Si determini in quali variabili tale copertura  $F$  e' monotona.

Traccia di soluzione.

La copertura  $F$  non e' monotona in alcuna variabile.

- (b) Si consideri la funzione  $f$  espressa dalla precedente copertura. Si determini se ci sono delle variabili rispetto a cui  $f$  sia monotona crescente o decrescente, mostrando il procedimento per ottenere la risposta.

Traccia di soluzione.

La funzione  $f$  e' monotona decrescente nella variabile  $a$ , e monotona crescente nella variabile  $c$ , ed e' monotona sia crescente che decrescente nelle variabili  $b$  e  $d$ . Cio' e' testimoniato dalla copertura  $f = a' + c$ .

- (c) Stabilire per ognuna delle seguenti affermazioni se e' vera o falsa, motivando la risposta.
- i. Una funzione e' monotona se e solo se esiste una copertura monotona.  
Traccia di soluzione.  
VERO.
  - ii. Una funzione e' monotona se e solo se ogni copertura e' monotona.  
Traccia di soluzione.  
FALSO. Una funzione monotona puo' avere coperture non-monotone (ma ovviamente deve avere almeno una copertura monotona).
  - iii. Se una copertura con degli implicanti non-primi e' monotona, la funzione e' monotona.  
Traccia di soluzione.  
VERO. Basta che ci sia una copertura monotona per dedurre che la funzione e' monotona.  
Domanda: Puo' esistere una copertura monotona con degli implicanti non-primi ? Risposta: Si, ma deve essere ridondante. Es.  $f(a, b) = b + ab$ .
  - iv. Se una copertura con degli implicanti non-primi non e' monotona, la funzione non e' monotona.  
Traccia di soluzione.  
FALSO. Ci potrebbe essere un'altra copertura monotona a testimoniare che la funzione e' monotona. Tale copertura potrebbe contenere anche non-primi o solo primi. (es.  $f(a, b) = b + ab + a'b$ ,  $f(a, b) = b + ab$ ,  $f(a, b) = b$ ).
  - v. Se una copertura di primi e' monotona, la funzione e' monotona.  
Traccia di soluzione.  
VERO. Basta che ci sia una copertura monotona (una copertura di primi e' una copertura), affinche' la funzione sia monotona.
  - vi. Se una copertura di primi non e' monotona, la funzione non e' monotona.  
Traccia di soluzione.  
VERO. E' la contropositiva del teorema: *una copertura di primi di una funzione monotona e' monotona*, che si puo' riscrivere come: *se una funzione e' monotona, allora ogni sua copertura di primi e' monotona*.
  - vii. Solo una tavola di verita' puo' indicare se una funzione e' monotona.

Traccia di soluzione.

FALSO. Non serve avere la tavola della verità, basta una qualsiasi copertura (la cui espansione a primi produce una copertura monotona se e solo la funzione è monotona).

- viii. Per stabilire se una funzione è monotona, è necessario generare tutti i primi.

Traccia di soluzione.

FALSO. Non serve generare tutti i primi, basta avere una copertura di primi (che si ottiene espandendo a primi i cubi di una copertura data).

- ix. Una funzione completamente specificata è monotona positiva in  $x_i$  se e solo se ogni sua copertura minima (rappresentazione minima come somma di prodotti primi) non contiene il letterale  $x'_i$ .

Traccia di soluzione.

VERO. Si noti che una funzione monotona ha un'unica copertura minima che contiene tutti i primi (in quanto sono tutti essenziali).

28. Si consideri la funzione a due valori con 4 ingressi e 1 uscita rappresentata dalla copertura  $F = a'b + a' + bd + bc' + bc'd$ .

Applicando l'algoritmo per la complementazione delle funzioni monotone si ottenga una copertura  $F'$  del complemento  $f'$ . Si verifichi anche che il risultato e' corretto, mostrando le coperture di  $f$  e  $f'$  su una mappa di Karnaugh.

Traccia di soluzione.

Si ottiene la seguente matrice di personalita'  $B$ :

a	b	c	d
1	1	0	0
1	0	0	0
0	1	0	1
0	1	1	0
0	1	1	1

le cui coperture minimali sono:  $(a, b)$ ,  $(a, c, d)$  da cui si ottiene la seguente copertura del complemento:

$$F' = ab' + acd'$$

29. Usando il paradigma di ricorsione monotona si calcoli il complemento  $\bar{f}$  della seguente funzione  $f$ :

```
.mv 3 0 5 5 5
11111 00001 11110
01100 00011 01010
01010 00100 11111
00110 01001 11010
00001 11111 10110
.e
```

La copertura precedente di  $f$  e' debolmente monotona ?

La copertura ottenuta di  $\bar{f}$  e' debolmente monotona ?

30. (a) Si dimostri che se una funzione  $f$  è fortemente monotona, allora il suo complemento  $\bar{f}$  è una funzione fortemente monotona.
- (b) La copertura del complemento ottenuta con il procedimento di complementazione monotona è minima? Dimostrarlo o proporre un controesempio.

31. (a) Si definiscano la nozione di monotonia per funzioni binarie e quella di monotonia debole per le funzioni a piu' valori.

Traccia di soluzione.

Si vedano le dispense per i dettagli.

Una funzione Booleana  $f$  e' monotona crescente (decescente) in  $x_j$  se cambiando  $x_j$  da 0 a 1 la funzione  $f$  rimane invariata o cambia da 0 a 1 (da 1 a 0).

Due definizioni equivalenti sono:

Una funzione Booleana  $f$  e' monotona crescente (decescente) in  $x_j$  se  $f(m_-) \leq f(m_+)$  ( $f(m_-) \geq f(m_+)$ ), per ogni coppia di mintermini  $m_-, m_+$  che differiscono nella variabile  $x_j$  (a 0 in  $m_-$  e a 1 in  $m_+$ ).

Una funzione Booleana  $f$  e' monotona crescente (decescente) in  $x_j$  se  $f_{\bar{x}_j} \subseteq f_{x_j}$  ( $f_{\bar{x}_j} \supseteq f_{x_j}$ ).

Accettata una come definizione le altre ne conseguono come teoremi.

Una funzione Booleana  $f$  e' debolmente monotona in  $X_j$  se esiste un valore  $i$  tale che cambiando  $X_j$  dal valore  $i$  ad un qualsiasi altro valore  $k$ , la funzione  $f$  rimane invariata o cambia da 0 a 1. Il caso binario e' un caso speciale per  $i = 0$  (monotonia crescente) o  $i = 1$  (monotonia decrescente).



(b) Quali proprietà fondamentali della monotonia per funzioni binarie si estendono alla monotonia debole per funzioni a più valori ?

Traccia di soluzione.

Si vedano le dispense per i dettagli.

Ci sono tre proprietà fondamentali della monotonia nel caso binario:

- (a) Una copertura monotona è la tautologia se e solo se contiene il cubo universale.
- (b) Tutti gli implicanti primi di una funzione monotona sono essenziali.
- (c) Il complemento di una funzione monotona è monotona.

La prima vale anche nel caso di coperture debolmente monotone. Le altre due non valgono per coperture debolmente monotone.

La prima proprietà nel caso della monotonia debole si dimostra come caso particolare della seguente proposizione. Sia  $F$  una copertura debolmente monotona nella variabile  $X_i$ , e sia  $G = \{c \in F \mid c \text{ non dipende da } X_i\}$ . Allora  $G = 1 \Leftrightarrow F = 1$ . Infatti come suo corollario si deduce che una copertura debolmente monotona è una tautologia se e solo se uno dei cubi della copertura è il cubo universale.

Un'altra proprietà della monotonia debole usata per calcolare il supercubo del complemento (cioè il cubo più piccolo che contiene il complemento) è che se  $F$  è una copertura debolmente monotona e  $F^i$  rappresenta l' $i$ -esimo cubo della copertura allora

$$\text{supercubo}(\overline{F}) = \bigcap_{i=1}^{|\overline{F}|} \text{supercubo}(\overline{F}^i).$$

32. (a) Si consideri la seguente copertura della funzione  $f$ :

$w$	$x$	$y$	$z$	$f$
1	-	0	-	1
-	1	1	-	1
0	-	-	0	1
1	0	0	-	1
-	1	-	0	1

Si determini in quali variabili tale copertura e' monotona.

(b) Si consideri la funzione  $f = wy' + xy + w'z' + wx'y' + xz'$ . Si determini se ci siano delle variabili rispetto a cui  $f$  e' monotona, mostrando il procedimento per ottenere la risposta.

33. Si determini se la funzione  $f = wxy + wyz' + w'x'y' + w'z + xy' + w'y$  e' una tautologia usando il metodo di ricorsione monotona, mostrando il procedimento di calcolo.

34. Si consideri una funzione incompletamente specificata rappresentata con la seguente copertura  $F$ :

	a	b	c	d
c1	2	0	0	2
c2	2	0	2	1
c3	1	0	2	2
c4	1	2	2	0
c5	2	1	2	0
c6	2	2	0	0
c7	1	2	1	2

dove  $D$  rappresenta l'insieme dei punti dove la funzione non e' specificata:

	a	b	c	d
1	1	1	1	1
2	0	0	0	1

Si vogliono calcolare le sottocoperture irridondanti di quella data. Si faccia riferimento all'algorithmo presentato in classe, dove s'introduce una variabile  $y_i$  per ogni cubo  $c_i$ .

(a) Si descriva brevemente l'algoritmo presentato in classe.

Si vedano le note del corso.

L'algoritmo si basa due fatti:

- i.  $c \subseteq F$  se e solo se  $F_c = 1$ .
- ii. Una copertura monotona e' tautologa se c'e' almeno una riga che rappresenta l'universo (riga di tutti 2).

L'obiettivo e' calcolare  $g(y)$ , cui si arriva calcolando  $\bar{g}$  e poi complementando. Per calcolare  $\bar{g}$ , si calcola  $F_c$  per ogni cubo  $c \in F$ ; siccome  $c \in F$  deve risultare  $F_c = 1$  (se  $c \in F$ , a fortiori  $c \subseteq F$ ). Sviluppando l'albero del calcolo della tautologia di  $F_c$  sino a foglie tutte monotone, ogni tale foglia indica attraverso le sue righe universali (fatte di 2) quali cubi dovrebbero essere rimossi contemporaneamente per scoprire almeno un punto di  $c$ , definendo un implicante di  $\bar{g}$ . Complementando  $\bar{g}$ , si ottiene la  $g(y)$ , cioe' le combinazioni di cubi  $c$  da tenere nella copertura finale per coprire tutti i punti coperti dalla  $F$  originale.

Si deve tenere conto anche di  $D$  (copertura dei punti dove la funzione non e' definita come 1 o 0), perche' se un cubo  $c$  risultasse scoperto in punti che appartengono a  $D$  (indicato da una riga di 2 in  $D_c$ ), allora tale foglia non porterebbe informazioni su cubi da non rimuovere contemporaneamente (perche' la rimozione dei cubi corrispondenti a righe di 2 in  $F_c$  scoprirebbe punti in  $D$ , come dimostrato da righe di 2 in  $D_c$ ).

Un implicante primo massimo di  $g$  (cioe' con il minimo numero di letterali) definisce una sottocopertura irridondante di  $F$  di cardinalita' minima.

(b) Si scriva la funzione  $g(y)$  per ispezione della copertura data.

Traccia di soluzione.

Per ogni punto dove la funzione vale 1 (sono 9) si determinano i primi  $c_i$  della copertura  $F$  che lo contengono (il primo  $c_i$  e' denotato dalla variabile  $y_i$ ).

$$0000 \Rightarrow y_1 + y_6$$

$$0011 \Rightarrow y_2$$

$$0100 \Rightarrow y_5 + y_6$$

$$0110 \Rightarrow y_5$$

$$1000 \Rightarrow y_1 + y_3 + y_4 + y_6$$

$$1011 \Rightarrow y_2 + y_3 + y_7$$

$$1010 \Rightarrow y_3 + y_4 + y_7$$

$$1100 \Rightarrow y_4 + y_5 + y_6$$

$$1110 \Rightarrow y_4 + y_5 + y_7$$

$$g(y) = (y_1 + y_6)y_2(y_5 + y_6)y_5(y_1 + y_3 + y_4 + y_6)(y_2 + y_3 + y_7)(y_3 + y_4 + y_7)(y_4 + y_5 + y_6)(y_4 + y_5 + y_7).$$

- (c) Si calcoli la funzione  $\bar{g}_1(y)$ , usando l'algoritmo di tautologia modificato per determinare le condizioni che falsificano la tautologia. Si commentino i passi dell'algoritmo.

Traccia di soluzione.

**In conclusione** risulta  $\bar{g}_1(y) = \bar{y}_1\bar{y}_6$ .

- (d) Si calcoli la funzione  $\bar{g}_2(y)$ , usando l'algoritmo di tautologia modificato per determinare le condizioni che falsificano la tautologia. Si commentino i passi dell'algoritmo.

Traccia di soluzione.

**Calcolo di  $\bar{g}_2(y)$ .**

Si cofattorizza la copertura  $[FD]$  rispetto al cubo  $c_2$  ottenendosi  $[F_{c_2}D_{c_2}]$ .

$F_{c_2}$ :

a	b	c	d	
2	2	0	2	$c_1$
2	2	2	2	$c_2$
1	2	2	2	$c_3$
1	2	1	2	$c_7$

$D_{c_2}$ :

2	2	0	2
---	---	---	---

Poi si cofattorizza la precedente copertura  $[F_{c_2}D_{c_2}]$  fino ad arrivare a foglie monotone.

Poiche' la colonna di  $c$  non e' monotona, si cofattorizza rispetto a tale variabile, rispetto sia a  $\bar{c}$  che a  $c$ .

$(F_{c_2})_{\bar{c}}$ :

2	2	2	2	$c_1$
2	2	2	2	$c_2$
1	2	2	2	$c_3$

$(D_{c_2})_{\bar{c}}$ :

2	2	2	2
---	---	---	---

Non c'e' modo di non avere la tautologia in questa foglia eliminando dei cubi  $c_i$  (cioe' in questo caso eliminando  $c_1$  e  $c_2$ ) per la presenza di una riga di 2 proveniente da  $D$ . In altri termini, il sottospazio di questo ramo di cofattorizzazione (prima rispetto a  $c_2$ , poi rispetto a  $\bar{c}$ ), contiene solo punti di  $[FD]$  che sono in  $D$  (sono i punti 0001 e 1001) e che percio' non importerebbe se rimanessero scoperti eliminando dei cubi  $c_i$ . Percio' questa foglia non contribuisce a  $\bar{g}_2$ .



$(F_{c_2})_c:$

2 2 2 2  $c_2$

1 2 2 2  $c_3$

1 2 2 2  $c_7$

$(D_{c_2})_c:$

$\emptyset$ .

Se si rimovesse il cubo  $c_2$  non si avrebbe piu' la tautologia, perche'  $c_2$  non sarebbe ricopribile dall'unione degli altri cubi, rimanendo scoperto il punto 0011. Si noti anche che il cubo  $c_2$  e' l'unico a coprire tale punto 0011, il che lo rende primo essenziale.

**In conclusione** risulta  $\bar{g}_2(y) = \bar{y}_2$ .

- (e) Si calcoli la funzione  $\bar{g}_3(y)$ , usando l'algoritmo di tautologia modificato per determinare le condizioni che falsificano la tautologia. Si commentino i passi dell'algoritmo.

Traccia di soluzione.

**Calcolo di  $\bar{g}_3(y)$ .**

Si cofattorizza la copertura  $[FD]$  rispetto al cubo  $c_3$  ottenendosi  $[F_{c_3}D_{c_3}]$ .

$F_{c_3}$ :

a	b	c	d	
2	2	0	2	c1
2	2	2	1	c2
2	2	2	2	c3
2	2	2	0	c4
2	2	0	0	c6
2	2	1	2	c7

$D_{c_3}$ :

2	2	0	1
---	---	---	---

Poi si cofattorizza la precedente copertura  $[F_{c_3}D_{c_3}]$  fino ad arrivare a foglie monotone.

Dato che la colonna di  $c$  non e' monotona, si cofattorizza rispetto a tale variabile, rispetto sia a  $\bar{c}$  che a  $c$ .

**Ramo**  $([FD]_{c_3})_{\bar{c}}$

$(F_{c_3})_{\bar{c}}$ :

2 2 2 2 c1

2 2 2 1 c2

2 2 2 2 c3

2 2 2 0 c4

2 2 2 0 c6

$(D_{c_3})_{\bar{c}}$ :

2 2 2 1

Poiche' la colonna di  $d$  non e' monotona, si cofattorizza rispetto a tale variabile, rispetto sia a  $\bar{d}$  che a  $d$ .

$((F_{c_3})_{\bar{c}})_{\bar{d}}$ :

2 2 2 2 c1

2 2 2 2 c3

2 2 2 2 c4

2 2 2 2 c6

$((D_{c_3})_{\bar{c}})_{\bar{d}}$ :

$\emptyset$ .

Se si rimuovessero contemporaneamente i cubi  $c_1, c_3, c_4, c_6$  non si avrebbe piu' la tautologia, perche'  $c_3$  non sarebbe ricopribile dall'unione degli altri cubi rimasti, rimanendo scoperto il punto 1000.

$((F_{c_3})_{\bar{c}})_d$ :

2 2 2 2 c1

2 2 2 2 c2

2 2 2 2 c3

$((D_{c_3})_{\bar{c}})_d$ :

2 2 2 2

Questa foglia non contribuisce termini prodotto.

**Ramo**  $([FD]_{c_3})_c$

$(F_{c_3})_c$ :

2 2 2 1 c2

2 2 2 2 c3

2 2 2 0 c4

2 2 2 2 c7

$(D_{c_3})_c$ :

$\emptyset$ .

Poiche' la colonna di  $d$  non e' monotona, si cofattorizza rispetto a tale variabile, rispetto sia a  $\bar{d}$  che a  $d$ .

$((F_{c_3})_c)_{\bar{d}}$ :

2 2 2 2 c3

2 2 2 2 c4

2 2 2 2 c7

$((D_{c_3})_c)_{\bar{d}}$ :

$\emptyset$ .

Se si rimuovessero contemporaneamente i cubi  $c_3, c_4, c_7$  non si avrebbe piu' la tautologia, perche'  $c_3$  non sarebbe ricopribile dall'unione degli altri cubi rimasti, rimanendo scoperto il punto 1010.

$((F_{c_3})_c)_d$ :

2 2 2 2 c2

2 2 2 2 c3

2 2 2 2 c7

$((D_{c_3})_c)_d$ :

$\emptyset$ .

Se si rimuovessero contemporaneamente i cubi  $c_2, c_3, c_7$  non si avrebbe piu' la tautologia, perche'  $c_3$  non sarebbe ricopribile dall'unione degli altri cubi rimasti, rimanendo scoperto il punto 1011.

**In conclusione** risulta  $\bar{g}_3(y) = \bar{y}_1\bar{y}_3\bar{y}_4\bar{y}_6 + \bar{y}_3\bar{y}_4\bar{y}_7 + \bar{y}_2\bar{y}_3\bar{y}_7$ .

- (f) Si calcoli la funzione  $\bar{g}_4(y)$ , usando l'algoritmo di tautologia modificato per determinare le condizioni che falsificano la tautologia. Si commentino i passi dell'algoritmo.

Traccia di soluzione.

**In conclusione** risulta  $\bar{g}_4(y) = \bar{y}_1\bar{y}_3\bar{y}_4\bar{y}_6 + \bar{y}_3\bar{y}_4\bar{y}_7 + \bar{y}_4\bar{y}_5\bar{y}_6 + \bar{y}_4\bar{y}_5\bar{y}_7$ .

- (g) Si calcoli la funzione  $\bar{g}_5(y)$ , usando l'algoritmo di tautologia modificato per determinare le condizioni che falsificano la tautologia.

Traccia di soluzione.

**In conclusione** risulta  $\bar{g}_5(y) = \bar{y}_5\bar{y}_6 + \bar{y}_5 = \bar{y}_5$ .

- (h) Si calcoli la funzione  $\bar{g}_6(y)$ , usando l'algoritmo di tautologia modificato per determinare le condizioni che falsificano la tautologia.

Traccia di soluzione.

**In conclusione** risulta  $\bar{g}_6(y) = \bar{y}_1\bar{y}_6 + \bar{y}_5\bar{y}_6$ .

- (i) Si calcoli la funzione  $\bar{g}_7(y)$ , usando l'algoritmo di tautologia modificato per determinare le condizioni che falsificano la tautologia.

Traccia di soluzione.

**In conclusione** risulta  $\bar{g}_7(y) = \bar{y}_3\bar{y}_4\bar{y}_7 + \bar{y}_2\bar{y}_3\bar{y}_7 + \bar{y}_4\bar{y}_5\bar{y}_7$ .

- (j) Date le funzioni  $\bar{g}_i(y), i = 1, \dots, n$ , si ottenga  $\bar{g}(y)$  e poi si calcoli  $g(y)$ . si effettui la complementazione con l'algoritmo specializzato per funzioni monotone (passando dalla matrice di personalita'  $B$ ).

Infine, si ricavi dalla  $g(y)$  una sottocopertura irridondante minima della copertura  $F$  originale.

Traccia di soluzione.

Dai calcoli precedenti con l'algoritmo di tautologia modificato per determinare le condizioni che falsificano la tautologia si sono determinate le seguenti funzioni  $\bar{g}_i(y), i = 1, \dots, 7$ :

- i.  $\bar{g}_1(y) = \bar{y}_1\bar{y}_6$ ,
- ii.  $\bar{g}_2(y) = \bar{y}_2$ ,
- iii.  $\bar{g}_3(y) = \bar{y}_1\bar{y}_3\bar{y}_4\bar{y}_6 + \bar{y}_3\bar{y}_4\bar{y}_7 + \bar{y}_2\bar{y}_3\bar{y}_7$ ,
- iv.  $\bar{g}_4(y) = \bar{y}_1\bar{y}_3\bar{y}_4\bar{y}_6 + \bar{y}_3\bar{y}_4\bar{y}_7 + \bar{y}_4\bar{y}_5\bar{y}_6 + \bar{y}_4\bar{y}_5\bar{y}_7$ ,
- v.  $\bar{g}_5(y) = \bar{y}_5\bar{y}_6 + \bar{y}_5 = \bar{y}_5$ ,
- vi.  $\bar{g}_6(y) = \bar{y}_1\bar{y}_6 + \bar{y}_5\bar{y}_6$ ,
- vii.  $\bar{g}_7(y) = \bar{y}_3\bar{y}_4\bar{y}_7 + \bar{y}_2\bar{y}_3\bar{y}_7 + \bar{y}_4\bar{y}_5\bar{y}_7$ .

da cui  $\bar{g}(y) = \sum_{i=1}^7 \bar{g}_i(y)$ .

Semplificando con il contenimento cubo a cubo ( $\bar{g}(y)$  e' monotona) si ottiene la forma minimizzata  $\bar{g}(y) = \bar{y}_1\bar{y}_6 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3\bar{y}_4\bar{y}_7 + \bar{y}_5$ .

La matrice di personalita'  $B$  e' data da:

$$\begin{array}{ccccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array}$$

Una copertura minima di  $B$  corrisponde a una sottocopertura irridondante minima della  $F$  data

Le coperture minimali (e minime) di colonne sono:  $(1, 6)(2)(5)(3, 4, 7)$ ,  
cioe'  $(2, 5, 1, 3), (2, 5, 1, 4), (2, 5, 1, 7), (2, 5, 6, 3), (2, 5, 6, 4), (2, 5, 6, 7)$ ,  
il che corrisponde alla copertura di  $g(y)$  espressa come:  $g(y) = y_2y_5y_1y_3 + y_2y_5y_1y_4 + y_2y_5y_1y_7 + y_2y_5y_6y_3 + y_2y_5y_6y_4 + y_2y_5y_6y_7$ .

Qualsiasi termine prodotto della precedente copertura definisce una copertura irridondante della funzione originale, ad es.  $y_2y_5y_1y_3$  corrisponde alla copertura irridondante  $\{c_1, c_2, c_3, c_5\}$ . In tutto ci sono 7 coperture irridondanti della funzione originale tutte con la medesima cardinalita' minima di 4 cubi.

35. (a) Si ottenga il diagramma di decisione binaria ridotto e ordinato secondo l'ordine  $x_1 < x_2 < x_3 < x_4$  (senza lati complementati) della funzione

$$f = x_1x_2 + \bar{x}_2x_3 + \bar{x}_1\bar{x}_3.$$

Si applichi la procedura *apply\_ite*. Si mostrino i passi del procedimento seguito.

Traccia di soluzione.

Si considerino come disponibili i diagrammi delle costanti 0 e 1 e delle variabili  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ . Si costruiscano prima i diagrammi dei singoli prodotti  $x_1x_2$ ,  $x_2x_3$  e  $\bar{x}_1\bar{x}_3$  usando *apply\_ite* per calcolare i prodotti. Poi si costruisca il diagramma della somma dei prodotti usando *apply\_ite* per calcolare le somme.

- (b) Si ottenga il diagramma di decisione binaria ridotto e ordinato della precedente funzione usando anche i lati complementati. Per farlo si ripeta la costruzione precedente usando anche il caso terminale

$$ITE(F, 0, 1) = F'$$

per scoprire quando usare lati complementati.

Si mostrino i passi del procedimento seguito.

Si adotti la convenzione che le negazioni compaiono solo sui lati *else*, per cui i lati *else* si etichettano con un cerchietto vuoto se sono regolari o con un cerchietto pieno se sono complementati (regola per verificare il diagramma della funzione: poiché i lati *then* non sono mai complementati, il valore di una funzione per il mintermine  $1, 1, \dots, 1$  sarà 0 se e solo se il lato uscente dal nodo associato alla funzione è complementato).

36. (a) Si ottenga il diagramma di decisione binaria ridotto e ordinato secondo l'ordine  $a < b < c$  (senza lati complementati) della funzione

$$f = (a + b)c.$$

Si mostrino i passi del procedimento seguito.



(b) Si ottenga il diagramma di decisione binaria ridotto e ordinato secondo l'ordine  $a < c < b$  (senza lati complementati) della funzione

$$f = (a + b)c.$$

Si mostrino i passi del procedimento seguito.

37. (a) Si ottenga il diagramma di decisione binaria ridotto e ordinato secondo l'ordine  $a < b < c < d$  (senza lati complementati) della funzione

$$f = abd' + ab'd + a'c + a'c'd.$$

Si mostrino i passi del procedimento seguito.

Traccia di soluzione.

Si applichi la procedura *robdd\_build*.

(b) Si ottenga il diagramma di decisione binaria ridotto e ordinato della precedente funzione usando anche i lati complementati, trasformando il diagramma precedente. Si mostrino i passi del procedimento seguito.

Si adotti la convenzione che le negazioni compaiono solo sui lati *else*, per cui i lati *else* si etichettano con un cerchietto vuoto se sono regolari o con un cerchietto pieno se sono complementati (regola per verificare il diagramma della funzione: poiché i lati *then* non sono mai complementati, il valore di una funzione per il mintermine  $1, 1, \dots, 1$  sarà 0 se e solo se il lato uscente dal nodo associato alla funzione è complementato).

Traccia di soluzione.

Si converta il grafo ottenuto in precedenza propagando una negazione dalla radice alle foglie. Si ottiene:

```
radice f: (un solo) lato complementato punta a nodo n1 con variabile a
nodo n1: lato T punta a nodo n2 con variabile b
         lato E complementato punta a nodo n3 con variabile c
nodo n2: lato T punta a nodo n4 con variabile d
         lato E complementato punta a nodo n4 con variabile d
nodo n3: lato T punta a nodo '1'
         lato E punta a nodo n4 con variabile d
nodo n4: lato T punta a nodo '1'
         lato E complementato punta a nodo '1'
```

Si noti che il grafo con i lati complementati ha 3 nodi in meno del precedente.

38. (a) Si ottenga il diagramma di decisione binaria ridotto e ordinato secondo l'ordine  $a < b$  (senza lati complementati) della funzione

$$f = a'b' + a'b + ab' + ab.$$

Si applichi la procedura *robdd\_build*. Si mostrino i passi del procedimento seguito.

Traccia di soluzione.

```
robdd_build(a'b' + a'b + ab' + ab,1) {
  φ ← π(1) /* = a */
  η ← robdd_build(b' + b,2) {
    φ ← π(2) /* = b */
    η ← robdd_build(1,3)
    return v1
  }
  λ ← robdd_build(1,3)
  return v1 /* η = λ */
}
λ ← robdd_build(b' + b,2) {
  φ ← π(2) /* = b */
  η ← robdd_build(1,3)
  return v1
}
return v1 /* η = λ */
}
```

Il diagramma risultante e' costituito dal solo nodo  $v_1$  a cui punta la funzione  $f$ .

- (b) Si ottenga il diagramma di decisione binaria ridotto e ordinato secondo l'ordine  $a < b$  (senza lati complementati) della funzione

$$g = (a' + b')(a' + b)(a + b')(a + b).$$

Si applichi la procedura *robdd\_build*. Si mostrino i passi del procedimento seguito.

Traccia di soluzione.

```
robdd_build((a' + b')(a' + b)(a + b')(a + b),1) {
  φ ← π(1) /* = a */
  η ← robdd_build(b'b(1 + b')(1 + b),2) {
    φ ← π(2) /* = b */
    η ← robdd_build(0,3)
    return v0
  }
  λ ← robdd_build(0,3)
  return v0 /* η = λ */
}
λ ← robdd_build((1 + b')(1 + b)b'b,2) {
  φ ← π(2) /* = b */
  η ← robdd_build(0,3)
  return v0
}
λ ← robdd_build(0,3)
return v0 /* η = λ */
}
```

Il diagramma risultante e' costituito dal solo nodo  $v_0$  a cui punta la funzione  $g$ .

Si noti che il punto di entrambi gli esercizi non e' semplificare come  $f = 1$  e  $g = 0$ , bensì' applicare meccanicamente la procedura *robdd\_build*, per ottenere come risultato finale rispettivamente il nodo che rappresenta la funzione identita' e il nodo che rappresenta la funzione nulla.

39. Si rappresentino con diagrammi di decisione binaria ridotti e ordinati secondo l'ordine  $a < b < c < d$  (senza lati complementati) le funzioni  $f$  e  $g$  rappresentate rispettivamente dalle seguenti coperture

$$F = ab + bcd',$$

e

$$G = ab + ac'd.$$

Si applichi la procedura *robdd\_build*. Si mostrino i passi del procedimento seguito e il grafo risultante.

Traccia di soluzione.

```

robdd_build( $F = ab + bcd'$ ,1) {
   $\phi \leftarrow \pi(1)$   $l^* = a^*$ 
   $\eta \leftarrow$  robdd_build( $b + bcd'$ ,2) {
     $\phi \leftarrow \pi(2)$   $l^* = b^*$ 
     $\eta \leftarrow$  robdd_build(1,3)
    return  $v_1$ 
  }
   $\lambda \leftarrow$  robdd_build(0,3)
  return  $v_2 = (b, v_1, v_0)$ 
}
 $\lambda \leftarrow$  robdd_build( $bcd'$ ,2) {
   $\phi \leftarrow \pi(2)$   $l^* = b^*$ 
   $\eta \leftarrow$  robdd_build( $cd'$ ,3) {
     $\phi \leftarrow \pi(3)$   $l^* = c^*$ 
     $\eta \leftarrow$  robdd_build( $d'$ ,4) {
       $\phi \leftarrow \pi(4)$   $l^* = d^*$ 
       $\eta \leftarrow$  robdd_build(0,5)
      return  $v_0$ 
    }
     $\lambda \leftarrow$  robdd_build(1,5)
    return  $v_1$ 
  }
  return  $v_3 = (d, v_0, v_1)$ 
}
 $\lambda \leftarrow$  robdd_build(0,4)
return  $v_4 = (c, v_3, v_0)$ 
}
 $\lambda \leftarrow$  robdd_build(0,3)
return  $v_5 = (b, v_4, v_0)$ 
}
return  $v_6 = (a, v_2, v_5)$ 
}

```

```

robdd_build( $G = ab + ac'd, 1$ ) {
   $\phi \leftarrow \pi(1)$  /* =  $a$  */
   $\eta \leftarrow \text{robdd\_build}(b + c'd, 2)$  {
     $\phi \leftarrow \pi(2)$  /* =  $b$  */
     $\eta \leftarrow \text{robdd\_build}(1, 3)$ 
    return  $v_1$ 
  }
   $\lambda \leftarrow \text{robdd\_build}(c'd, 3)$  {
     $\phi \leftarrow \pi(3)$  /* =  $c$  */
     $\eta \leftarrow \text{robdd\_build}(0, 4)$ 
    return  $v_0$ 
  }
   $\lambda \leftarrow \text{robdd\_build}(d, 4)$  {
     $\phi \leftarrow \pi(4)$  /* =  $d$  */
     $\eta \leftarrow \text{robdd\_build}(1, 5)$ 
    return  $v_1$ 
  }
   $\lambda \leftarrow \text{robdd\_build}(0, 5)$ 
  return  $v_0$ 
}
return  $v_7 = (d, v_1, v_0)$ 
}
return  $v_8 = (c, v_0, v_7)$ 
}
return  $v_9 = (b, v_1, v_8)$ 
}
 $\lambda \leftarrow \text{robdd\_build}(0, 2)$ 
return  $v_0$ 
return  $v_{10} = (a, v_9, v_0)$ 
}

```

Si noti che in questo esempio non si riescono a condividere sottografi del diagramma di decisione. Se s'introducessero i lati complementati, al posto dei due nodi  $v_3$  e  $v_7$  si potrebbe usare un nodo solo, a cui si punterebbe da  $v_4$  con un lato positivo e da  $v_8$  con un lato complementato (per indicare che da  $v_8$  si punta al complemento della funzione a cui punta  $v_4$ ). In realta' con l'introduzione dei lati complementati, tutta la procedura sarebbe modificata per introdurre in modo consistente e canonico le complementazioni.



## Addendum sull'operazione ITE

I casi terminali sono

$$\begin{aligned}ITE(F, 1, 0) &= F \\ITE(1, F, G) &= F \\ITE(0, F, G) &= G \\ITE(F, G, G) &= G \\ITE(F, 0, 1) &= \overline{G}\end{aligned}$$

Ci sono molte triple che danno il medesimo risultato, ad es.,  $ITE(\overline{x}_1 + x_2x_4, (x_1 + x_2)x_4, 0)$  e  $ITE(x_2x_4(x_1 + \overline{x}_3), 1, \overline{x}_1x_2x_3x_4)$  producono il medesimo risultato  $x_2x_4$ .

Sarebbe auspicabile, ma praticamente difficile, identificare tutte le triple che producono il medesimo risultato, perché potremmo associarle allo stesso elemento della “computed table”. Ci sono dei casi speciali in cui si possono identificare facilmente triple equivalenti, ad es.,

$$ITE(F, G, F) = ITE(F, G, 0) = ITE(G, F, G) = ITE(G, F, 0) = F.G$$

Per questi casi si trasforma una tripla in una forma convenzionale prima di cercarla nella “computed table”. In tal modo tutte le triple che sono associate alla stessa forma hanno il medesimo elemento nella tavola.

I seguenti casi permettono di stabilire equivalenze tra triple:

- (a) Due argomenti dell'ITE sono uguali, es.  $ITE(F, F, G)$
- (b) Due argomenti dell'ITE sono l'uno il complemento dell'altro, es.  $ITE(F, G, \overline{F})$
- (c) Almeno un argomento è costante, es.  $ITE(F, G, 0)$

Per arrivare a delle triple convenzionali, si applica una prima serie di trasformazioni che rimpiazza il massimo numero di argomenti con una costante:

$$\begin{aligned}ITE(F, F, G) &\Rightarrow ITE(F, 1, G) \\ITE(F, G, F) &\Rightarrow ITE(F, G, 0) \\ITE(F, G, \overline{F}) &\Rightarrow ITE(F, G, 1) \\ITE(F, \overline{F}, G) &\Rightarrow ITE(F, 0, G)\end{aligned}$$

Una seconda serie di trasformazioni usa le seguenti uguaglianze

$$\begin{aligned}
 ITE(F, 1, G) &= ITE(G, 1, F) \\
 ITE(F, G, 0) &= ITE(G, F, 0) \\
 ITE(F, G, 1) &= ITE(\overline{G}, \overline{F}, 1) \\
 ITE(F, 0, G) &= ITE(\overline{G}, 0, \overline{F}) \\
 ITE(F, G, \overline{G}) &= ITE(G, F, \overline{F})
 \end{aligned}$$

per scegliere la tripla il cui primo argomento ha la variabile più in alto nel suo grafo con indice minimo nell'ordinamento.

Un'altra serie di trasformazioni usa le seguenti uguaglianze

$$ITE(F, G, H) = ITE(\overline{F}, H, G) = \overline{ITE(F, \overline{G}, \overline{H})} = \overline{ITE(\overline{F}, \overline{H}, \overline{G})}$$

In questo caso si sceglie la tripla ai cui due primi argomenti si punta con lati non complementati. Per es., se  $F$  non è complementato e  $G$  è complementato, si sostituisce  $ITE(F, G, H)$  con  $ITE(F, \overline{G}, \overline{H})$  e se ne prende il complemento (da  $ITE(F, G, H) = \overline{ITE(F, \overline{G}, \overline{H})}$ ). Similmente, se  $F$  è complementato e  $G$  non è complementato, si sostituisce  $ITE(F, G, H)$  con  $ITE(\overline{F}, H, G)$  (da  $ITE(F, G, H) = ITE(\overline{F}, H, G)$ ).

Tra le conseguenze di queste trasformazioni c'è la possibilità di applicare la legge di De Morgan:  $F.G = \overline{(\overline{F} + \overline{G})}$ ; infatti

$$F.G = ITE(F, G, 0) = \overline{ITE(\overline{F}, 1, \overline{G})} = \overline{(\overline{F} + \overline{G})}$$

(si ha  $ITE(F, G, 0) = \overline{ITE(\overline{F}, 1, \overline{G})}$  da  $ITE(F, G, H) = \overline{ITE(\overline{F}, \overline{H}, \overline{G})}$ ).

40. Per ognuna delle seguenti espressioni, si stabilisca se sono algebriche, prime, irridondanti:

(a)  $abc + a'b + bcd$ ,

(b)  $abc + abd + a'b'c$ ,

(c)  $abc + bcd + bd$ .

41. Si divida  $F = ab + ac + ad' + bc + bd'$  per  $G = a + b$ .

42. Si divida l'espressione algebrica

$$F = abrs + abrt + abd + abe + abu + ghrs + ghrw + ghd + ghe + ghv + dp + eq + rstuw$$

per il divisore  $D = ab + gh$ . Si ottengano  $Q = F/D$  e  $R$ .

43. Data l'espressione algebrica  $F = abc + abd' + a'bd + abef$  si trovi il divisore primario corrispondente al cubo  $ab$ . Tale divisore primario e' un nucleo ?

44. Sia data l'espressione algebrica  $F = uwx y + uvx y + tx + tz + rsw + vwx y$ .
- (a) Si calcolino i nuclei di livello 0.
  - (b) Per ogni nucleo  $k$  di livello 0, si esprima  $F$  nella forma  $ck + r$ , dove  $c$  e' il co-nucleo e  $r$  e' il resto.

La sintesi architettonica di cui alle pagine seguenti non è inclusa nel programma dell'anno in corso.



45. Il grafo delle precedenze  $(V, E)$  ha come nodi le operazioni  $v_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$  ( $v_0$  e  $v_n$  operazioni nulle) e come lati  $(v_j, v_i)$  le relazioni di precedenza (cioe'  $(v_j, v_i) \in E$  se  $v_j$  deve precedere  $v_i$ ).

Inoltre siano  $d_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$  i tempi di esecuzione delle operazioni  $v_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$  ( $d_0 = d_n = 0$ ), e  $\mathcal{T} : V \rightarrow \{1, 2, \dots, n_{res}\}$  l'unico tipo di risorsa che realizza una data operazione.

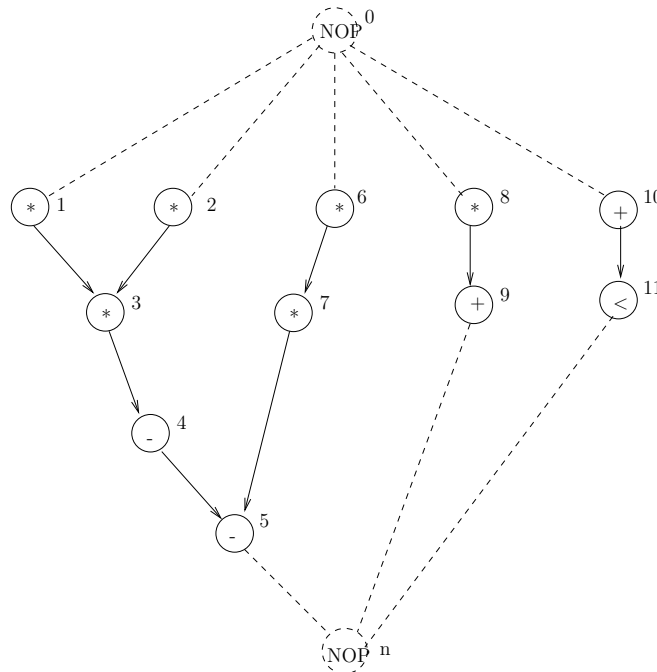


Figure 1: Grafo delle precedenze (da un algoritmo per integrare numericamente con Eulero in avanti l'equazione differenziale  $y'' + 3xy' + 3y = 0$ ).

Si consideri il grafo delle precedenze in Fig. 1. Negli esercizi seguenti, si assumano le seguenti ipotesi, quando non specificato diversamente. Siano  $d_i = 1$ ,  $i = 1, 2, \dots, 11$ ,  $d_0 = d_n = 0$ . L'assegnamento delle risorse sia  $\mathcal{T}(1) = 1$ ,  $\mathcal{T}(2) = 1$ ,  $\mathcal{T}(3) = 1$ ,  $\mathcal{T}(6) = 1$ ,  $\mathcal{T}(7) = 1$ ,  $\mathcal{T}(8) = 1$ ;  $\mathcal{T}(4) = 2$ ,  $\mathcal{T}(5) = 2$ ,  $\mathcal{T}(9) = 2$ ,  $\mathcal{T}(10) = 2$ ,  $\mathcal{T}(11) = 2$ .

- (a) (Schedulazione senza vincoli) Si applichi al grafo delle precedenze in Fig. 1 l'algoritmo di schedulazione ASAP e se ne mostrino i passi.
- (b) (Schedulazione con vincolo sulla latenza) Si applichi al grafo delle precedenze in Fig. 1 l'algoritmo di schedulazione ALAP con latenza  $\bar{\lambda} = 4$  e se ne mostrino i passi.

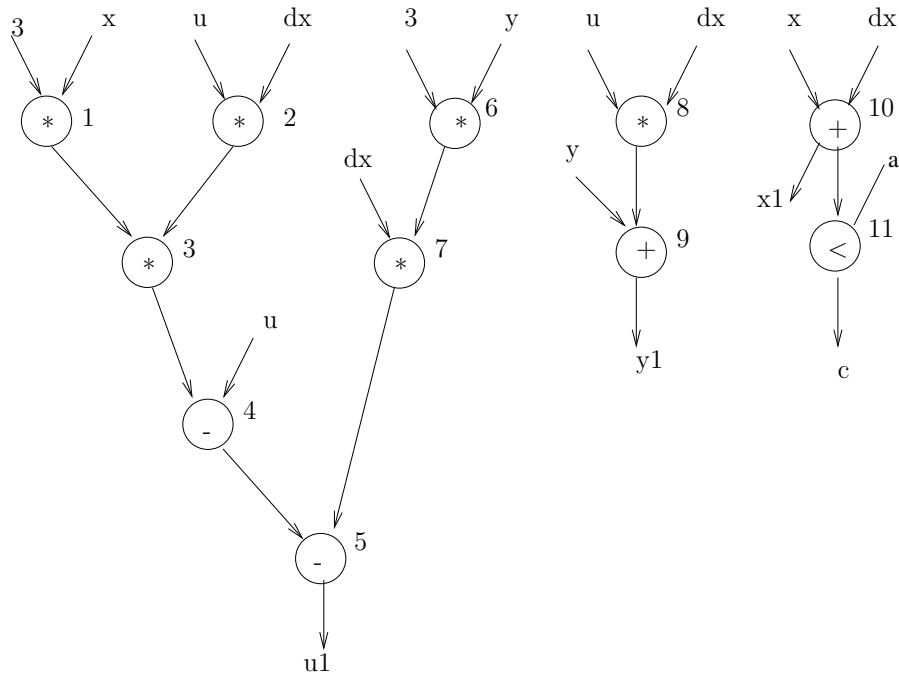


Figure 2: Grafo del flusso dei dati (da un algoritmo per integrare numericamente con Eulero in avanti l'equazione differenziale  $y'' + 3xy' + 3y = 0$ ).

(c) (Schedulazione euristica per latenza minima con l'algoritmo a lista)

- i. Si applichi l'algoritmo a lista al grafo delle precedenze in Fig. 1 con  $a_1 = 2$  moltiplicatori e  $a_2 = 2$  unita' aritmetico-logiche. La funzione di prioritá e' data dalla seguente etichettatura:  $v_1 \rightarrow 4$ ,  $v_2 \rightarrow 4$ ,  $v_3 \rightarrow 3$ ,  $v_4 \rightarrow 2$ ,  $v_5 \rightarrow 1$ ,  $v_6 \rightarrow 3$ ,  $v_7 \rightarrow 2$ ,  $v_8 \rightarrow 2$ ,  $v_9 \rightarrow 1$ ,  $v_{10} \rightarrow 2$ ,  $v_{11} \rightarrow 1$ , che indica la lunghezza del percorso piu' lungo dal nodo al pozzo.  
Inoltre i tempi di esecuzione delle operazioni siano  $d_1 = 2$  per il moltiplicatore e  $d_2 = 1$  per l'unita' aritmetico-logica.
- ii. Si ripeta l'esercizio precedente supponendo  $d_1 = 1$  per il moltiplicatore e  $d_2 = 1$  per l'unita' aritmetico-logica.
- iii. Si applichi l'algoritmo a lista al grafo delle precedenze in Fig. 1 con  $a_1 = 3$  moltiplicatori e  $a_2 = 1$  unita' aritmetico-logica. Inoltre i tempi di esecuzione delle operazioni siano  $d_1 = 2$  per il moltiplicatore e  $d_2 = 1$  per l'unita' aritmetico-logica.  
Si usi come funzione di prioritá ancora la lunghezza del percorso piu'

lungo dal nodo al pozzo.

iv. Si ripeta l'esercizio precedente assumendo una funzione di priorit  diversa che assegna l'inizio delle operazioni  $v_2, v_6, v_8$  al primo ciclo di calcolo.

(d) (Schedulazione euristica per risorse minime con l'algoritmo a lista)

Si applichi l'algoritmo a lista al grafo delle precedenze in Fig. 1 nell'ipotesi che tutte le operazioni richiedano un tempo unitario e che si richieda una latenza di 4 cicli.

(e) Qual e' la relazione tra l'algoritmo euristico a lista e l'algoritmo di Hu (per la schedulazione di multiprocessori) ? Nel rispondere si descriva l'algoritmo di Hu.

(f) (Schedulazione per latenza minima con vincoli sulle risorse)

Si consideri la formulazione classica con ILP della schedulazione con vincoli sulle risorse, rispetto alle variabili  $X = \{x_{il}, i = 0, 1, \dots, n; l = 1, 2, \dots, \bar{\lambda} + 1\}$ , con  $x_{il} = 1$  solo quando l'operazione  $v_i$  inizia al passo  $l$  della schedulazione, e  $\bar{\lambda}$  maggiorante sulla latenza:

Si noti che  $x_{il} = 0$  per  $l < t_i^S$  o  $l > t_i^L$  per ogni operazione  $v_i, i = 0, 1, \dots, n$ , dove  $t_i^S$  sono i minoranti calcolati dall'algoritmo ASAP ( $x_{il} = 1 \rightarrow l \geq t_i^S$ ) e  $t_i^L$  sono i maggioranti calcolati dall'algoritmo ALAP ( $x_{il} = 1 \rightarrow l \leq t_i^L$ ), da cui

$$\sum_l x_{il} = \sum_{l=t_i^S}^{t_i^L} x_{il}, \quad i = 0, 1, \dots, n$$

(il tempo d'inizio d'ogni operazione e' unico, perciol' l'inizio  $t_i$  di ogni operazione  $v_i$  puol' essere scritto come  $t_i = \sum_l l \cdot x_{il}, t_i^S \leq t_i \leq t_i^L$ ).

I vincoli sono:

$$(*) \sum_l x_{il} = 1, \quad i = 0, 1, \dots, n$$

(il tempo d'inizio d'ogni operazione e' unico)

$$(**) \sum_l l \cdot x_{il} \geq \sum_l l \cdot x_{jl} + d_j, \quad i, j = 0, 1, \dots, n, (v_j, v_i) \in E$$

(le relazioni di precedenza devono essere soddisfatte)

$$(***) \sum_{i: \mathcal{T}(v_i)=k} \sum_{m=l-d_i+1}^l x_{im} \leq a_k, \quad k = 1, 2, \dots, n_{res}, \quad l = 1, 2, \dots, \bar{\lambda} + 1$$

(i vincoli sulle risorse devono essere soddisfatti ad ogni passo della schedulazione)

Ogni insieme di tempi iniziali che soddisfa i vincoli precedenti ci da' una soluzione ammissibile.

Si consideri la schedulazione con vincoli sulle risorse del grafo in Fig. 1. Si assuma che ci siano due tipi di risorse: moltiplicatore e unita' aritmetico-logica (che esegue somme/sottrazioni e confronti). Entrambe le risorse eseguono in un ciclo. Si assuma anche che si possano usare al piu' due moltiplicatori e due unita' aritmetico-logiche:  $a_1 = 2, a_2 = 2$ .

- i. Usando l'algorithmo euristico di schedulazione a lista ("list scheduling") si trovi un maggiorante sulla latenza.
- ii. Con gli algoritmi ASAP and ALAP si trovino dei vincoli sui tempi d'inizio,  $t_i^S$  and  $t_i^L$ .
- iii. Si scrivano in dettaglio tutte le equazioni precedenti per l'unicita' dei tempi di partenza, le relazioni di precedenza e le quantita' di risorse disponibili.
- iv. Si risolvano i vincoli precedenti (\*), (\*\*), (\*\*\*) per ottenere una soluzione ammissibile.
- v. Si risolvano i vincoli precedenti (\*), (\*\*), (\*\*\*) con la funzione di minimo

$$\min \mathbf{c}^T \mathbf{t}$$

e  $\mathbf{c} = [0, 0, \dots, 1]^T$  equivalente a

$$\min t_n = \sum_l l.x_{nl}$$

che corrisponde a minimizzare la latenza della schedulazione (da  $\bar{\lambda} = t_n - t_0$  si ha che una soluzione ottima implica  $t_0 = 1$ ).

- vi. Si risolvano i vincoli precedenti (\*), (\*\*), (\*\*\*) con la funzione obiettivo

$$\min \mathbf{c}^T \mathbf{t}$$

e  $\mathbf{c} = [1, 1, \dots, 1]^T$  equivalente a

$$\min \sum_i t_i = \sum_i \sum_l l.x_{il}$$

che corrisponde a minimizzare il tempo iniziale per tutte le operazioni.

- (g) (Schedulazione per risorse minime con vincoli sulla latenza)

L'obiettivo dell'ottimizzazione e' una somma pesata delle risorse usate rappresentata dal vettore  $\mathbf{a}$ , esprimibile come

$$\min \mathbf{c}^T \mathbf{a}$$

dove  $\mathbf{c}$  e' il vettore dei costi delle singole risorse. Nelle equazioni (\*\*\*) gli  $a_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n_{res}$  sono adesso incognite ausiliarie.

C'e' inoltre un vincolo sulla latenza

$$t_n = \sum_l l \cdot x_{nl} \leq \bar{\lambda} + 1$$

Per i dati del problema precedente, assumendo inoltre  $\mathbf{c} = [5, 1]^T$  (il moltiplicatore costa 5 unita' di area e l'unita' aritmetico-logica ne costa una) e un maggiorante sulla latenza di  $\bar{\lambda} = 4$ , si riscrivano i vincoli del tipo (\*\*\*) (quelli dei tipi (\*) e (\*\*)) sono uguali al caso precedente) e si minimizzi la funzione di costo

$$\mathbf{c}^T \mathbf{a} = 5 \cdot a_1 + 1 \cdot a_2$$

46. Il problema dell'associazione ("binding") e' quello di associare risorse a operazioni. Tale problema si puo' formulare con un modello di programmazione lineare per interi, che estende quello visto per la schedulazione per latenza minima con vincoli sulle risorse.

Per semplicita' si assuma che tutte le operazioni e risorse siano dello stesso tipo. In questo modo si gestiscono i problemi con piu' tipi di operazioni come problemi indipendenti uno per ogni tipo di risorsa (grazie al fatto che i tipi sono disgiunti).

S'introduce un insieme di variabili di decisione binarie con due indici,  $B = \{b_{ir}; i = 1, 2, \dots, n_{op}; r = 1, 2, \dots, a\}$ , e un insieme di costanti di decisione binarie con due indici,  $X = \{x_{il}; i = 1, 2, \dots, n_{op}; l = 1, 2, \dots, \lambda + 1\}$ , dove  $a \leq n_{op}$  e' un maggiorante sul numero di risorse da usarsi. La variabile binaria  $b_{ir}$  vale 1 solo quando l'operazione  $v_i$  e' associata alla risorsa  $r$ , cioe'  $\beta(v_i) = (1, r)$ , dove il primo argomento di  $\beta$  e' il tipo di risorsa. La costante binaria  $x_{il}$  vale 1 solo quando l'operazione  $v_i$  inizia al passo  $l$  della schedulazione, cioe'  $l = t_i$ , come definito nel modello ILP per la schedulazione con vincoli sulle risorse. Questi valori sono costanti conosciute, poiche' si assume di partire da grafi schedulati.

La ricerca di un'associazione compatibile con una data schedulazione (quest'ultima rappresentata da  $X$ ) e un maggiorante sulla risorsa  $a$  e' equivalente a ricercare dei valori  $B$  che soddisfano i seguenti vincoli:

$$\sum_{r=1}^a b_{ir} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n_{op}$$

$$\sum_{i=1}^{n_{op}} \sum_{m=l-d_i+1}^l x_{im} \leq 1, \quad l = 1, 2, \dots, \lambda + 1, \quad r = 1, 2, \dots, a$$

$$b_{ir} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, n_{op}, \quad r = 1, 2, \dots, a$$

Il primo gruppo di vincoli assicura che ogni operazione  $v_i$  sia assegnata ad una e una sola risorsa. Il secondo gruppo di vincoli impone che al piu' un'operazione sia in esecuzione, tra quelle assegnate alla risorsa  $r$ , in ogni istante di tempo. Poiche' e' sufficiente imporre che le variabili in  $B$  siano interi non-negativi per soddisfare l'ultimo gruppo di vincoli (che le variabili in  $B$  siano 0 o 1, il problema puo' risolversi come programmazione lineare per interi (invece che programmazione lineare per 0 - 1). Il modello puo' essere esteso facilmente a tipi multipli di operazioni.

Sia data la seguente schedulazione del grafo delle precedenze in Fig. 1:

$$x_{1,1} = x_{2,1} = x_{3,2} = x_{4,3} = x_{5,4} = x_{6,2} = x_{7,3} = x_{8,3} = x_{9,4} = x_{10,1} = x_{11,2} = 1.$$

Ci sono due tipi di risorse (moltiplicatore, etichettato con 1, e unita' aritmetico-logica, etichettata con 2). Si supponga che ciascuna risorsa richieda un tempo di esecuzione di un'unita'. Un'associazione ammissibile delle operazioni alle risorse deve soddisfare i seguenti vincoli.

Per i moltiplicatori:

$$\sum_{r=1}^{a_1} b_{ir} = 1, \forall i : \mathcal{T}(v_i) = 1$$

$$\sum_{i:\mathcal{T}(v_i)=1} b_{ir} x_{il} \leq 1, l = 1, 2, \dots, \lambda + 1, r = 1, 2, \dots, a_1$$

Per gli addizionatori:

$$\sum_{r=1}^{a_2} b_{ir} = 1, \forall i : \mathcal{T}(v_i) = 2$$

$$\sum_{i:\mathcal{T}(v_i)=2} b_{ir} x_{il} \leq 1, l = 1, 2, \dots, \lambda + 1, r = 1, 2, \dots, a_2$$

- (a) Si trovi, se esiste. una realizzazione con  $a_1 = 1$  moltiplicatore, indicando i valori delle incognite in  $B$ .
- (b) Si trovi, se esiste. una realizzazione con  $a_1 = 2$  moltiplicatori, indicando i valori delle incognite in  $B$ .
- (c) Si trovi, se esiste. una realizzazione con  $a_2 = 1$  unita' aritmetico-logiche, indicando i valori delle incognite in  $B$ .
- (d) Si trovi, se esiste. una realizzazione con  $a_2 = 2$  unita' aritmetico-logiche, indicando i valori delle incognite in  $B$ .
- (e) Si mostri il grafo delle precedenze con le associazioni di operazioni a risorse per il caso  $a_1 = 2, a_2 = 2$ .

47. Il grafo delle precedenze  $(V, E)$  ha come nodi le operazioni  $v_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$  ( $v_0$  e  $v_n$  operazioni nulle) e come lati  $(v_j, v_i)$  le relazioni di precedenza (cioe'  $(v_j, v_i) \in E$  se  $v_j$  deve precedere  $v_i$ ).

Inoltre siano  $d_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$  i tempi di esecuzione delle operazioni  $v_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$  ( $d_0 = d_n = 0$ ), e  $\mathcal{T} : V \rightarrow \{1, 2, \dots, n_{res}\}$  l'unico tipo di risorsa che realizza una data operazione.

Si consideri il grafo delle precedenze in Fig. 3. Siano  $d_i = 1$ ,  $i = 1, 2, \dots, 11$ ,  $d_0 = d_n = 0$ . L'assegnamento delle risorse sia  $\mathcal{T}(1) = 1$ ,  $\mathcal{T}(2) = 1$ ,  $\mathcal{T}(3) = 1$ ,  $\mathcal{T}(6) = 1$ ,  $\mathcal{T}(7) = 1$ ,  $\mathcal{T}(8) = 1$ ;  $\mathcal{T}(4) = 2$ ,  $\mathcal{T}(5) = 2$ ,  $\mathcal{T}(9) = 2$ ,  $\mathcal{T}(10) = 2$ ,  $\mathcal{T}(11) = 2$ .

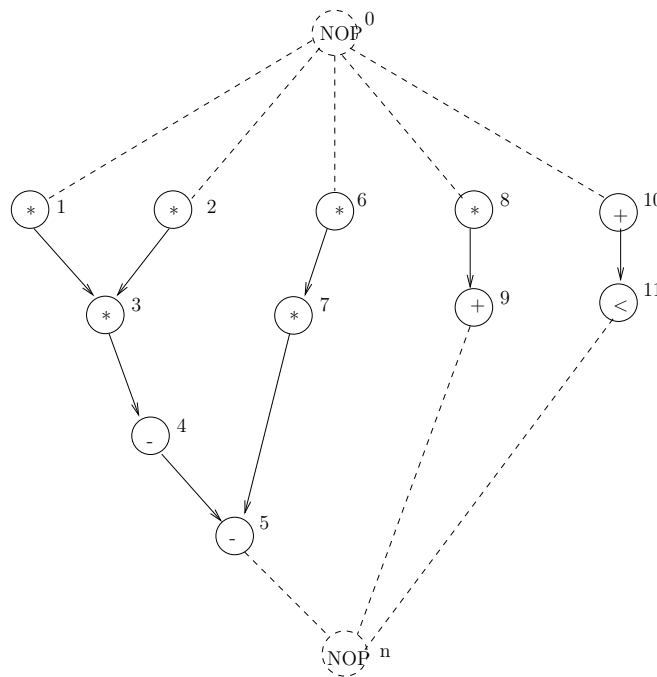


Figure 3: Grafo delle precedenze (da un algoritmo per integrare numericamente con Eulero in avanti l'equazione differenziale  $y'' + 3xy' + 3y = 0$ ).

(a) (Schedulazione senza vincoli) Si applichi al grafo delle precedenze in Fig. 1 l'algoritmo di schedulazione ASAP e se ne mostrino i passi per ottenere il vettore dei risultati  $t^S$ .

Traccia di soluzione.

Definiamo  $t^S$  il vettore dei tempi iniziali calcolati dall'algoritmo ASAP,



cioe'  $\mathbf{t}^S = \{t_i^S : i = 0, 1, \dots, n\}$ . L' algoritmo ASAP produce i tempi iniziali minimi.

L' algoritmo ASAP inizia con  $t_0^S = 1$ . Allora i vertici i cui predessori sono stati assegnati sono:  $\{v_1, v_2, v_6, v_8, v_{10}\}$ . Percio' il loro tempo iniziale e' posto a  $t_0^S + d_0 = 1 + 0 = 1$  e cosi' via. Cosi' si attiene:

$$t_0^S = 1, t_1^S = 1, t_2^S = 1, t_3^S = 2, t_4^S = 3, t_5^S = 4, t_6^S = 1, t_7^S = 2, t_8^S = 1, t_9^S = 2, t_{10}^S = 1, t_{11}^S = 2, t_n^S = 5.$$

Poiche'  $t_n^S = 5$ , la latenza e'  $\lambda = 5 - 1 = 4$ .

- (b) (Schedulazione con vincolo sulla latenza) Si applichi al grafo delle prece-  
denze in Fig. 3 l' algoritmo di schedulazione ALAP con latenza  $\bar{\lambda} = 4$  e  
se ne mostrino i passi per ottenere il vettore dei risultati  $\mathbf{t}^L$ .

Traccia di soluzione.

Definiamo  $\mathbf{t}^L$  il vettore dei tempi iniziali calcolati dall' algoritmo ASAP,  
cioe'  $\mathbf{t}^L = \{t_i^L : i = 0, 1, \dots, n\}$ . L' algoritmo ALAP produce i tempi  
iniziali massimi.

L' algoritmo ALAP con  $\bar{\lambda} = 4$  inizia con  $t_n^L = 5$ . Allora i vertici i cui  
successori sono stati assegnati sono  $\{v_5, v_9, v_{11}\}$ . Percio' il loro tempo  
iniziale e' posto a  $t_n^L - 1 = 5 - 1 = 4$  e cosi' via. Cosi' si attiene:

$$t_0^L = 1, t_1^L = 1, t_2^L = 1, t_3^L = 2, t_4^L = 3, t_5^L = 4, t_6^L = 2, t_7^L = 3, t_8^L = 3, t_9^L = 4, t_{10}^L = 3, t_{11}^L = 4, t_n^L = 5.$$

- (c) Quante risorse di tipo 1 e quante di tipo 2 sono necessarie per ASAP ?  
Quante per ALAP ?

Traccia di soluzione.

ASAP usa 4 risorse di tipo 1 (moltiplicatori) e 2 risorse di tipo 2 (unita'  
aritmetico-logiche).

ALAP usa 2 risorse di tipo 1 (moltiplicatori) e 3 risorse di tipo 2 (unita'  
aritmetico-logiche).

Qual e' la mobilita' dei nodi ?

Traccia di soluzione.

La mobilita' e' definita come  $\mu = t_i^L - t_i^S, i = 0, 1, \dots, n$ . Si ottiene:  
 $t_0^L - t_0^S = 0, t_1^L - t_1^S = 0, t_2^L - t_2^S = 0, t_3^L - t_3^S = 0, t_4^L - t_4^S = 0,$   
 $t_5^L - t_5^S = 0, t_6^L - t_6^S = 1, t_7^L - t_7^S = 1, t_8^L - t_8^S = 2, t_9^L - t_9^S = 2,$   
 $t_{10}^L - t_{10}^S = 2, t_{11}^L - t_{11}^S = 2, t_n^L - t_n^S = 0.$

Esistono schedulazioni che usano meno risorse di quante sono richieste  
da ASAP e ALAP a parita' di latenza ?

Traccia di soluzione.

Si, a parità della latenza  $\lambda = 4$  si può scendere a 2 risorse di tipo 1 (moltiplicatori) e 2 risorse di tipo 2 (unità aritmetico-logiche):

$$t_0 = 1, t_1 = 1, t_2 = 1, t_3 = 2, t_4 = 3, t_5 = 4, t_6 = 2, t_7 = 3, t_8 = 3, \\ t_9 = 4, t_{10} = 1, t_{11} = 2, t_n = 5.$$

48. Il grafo delle precedenze  $(V, E)$  ha come nodi le operazioni  $v_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$  ( $v_0$  e  $v_n$  operazioni nulle) e come lati  $(v_j, v_i)$  le relazioni di precedenza (cioe'  $(v_j, v_i) \in E$  se  $v_j$  deve precedere  $v_i$ ).

Inoltre siano  $d_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$  i tempi di esecuzione delle operazioni  $v_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$  ( $d_0 = d_n = 0$ ), e  $\mathcal{T} : V \rightarrow \{1, 2, \dots, n_{res}\}$  l'unico tipo di risorsa che realizza una data operazione.

Si consideri il grafo delle precedenze in Fig. 4. Siano  $d_i = 1$ ,  $i = 1, 2, \dots, 11$ ,  $d_0 = d_n = 0$ . L'assegnamento delle risorse sia  $\mathcal{T}(1) = 1$ ,  $\mathcal{T}(2) = 1$ ,  $\mathcal{T}(3) = 1$ ,  $\mathcal{T}(6) = 1$ ,  $\mathcal{T}(7) = 1$ ,  $\mathcal{T}(8) = 1$ ;  $\mathcal{T}(4) = 2$ ,  $\mathcal{T}(5) = 2$ ,  $\mathcal{T}(9) = 2$ ,  $\mathcal{T}(10) = 2$ ,  $\mathcal{T}(11) = 2$ .

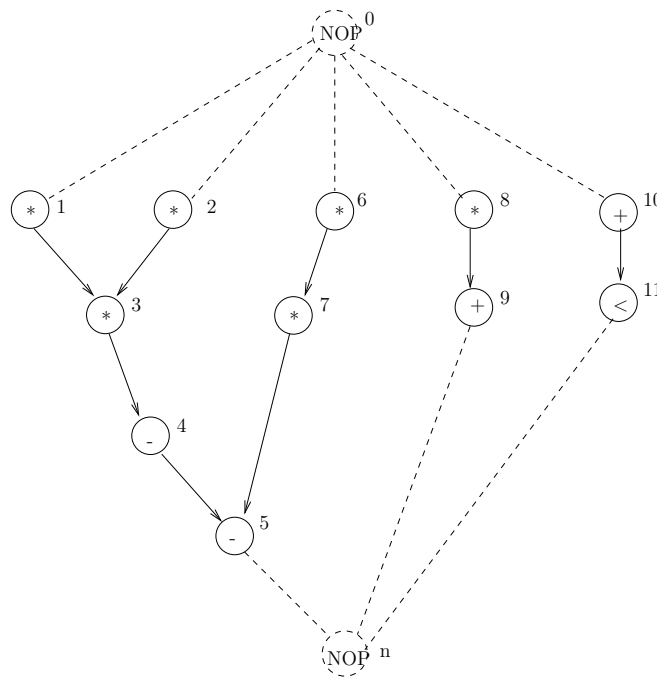


Figure 4: Grafo delle precedenze (da un algoritmo per integrare numericamente con Eulero in avanti l'equazione differenziale  $y'' + 3xy' + 3y = 0$ ).

- (a) (Schedulazione euristica per latenza minima con l'algoritmo a lista)  
 Si descriva l'algoritmo euristico a lista ("list scheduling") per schedulazione a latenza minima.

- (b) Si applichi l'algoritmo a lista al grafo delle precedenze in Fig. 4 con  $a_1 = 2$  moltiplicatori e  $a_2 = 2$  unita' aritmetico-logiche. La funzione di priorit  sia data dalla seguente etichettatura:  $v_1 \rightarrow 4, v_2 \rightarrow 4, v_3 \rightarrow 3, v_4 \rightarrow 2, v_5 \rightarrow 1, v_6 \rightarrow 3, v_7 \rightarrow 2, v_8 \rightarrow 2, v_9 \rightarrow 1, v_{10} \rightarrow 2, v_{11} \rightarrow 1$ , che indica la lunghezza del percorso piu' lungo dal nodo al pozzo. Inoltre i tempi di esecuzione delle operazioni siano  $d_1 = 1$  per il moltiplicatore e  $d_2 = 1$  per l'unita' aritmetico-logica.
- Si descrivano con precisione i passi dell'algoritmo.

(c) Qual e' la relazione tra l'algorithmo euristico a lista e l'algorithmo di Hu (per la schedulazione di multiprocessori) ? Nel rispondere si descriva l'algorithmo di Hu.