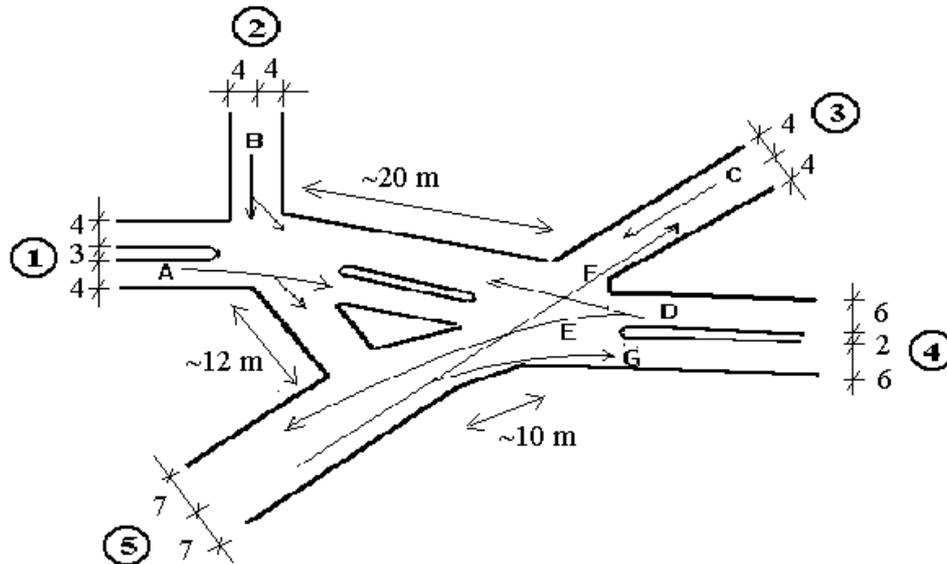


## EXERCÍCIO: ALOCAÇÃO DOS TEMPOS DE VERDE



Dada a interseção acima, onde foram realizadas as seguintes medidas:

movimentos principais	volume observado	fluxo de saturação
A	640	3200
B	160	1600
C	300	3000
D	900	3000
E	150	1500
F	225	1500
G	640	1600

- propor um plano de operação em 4 estágios para a interseção;
- determinar os tempos de entreverde ( $V=50$  km/h em 1-4 e 40 km/h nas demais);
- dimensionar o semáforo com o plano de operação obtido;
- estimar os atrasos experimentados pelos movimentos principais.

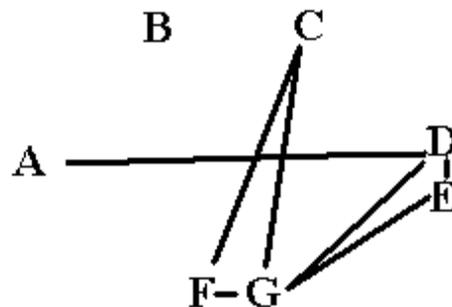
**SOLUÇÃO:**

(a) analisando os movimentos principais, tem-se a tabela de conflitos seguinte:

	A	B	C	D	E	F	G
A	-	x	x	0	x	x	c
B	x	-	x	x	x	x	c
C	x	x	-	x	c	0	0
D	0	x	x	-	0	x	0
E	x	x	c	0	-	x	0
F	x	x	0	x	x	-	0
G	c	c	0	0	0	0	-

( X=cruzamento, c=convergência, 0=sem conflito)

O diagrama de movimentos concordantes correspondente seria:

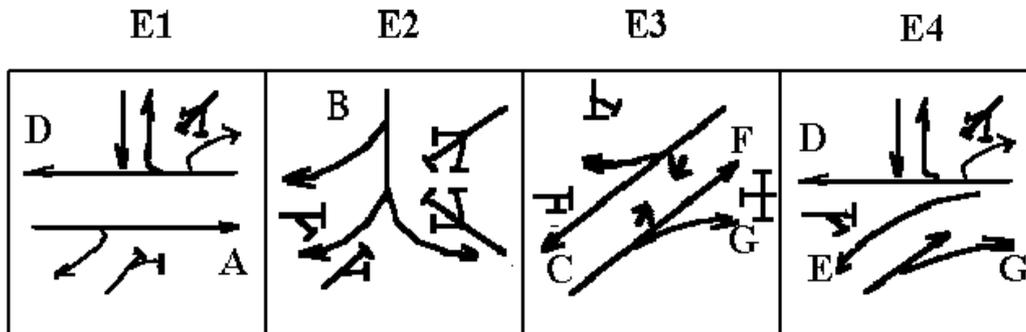


Pode-se verificar que as combinações possíveis de movimentos simultâneos são:

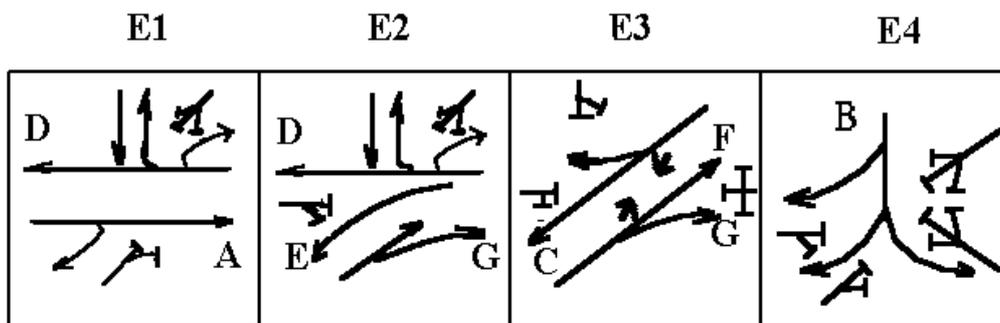
A - D  
 B  
 C - F - G  
 D - E - G

onde D e G podem operar em 2 estágios.

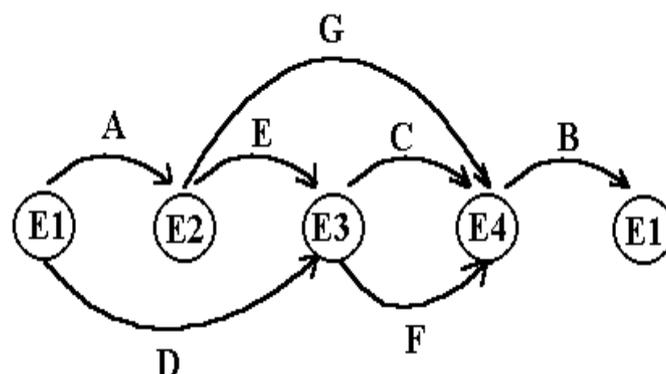
Na ausência de restrições que prejudiquem os movimentos por verdes longos, a seqüência selecionada deve permitir a continuidade dos movimentos D e G.



Neste caso, um plano operação mais adequado (com uma seqüência diferente da original, com a conversão à esquerda E após os fluxos diretos) seria:



e o diagrama grupo-estágio resultante é:



A seleção da seqüência dos estágios no plano semaforico deve observar aspectos de segurança de tráfego (muitas vezes específicos de cada local) e os requisitos de tempos de entreverdes (que também afetam a eficiência da operação do semáforo).

(b) admitindo a sequência de estágios anterior, os tempos de entreverdes são determinados analisando as mudanças de estágio sucessivas:

As velocidades foram assumidas iguais a 50 km/h (13,89 m/s) para A, D e E (movimentos da via 1-4) e 40 km/h (11,11 m/s) para os demais. Foi adotado um comprimento médio dos veículos de 8 metros (pode-se também adotar uma margem na determinação do vermelho de segurança, em geral por volta de 1 seg).

Com a sequência original:

A-D	em E1
B	em E2
C-F-G	em E3
D-E-G	em E4

o requisito de continuidade dos movimentos D (em E4 e E1) e G (em E3 e E4) é satisfeito e os tempos de entreverdes seriam:

E1/E2: saem de operação o movimento A e D e inicia o movimento B.

amarelo para o movimento A: 4 seg. (V=50 km/h)

vermelho de segurança: conflito crítico DxB ( $z_D \cong 36\text{m}$  e  $z_B \cong 2\text{m}$ )

$$I_v = \frac{36 + 8}{13,89} - \frac{2}{11,11} = 2,99 \text{ seg}$$

portanto, E1/E2:  $I_a = 4 \text{ seg}$ ,  $I_v = 3 \text{ seg}$ ;

E2/E3: sai de operação o movimento B e iniciam os movimentos C, F e G.

amarelo para o movimento B: 3 seg. (V=40 km/h)

vermelho de segurança: conflito crítico BxG ( $z_D \cong 38\text{m}$  e  $z_G \cong 2\text{m}$ )

$$I_v = \frac{38 + 8}{11,11} - \frac{2}{11,11} = 3,96 \text{ seg}$$

portanto, E2/E3:  $I_a = 3 \text{ seg}$ ,  $I_v = 4 \text{ seg}$ ;

E3/E4: saem de operação os movimentos C e F e iniciam os movimentos D e E.

amarelo para os movimentos C e F: 3 seg. (V=40 km/h)

vermelho de segurança: conflito crítico FxD ( $z_F \cong 14\text{m}$  e  $z_D \cong 2\text{m}$ )

$$I_v = \frac{14 + 8}{11,11} - \frac{2}{13,89} = 1,80 \text{ seg}$$

portanto, E3/E4:  $I_a = 3 \text{ seg}$ ,  $I_v = 2 \text{ seg}$ ;

E4/E1: saem de operação os movimentos E e G e inicia o movimento A.

amarelo para o movimento E: 4 seg. (V=50 km/h)

vermelho de segurança: conflito crítico ExA ( $z_E \cong 8\text{m}$  e  $z_A \cong 2\text{m}$ )

$$I_v = \frac{8 + 8}{13,89} - \frac{2}{13,89} = 1,01 \text{ seg}$$

portanto, E4/E1:  $I_a = 4 \text{ seg}$ ,  $I_v = 1 \text{ seg}$ .

Com o plano alternativo preferido, os tempos de entreverdes seriam:

E1/E2: sai de operação o movimento A e iniciam os movimentos E e G.  
 amarelo para o movimento A: 4 seg. (V=50 km/h)  
 vermelho de segurança: conflito crítico AxG ( $z_A \cong 30m$  e  $z_G \cong 2m$ )

$$I_v = \frac{30+8}{13,89} - \frac{2}{11,11} = 2,56 \text{ seg}$$

portanto, E1/E2:  $I_a = 4 \text{ seg}$ ,  $I_v = 3 \text{ seg}$  ;

E2/E3: saem de operação os movimentos D e E e iniciam os movimentos C e F.  
 amarelo para os movimentos D e E: 4 seg. (V=50 km/h)  
 vermelho de segurança: conflito crítico DxC ( $z_D \cong 10m$  e  $z_C \cong 2m$ )

$$I_v = \frac{10+8}{13,89} - \frac{2}{11,11} = 1,12 \text{ seg}$$

portanto, E2/E3:  $I_a = 4 \text{ seg}$ ,  $I_v = 2 \text{ seg}$  ;

E3/E4: saem de operação os movimentos C, F e G e inicia o movimento B.  
 amarelo para os movimentos C, F e G: 3 seg. (V=40 km/h)  
 vermelho de segurança: conflito crítico CdireitxB ( $z_C \cong 26m$  e  $z_B \cong 2m$ )

$$I_v = \frac{26+8}{11,11} - \frac{2}{11,11} = 2,88 \text{ seg}$$

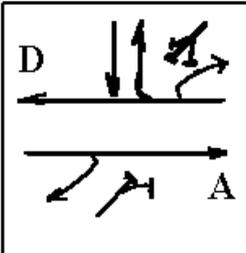
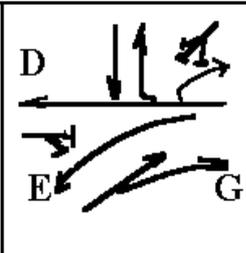
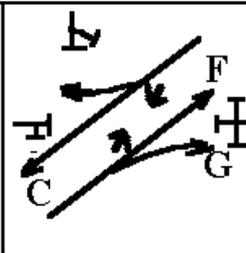
portanto, E3/E4:  $I_a = 3 \text{ seg}$ ,  $I_v = 4 \text{ seg}$  ;

E4/E1: sai de operação o movimento B e iniciam os movimentos A e D.  
 amarelo para o movimento B: 3 seg. (V=40 km/h)  
 vermelho de segurança: conflito crítico BxA ( $z_B \cong 12m$  e  $z_A \cong 2m$ )

$$I_v = \frac{12+8}{11,11} - \frac{2}{13,89} = 1,68 \text{ seg}$$

portanto, E4/E1:  $I_a = 3 \text{ seg}$ ,  $I_v = 2 \text{ seg}$  .

Portanto, o plano de operação adotado, com os tempos de entreverdes, será:

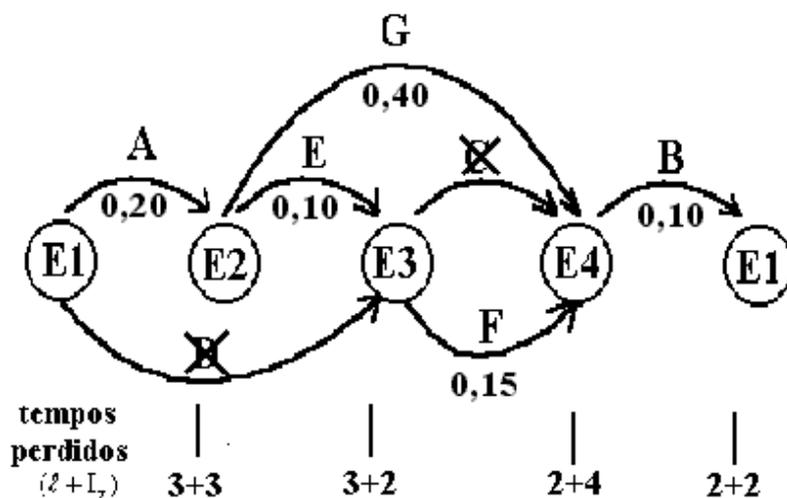
	E1	E2	E3	E4
				
$I_a$	4 seg.	4 seg.	3 seg.	3 seg.
$I_v$	3 seg.	2 seg.	4 seg.	2 seg.

Note que os totais de amarelo e vermelho de segurança são similares para ambas as seqüências de estágio e que a preferência inicial dá-se por razões de segurança.

(c) para o dimensionamento, na ausência de dados de campo, é usual admitir  $\ell = l_a - 1$  ou  $\ell = l_a$  e, neste exercício, adotaremos  $\ell = l_a - 1$  seg.

aprox	mov.	est.				F i	Y i
		E1	E2	E3	E4		
1	— A	sim	—	—	—	F1	0.200 A
2	— B	—	—	—	sim	F2	0.100 B
3	— C	—	—	sim	—	F3	0.100 C
4	∧ D	sim	sim	—	—	F4	0.300 D
	∨ E	—	sim	—	—	F5	0.100 E
5	∧ F	—	—	sim	—		0.150 F
	∨ G	—	sim	sim	—	F6	0.400 G

O diagrama de grupos por estágios seria o seguinte:



Portanto, podemos analisar apenas as sequências A-G-B e A-E-F-G, porque os demais são sempre menos críticos. Note que A-E é pior que D (já que  $y_{AE} = y_D = 0,30$  e  $I_{\ell}^{AE} > I_{\ell}^D$ ) e que F é pior que C (já que  $I_{\ell}^F = I_{\ell}^C$ , mas  $y_F > y_D$ ).

portanto, precisamos examinar os casos:

$$1^{\circ} \text{ caso) A, G, B} \Rightarrow t_c = \frac{1,5 \cdot 16 + 5}{1 - 0,700} \cong 97 \text{seg}$$

$$2^{\circ} \text{ caso) A, E, F, B} \Rightarrow t_c = \frac{1,5 \cdot 21 + 5}{1 - 0,550} \cong 81 \text{seg}$$

assim, o caso mais crítico é o 1º caso, adotando-se  $t_c = 97 \text{seg}$ .

A alocação do tempo de verde efetivo é a seguinte:

$$g_{ef} = (97 - 16) \cong 81 \text{seg}$$

$$g_{ef}^1 = \frac{0,20}{0,70} \cdot 81 = 23 \text{seg}$$

$$g_{ef}^{23} = \frac{0,40}{0,70} \cdot 81 = 46 \text{seg}$$

$$g_{ef}^4 = \frac{0,10}{0,70} \cdot 81 = 12 \text{seg}$$

para os estágios E2/E3 com operação de G superposta, tem-se:

$$g_{ef}^{2,3} = g_{ef}^{23} - I_{\ell}^{23} = 46 - 5 = 41 \text{seg}$$

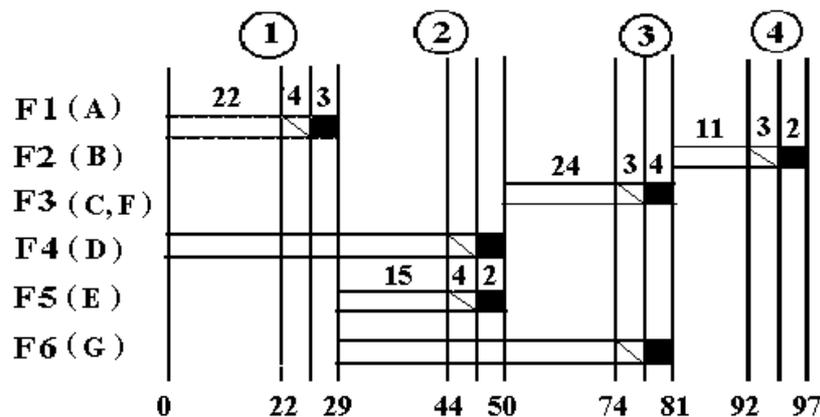
$$Y^{23} = y_E + y_F = 0,25$$

$$g_{ef}^2 = \frac{0,10}{0,25} \cdot 41 = 16 \text{seg}$$

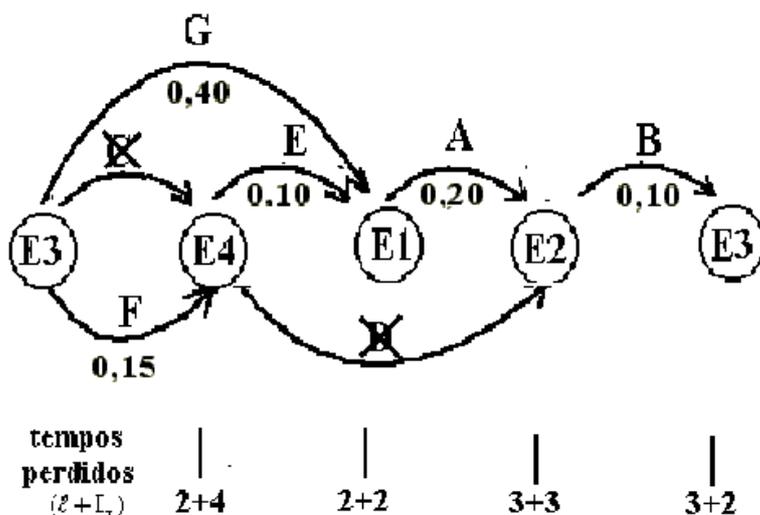
$$g_{ef}^3 = \frac{0,15}{0,25} \cdot 41 = 25 \text{seg}$$

com  $g = g_{ef} + \ell_i - I_a = g_{ef} - 1$  (tempo de verde de foco 1 seg menor que o efetivo).

Portanto, o diagrama de alocação de tempos proposto é o seguinte:



Note que com a sequência original, começando em E3, tem-se a situação seguinte:



Portanto, o tempo perdido da sequência crítica (no caso, G-A-B) é de 15 seg. (1 seg. menor que no plano semafórico adotado). Como o ganho é pequeno e a interseção não está saturada, será preferido o plano selecionado pelo critério de segurança.

(d) estimativa de atrasos para o dimensionamento calculado ( $t_c = 97$  seg):

Atualmente, o atraso seria estimado utilizando uma fórmula baseada na aproximação dinâmica por transformação de coordenadas, do tipo:

$$d = d_r + d_s, \text{ onde } d_r = PF \cdot d_f \text{ e } d_s = \frac{T_p}{4} \left[ \sqrt{A^2 + B} + A \right],$$

sendo  $PF \cong \frac{1 - P_g}{1 - u}$  um fator de progressão semafórica ( $P_g$  é a proporção de veículos que chegam no verde),  $A = (X - 1)$  e  $B \cong \frac{8 \cdot \kappa \cdot X}{C \cdot T_p}$ ,  $T_p$  é a duração do período de pico.

O atraso pode ser estimado com a fórmula de Webster simplificada (estacionária)

$$d \cong 0,9 (d_f + d_0) \text{ onde } d_f = \frac{(1-u)^2}{2 \cdot (1-y)} \cdot t_c \text{ e } d_0 = \frac{X^2}{2 \cdot (1-X) \cdot q}.$$

quando não há movimentos saturados ( $X < 1$ ).

	<b>Q</b>	<b>S</b>	<b>y</b>	<b>g<sub>ef</sub></b>	<b>u</b>	<b>C</b>	<b>X</b>	<b>d</b>	<b>d'</b>
<b>A</b>	640	3200	0,20	23	0,24	758,8	0,84	55,2	43,3
<b>B</b>	160	1600	0,10	12	0,12	197,9	0,81	90,3	71,8
<b>C</b>	300	3000	0,10	25	0,26	773,2	0,39	32,6	28,0
<b>D</b>	900	3000	0,30	45	0,46	1391,8	0,65	24,5	20,1
<b>E</b>	150	1500	0,10	16	0,16	247,4	0,61	57,7	43,9
<b>F</b>	225	1500	0,15	25	0,26	386,6	0,58	43,6	34,1
<b>G</b>	640	1600	0,40	46	0,47	758,8	0,84	42,3	31,6

Note que a razão fluxo-capacidade é maior para os movimentos críticos A, B, G (são iguais, exceto pelo efeito dos arredondamentos).

Também poderiam ser calculadas outras medidas de desempenho, como a fila máxima no final do vermelho e a taxa de paradas de veículos:

$$N_{\text{máx}} = q \cdot (r + d_s), \quad L_B = \frac{q(r + d_r)}{1 - y} \cdot l_v \quad \text{e} \quad p = \frac{1 - u}{1 - y} + \frac{d_s}{t_c}$$

onde  $L_B$  é a extensão máxima atingida pela fila.

Seria também necessário corrigir os resultados de fila teórica para fila real para ter as estimativas finais para filas e atrasos.