

Universidade Federal de Santa Catarina

Experiência 7

SÍNTESE DE SUPERVISORES PARA SISTEMAS A
EVENTOS DISCRETOS

Alunos

Fernando Battisti
Iago de Oliveira Silvestre
Ígor Assis Rocha Yamamoto
Luis Felipe Pelison

Professores

Fábio Luíz Baldissera
José E. R. Cury
Max Hering de Queiroz

Junho de 2016

Sumário

1	Problema	2
1.1	Objetivo	2
1.2	Descrição	2
2	Atividades	5
3	Solução	7
3.1	Modelo das Restrições	7
3.2	Supervisor Monolítico	15
3.3	Supervisores Modulares	16
3.4	Composição Supervisores Modulares	18

1 Problema

1.1 Objetivo

O objetivo desta experiência é praticar a modelagem e síntese de supervisores para sistemas a eventos discretos com autômatos e apresentar metodologias e ferramentas para manipulação e simulação desses modelos.

1.2 Descrição

Considere a célula de manufatura na Figura 1, cujo funcionamento é comandado por um controlador lógico programável (CLP) conforme a seguinte sequência de passos:

1. a esteira aguarda até que o sensor de entrada detecte a chegada de uma peça em P0;
2. a esteira avança até que uma peça seja posicionada em P1;
3. a mesa gira 60° ;
4. a peça é testada;
5. a mesa gira 60° ;
6. a peça é furada;
7. a mesa gira 60° ;
8. o atuador aguarda até que o módulo seguinte esteja livre
9. o atuador retira a peça da mesa.

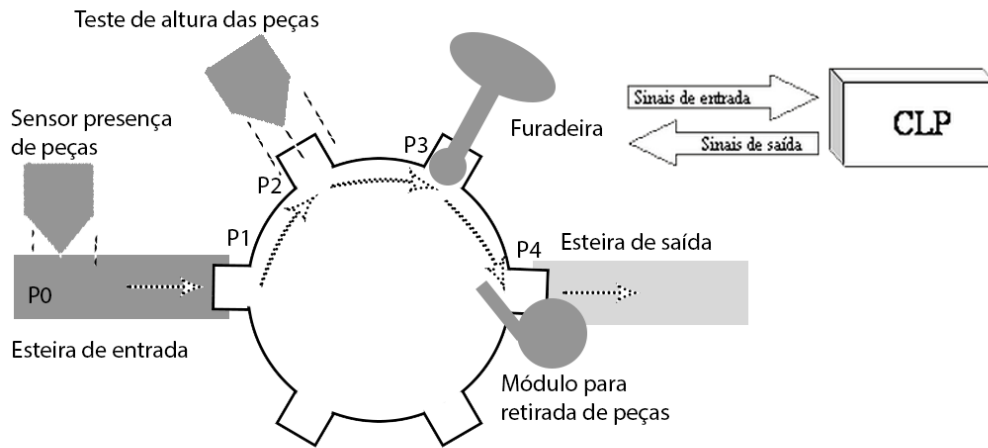


Figura 1: Mesa Giratória

Conforme o programa original, a célula opera em seqüência apenas uma peça por vez, ou seja, a esteira só pode ser acionada novamente depois que o manipulador retirar a peça da mesa. Esta restrição na lógica de controle evita os problemas que podem ocorrer na operação de múltiplas peças em paralelo:

1. retirar uma peça da mesa giratória enquanto o módulo seguinte estiver ocupado;
2. operar a esteira, a furadeira, o teste ou o atuador a mesa girar e vice-versa;
3. sobrepor peças na posição P1;
4. girar a mesa sem que as peças em P2, P3 e P4 tenham sido testadas, furadas ou retiradas, respectivamente;
5. testar, furar ou acionar o atuador sem peças em P2, P3 e P4, resp.;
6. testar ou furar duas vezes a mesma peça;
7. girar a mesa sem nenhuma peça.

Entretanto, esse modo de funcionamento é muito pouco eficiente, visto que a esteira, a furadeira, o teste e o atuador passam a maior parte do tempo parados, enquanto poderiam estar operando em paralelo. Espera-se usar a

Teoria de Controle Supervisório para desenvolver uma lógica de controle que garanta uma maior eficiência e flexibilidade da mesa giratória. Os sinais de entrada e saída do CLP são apresentados na Tabela 1.

EQUIPAMENTO	SINAL	TIPO	DESCRIÇÃO*
Esteira	sp1	entrada	Sinal do sensor que indica a chegada de uma peça na esteira
	a1	saída	Comando que inicia o depósito de uma peça na mesa giratória (P1).
	b1	entrada	Sinal de final de operação da esteira automática.
Mesa Giratória	a0	saída	Comando que inicia um giro de 60° da mesa.
	b0	entrada	Sinal de final de operação da mesa giratória.
Teste	a2	saída	Comando que inicia o teste de uma peça situada na posição P2.
	b2	entrada	Sinal de final de operação do teste automático.
Furadeira	a3	saída	Comando que inicia a furação da peça que estiver na posição P3.
	b3	entrada	Sinal de final de operação da furadeira automática.
Atuador	a4	saída	Comando que inicia a retirada de uma peça da mesa giratória (P4).
	b4	entrada	Sinal de final de operação do atuador.
Indicador do Módulo Seguinte	sp5	entrada	Transição <u>positiva</u> do sinal, indicando ocupação do módulo seguinte
	sn5	entrada	Transição <u>negativa</u> do sinal, indicando desocupação do módulo seguinte

Tabela 1: Equipamentos e Eventos

2 Atividades

1. Obtenha um modelo R para uma restrição que evite os problemas que podem ocorrer em G na operação de múltiplas peças em paralelo. Para isso modele as nove restrições modulares R_i de acordo com as especificações a seguir e compute $R = \parallel_{i=0,\dots,8} R_i$:
 - (a) $[R_0]$ O atuador só pode iniciar a retirada de peças quando o módulo seguinte não estiver ocupado.
 - (b) $[R_1]$ Enquanto a mesa estiver girando, a esteira não pode avançar e vice-versa.
 - (c) $[R_2]$ Enquanto a mesa estiver girando, o teste não pode operar e vice-versa.
 - (d) $[R_3]$ Enquanto a mesa estiver girando, a furadeira não pode operar e vice-versa.
 - (e) $[R_4]$ Enquanto a mesa estiver girando, o atuador não pode operar e vice-versa.
 - (f) $[R_5]$ Evitar problemas na manipulação de peças brutas entre P1 e P2.
 - (g) $[R_6]$ Evitar problemas na manipulação de peças testadas e não furadas entre P2 e P3.
 - (h) $[R_7]$ Evitar problemas na manipulação de peças furadas entre P3 e P4.
 - (i) $[R_8]$ Evitar que a mesa gire à toa, ou seja, sem peça bruta em P1, peça testada em P2 ou peça furada em P3.

No relatório, explique cada modelo R_i , indicando o significado de cada estado e quais eventos são proibidos em cada estado.

2. Calcule um supervisor minimamente restritivo $S = \text{SupC}(R, G)$ que respeite as nove restrições modeladas na Tarefa 1. Simule o comportamento resultante S/G usando a ferramenta SUPREMICA.
3. Ao invés de calcular um único supervisor monolítico S para as nove especificações da Tarefa 1, calcule nove supervisores modulares $S_i = \text{SupC}(R_i, G_i^{\text{loc}})$, $i = 0, \dots, 8$, cada qual considerando uma única restrição R_i sobre uma a planta local Giloc composta apenas pelos subsistemas diretamente afetados pela restrição (que têm eventos em comum com R_i).

4. Para testar se os nove supervisores são não-conflitantes, verifique se a composição $\parallel_{i=0,\dots,8} S_i$ não é bloqueante. Compare o resultado da composição com o supervisor monolítico S.

3 Solução

3.1 Modelo das Restrições

- (a) [R_0] O atuador só pode iniciar a retirada de peças quando o módulo seguinte não estiver ocupado.

A restrição R_0 , indicada na Figura 2, possui dois estados:

- **MsL**: Módulo seguinte livre;
- **MsO**: Módulo seguinte operando;

Descrição do autômato: O atuador somente será acionado (a4) quando o módulo seguinte estiver livre (MsL). A transição positiva (sp5) leva ao estado de ocupação do módulo seguinte; enquanto a transição negativa (sn5) leva ao estado de liberação.

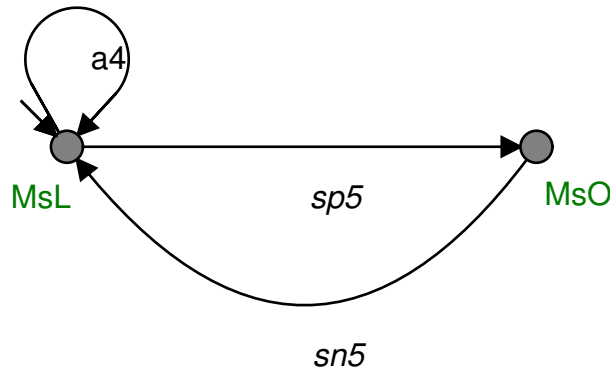


Figura 2: Restrição R_0

- (b) [R_1] Enquanto a mesa estiver girando, a esteira não pode avançar e vice-versa.

A restrição R_1 , indicada na Figura 3, possui três estados:

- **MpEp**: Mesa parada e esteira parada;
- **MpEo**: Mesa parada e esteira operando;
- **MoEp**: Mesa operando e esteira parada.

Descrição do autômato: Enquanto a mesa e a esteira estiverem paradas (MpEp), a esteira pode ser acionada (a1) ou a mesa pode girar (a0). Quando um dos eventos ocorrer, o autômato passa para um

estado (MpEo ou MoEp) em que somente eventos de fim de operação acontecem (b1 ou b0).

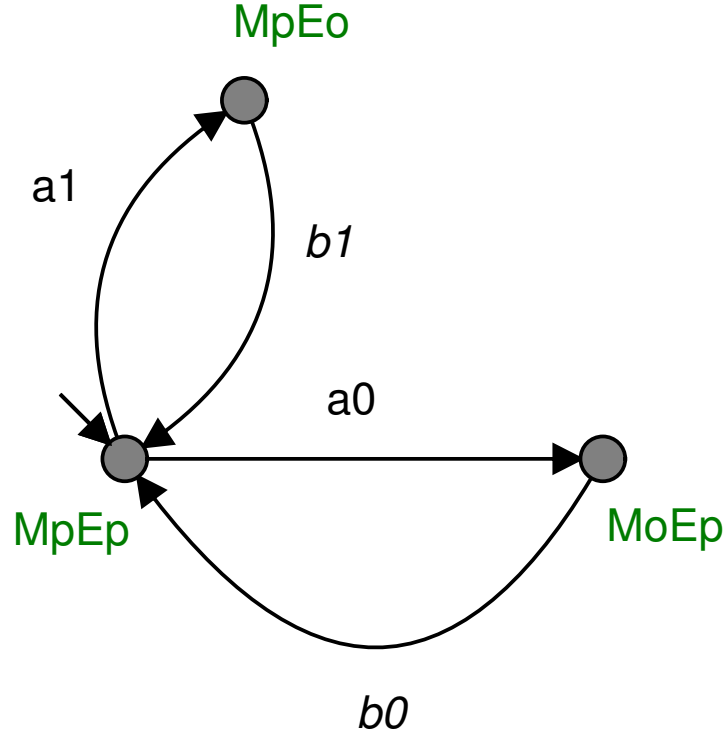


Figura 3: Restrição R_1

- (c) $[R_2]$ Enquanto a mesa estiver girando, o teste não pode operar e vice-versa.

A restrição R_2 , indicada na Figura 4, possui três estados:

- **MpTp:** Mesa parada e teste parado;
- **MpTo:** Mesa parada e teste operando;
- **MoTp:** Mesa operando e teste parado.

Descrição do autômato: Enquanto a mesa e o módulo de teste estiverem parados (MpTp), o módulo de teste pode ser acionado (a2) ou a mesa pode girar (a0). Quando um dos eventos ocorrer, o autômato passa para um estado (MpTo ou MoTp) em que somente eventos de fim de operação acontecem (b2 ou b0).

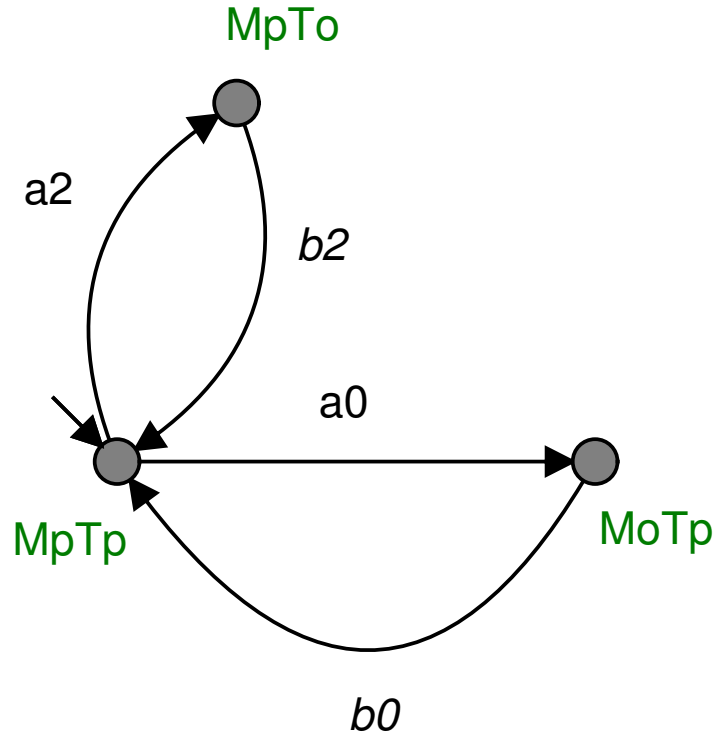


Figura 4: Restrição R_2

- (d) $[R_3]$ Enquanto a mesa estiver girando, a furadeira não pode operar e vice-versa.

A restrição R_3 , indicada na Figura 5, possui três estados:

- **MpFp:** Mesa parada e furadeira parada;
- **MpFo:** Mesa parada e furadeira operando;
- **MoFp:** Mesa operando e furadeira parada.

Descrição do autômato: Enquanto a mesa e a furadeira estiverem paradas (MpFp), a furadeira pode ser acionada (a3) ou a mesa pode girar (a0). Quando um dos eventos ocorrer, o autômato passa para um estado (MpFo ou MoFp) em que somente eventos de fim de operação acontecem (b3 ou b0).

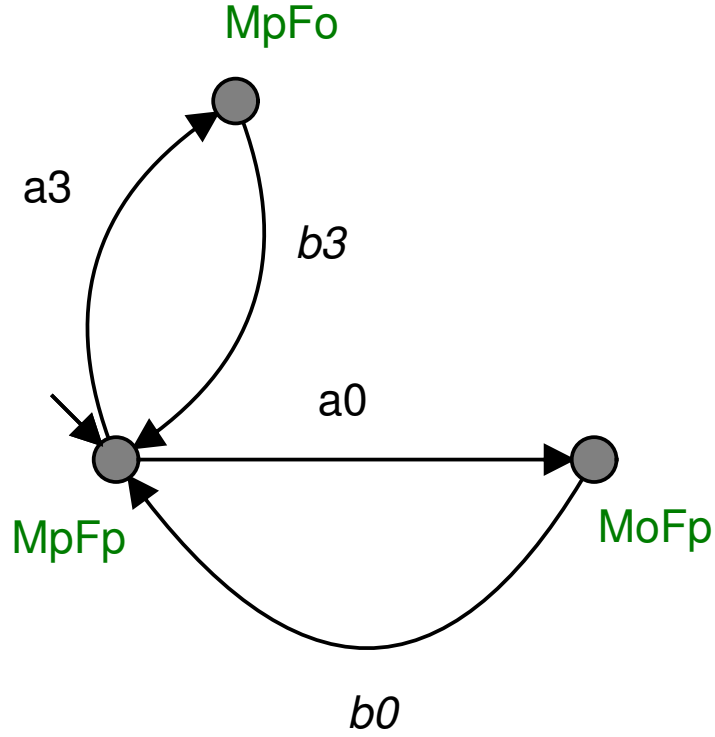


Figura 5: Restrição R_3

- (e) $[R_4]$ Enquanto a mesa estiver girando, o atuador não pode operar e vice-versa.

A restrição R_4 , indicada na Figura 6, possui três estados:

- **MpAp:** Mesa parada e atuador parado;
- **MpAo:** Mesa parada e atuador operando;
- **MoAp:** Mesa operando e atuador parado.

Descrição do autômato: Enquanto a mesa e o atuador estiverem parados (MpAp), o atuador pode ser acionado (a4) ou a mesa pode girar (a0). Quando um dos eventos ocorrer, o autômato passa para um estado (MpAo ou MoAp) em que somente eventos de fim de operação acontecem (b4 ou b0).

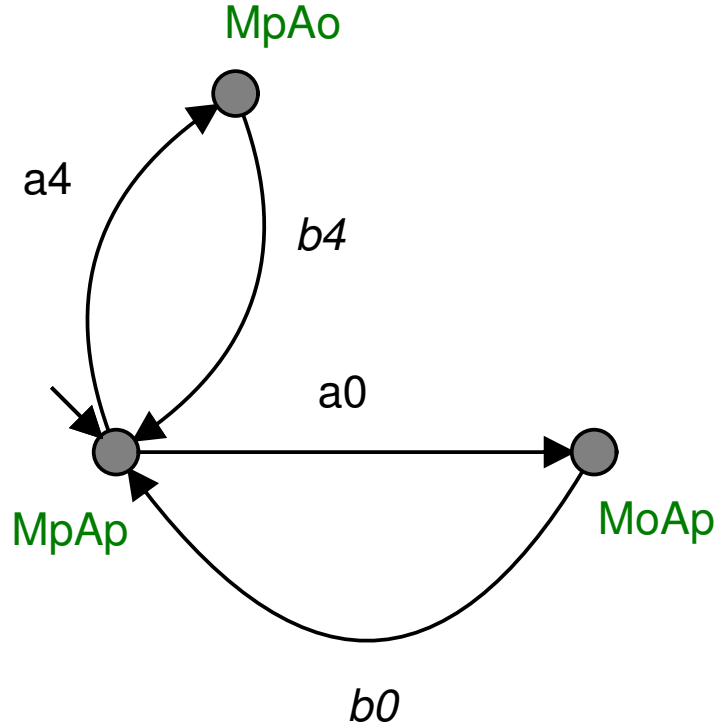


Figura 6: Restrição R_4

(f) $[R_5]$ Evitar problemas na manipulação de peças brutas entre P1 e P2.

A restrição R_5 , indicada na Figura 7, possui quatro estados:

- **Pb00:** Sem peça bruta em P1 e P2;
- **Pb10:** Peça bruta em P1;
- **Pb01:** Peça bruta em P2;
- **Pb11:** Peça bruta em P1 e P2.

Descrição do autômato: Enquanto não houver peças brutas na linha de produção (Pb00), a mesa tem a liberdade para girar (b0). Quando for sinalizada a chegada de uma peça em P1 (b1), chega-se em um estado (Pb10) em que a mesa deve girar para encaminhar a peça para P2 (Pb01). Neste estado, o sistema deve esperar que a peça seja testada (b2) ou pode ocorrer nova chegada de peça em P1, preenchendo a capacidade do sistema para peças brutas (Pb11). E, então, o sistema somente prossegue com o fim do teste da peça em P2.

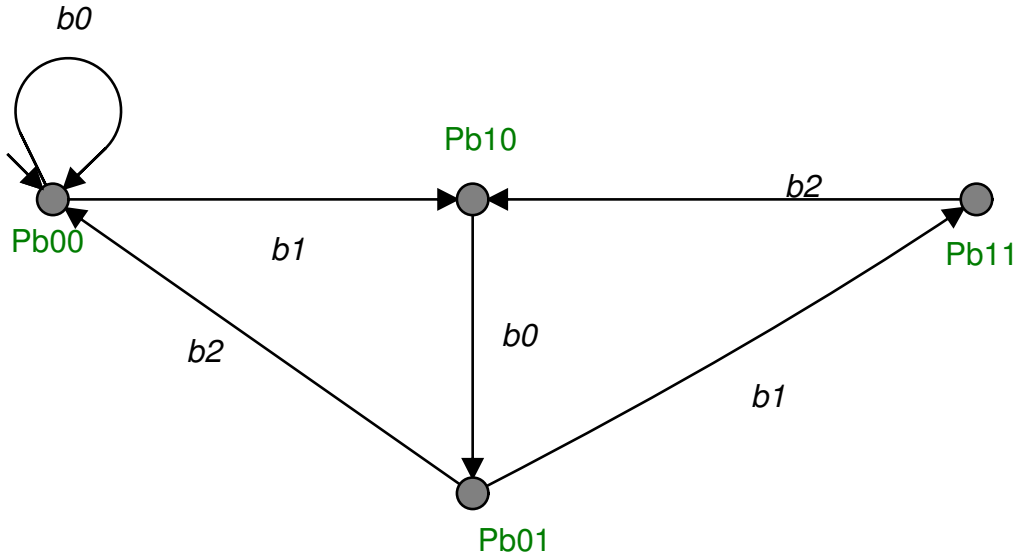


Figura 7: Restrição R_5

- (g) $[R_6]$ Evitar problemas na manipulação de peças testadas e não furadas entre P2 e P3.

A restrição R_6 , indicada na Figura 8, possui quatro estados:

- **Pp00:** Sem peça em processamento em P1 e P2;
- **Pp10:** Peça em processamento em P1;
- **Pp01:** Peça em processamento em P2;
- **Pp11:** Peça em processamento em P1 e P2.

Descrição do autômato: Enquanto não houver peças em processamento na linha de produção (Pp00), a mesa tem a liberdade para girar (b0). Quando for sinalizada a chegada de uma peça em P2 (b2), chega-se em um estado (Pp10) em que a mesa deve girar para encaminhar a peça para P3 (Pp01). Neste estado, o sistema deve esperar que a peça seja furada (b3) ou pode ocorrer nova chegada de peça em P2, preenchendo a capacidade do sistema para peças em processamento (Pp11). E, então, o sistema somente prossegue com o fim da furagem da peça em P3.

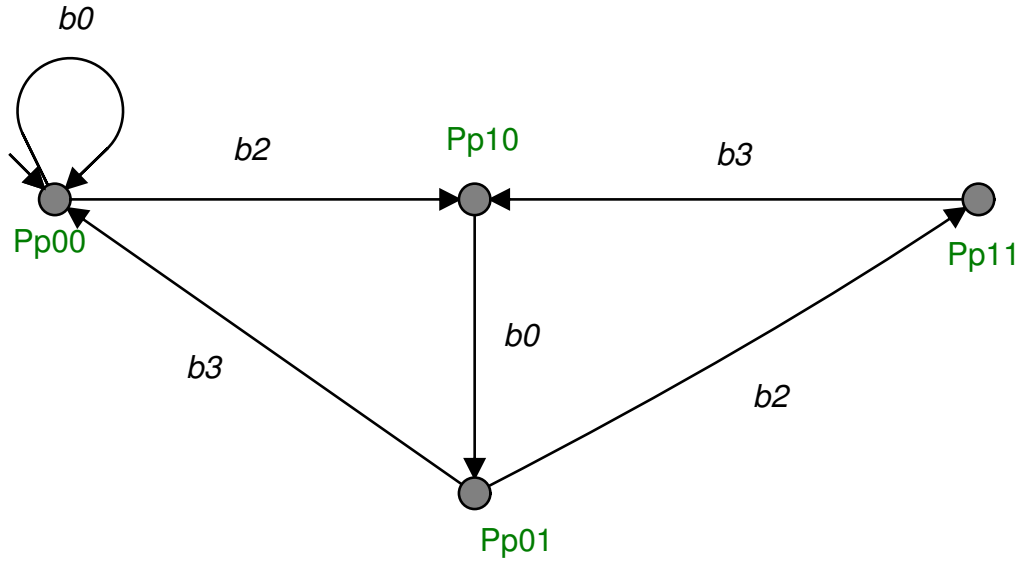


Figura 8: Restrição R_6

(h) $[R_7]$ Evitar problemas na manipulação de peças furadas entre P3 e P4.

A restrição R_7 , indicada na Figura 9, possui quatro estados:

- **Pf00:** Sem peça final em P1 e P2;
- **Pf10:** Peça final em P1;
- **Pf01:** Peça final em P2;
- **Pf11:** Peça final em P1 e P2.

Descrição do autômato: Enquanto não houver peças finais na linha de produção (Pf00), a mesa tem a liberdade para girar (b0). Quando for sinalizada a chegada de uma peça em P3 (b3), chega-se em um estado (Pf10) em que a mesa deve girar para encaminhar a peça para P4 (Pf01). Neste estado, o sistema deve esperar que a peça seja retirada pelo atuador (b4) ou pode ocorrer nova chegada de peça em P3, preenchendo a capacidade do sistema para peças finais (Pf11). E, então, o sistema somente prossegue com o fim da retirada da peça de P4.

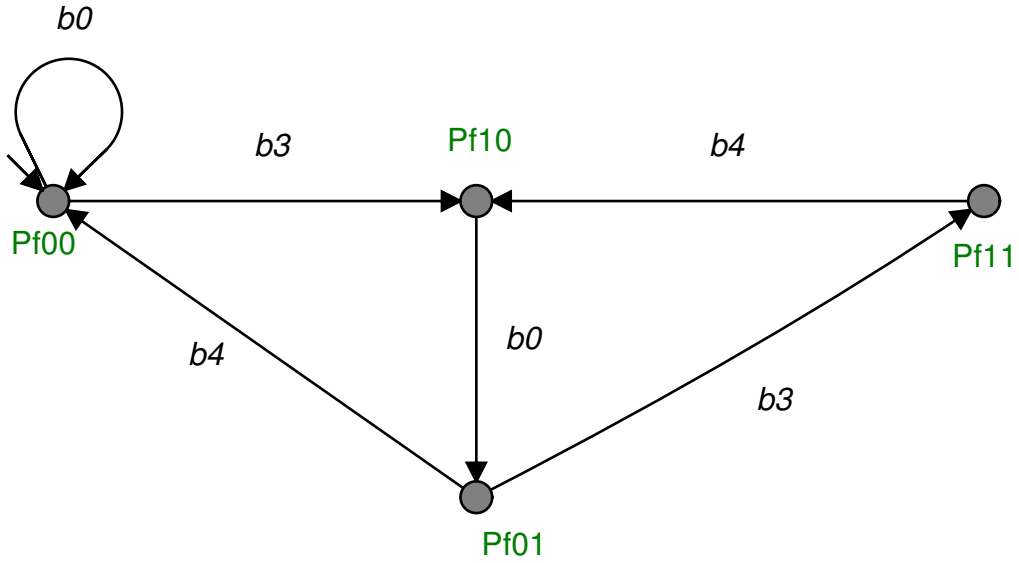


Figura 9: Restrição R_7

- (i) $[R_8]$ Evitar que a mesa gire à toa, ou seja, sem peça bruta em P1, peça testada em P2 ou peça furada em P3.

A restrição R_8 , indicada na Figura 12, possui dois estados:

- **Mb**: Mesa bloqueada para giro;
- **ML**: Mesa livre para giro;

Descrição do autômato: Enquanto a mesa estiver bloqueada para giro (Mb), ela nunca será acionada (a0). No momento em que ocorrer peça bruta em P1 (b1), peça testada em P2 (b2) ou peça furada em P3 (b3), a mesa passa a estar livre para giro (ML). Neste estado, além da possibilidade de giro, novas chegadas de peça bruta em P1, testes em P2 e furagens em P3 também podem ocorrer.

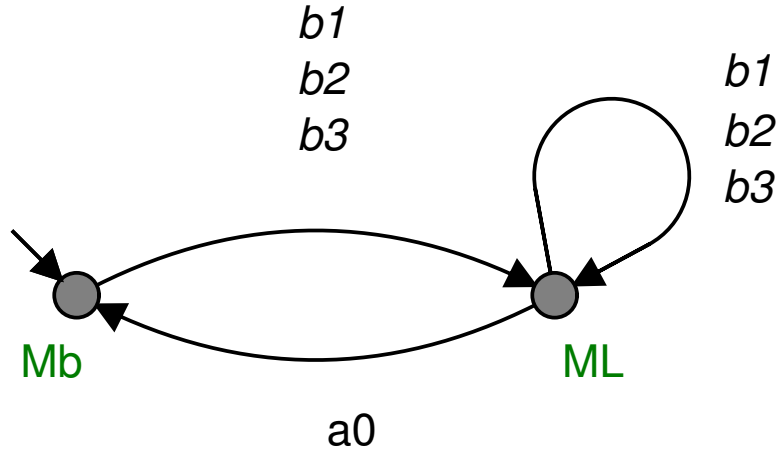


Figura 10: Restrição R_8

3.2 Supervisor Monolítico

O supervisor monolítico foi calculado usando a ferramenta *synthesize* na configuração *Monolithic* selecionando todas as restrições e modelos da planta. O supervisor resultante tem as seguintes características.

Editor	Simulator	Analyzer				
Name			Type	Q	Σ	→
Atuador Esteira Furadeira Indicador_Modulo_Seguinte Mesa_Gira...			Plant	96	13	576
sup(Atuador Esteira Furadeira Indicador_Modulo_Seguinte Mesa...			Supervisor	508	13	1682
R5 R6 R7 R1 R2 R3 R4 R0 R8			Specification	1208	12	4254

Figura 11: Supervisor Monolítico

O supervisor foi verificado e é controlável e não bloqueante, fora isso, foram feitas simulações com o supervisor implementado e o sistema operou da forma desejada. Por exemplo, na imagem seguinte temos uma peça finalizada indo da furadeira para o atuador de saída, além disso temos uma peça querendo entrar porém a esteira não pode ser ligada já que a mesa está operando. Além disso, temos uma peça em processamento vindo do teste para a furadeira como a restrição 6 demonstra.

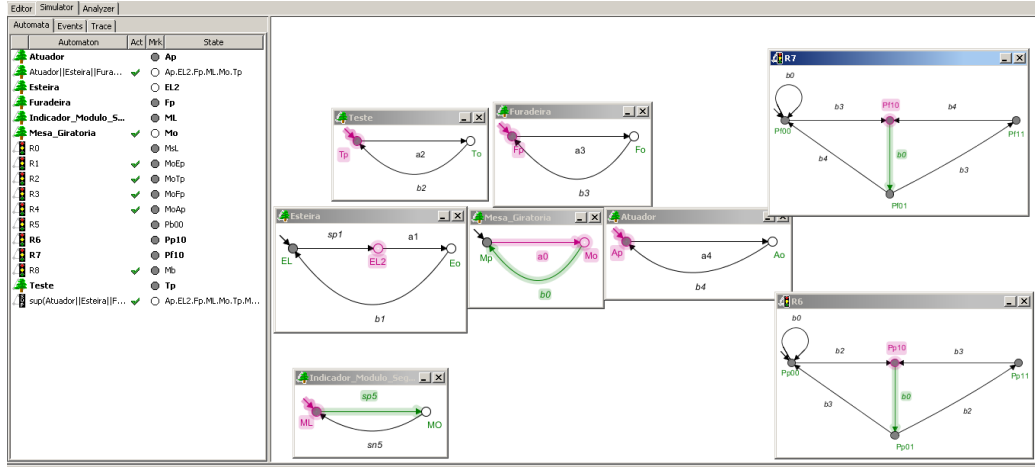


Figura 12: Supervisor Monolítico

3.3 Supervisores Modulares

Para o cálculo dos supervisores modulares, observamos primeiramente o alfabeto de cada planta e cada restrição:

Alfabeto:

- Plantas:

- $\sum_{Esteira} = \{a1, b1, sp1\}$
- $\sum_{Mesa_Giratoria} = \{a0, b0\}$
- $\sum_{Teste} = \{a2, b2\}$
- $\sum_{Furadeira} = \{a3, b3\}$
- $\sum_{Atuador} = \{a4, b4\}$
- $\sum_{Indicador_Modulo_Seguinte} = \{sp5, sn5\}$

- Restrições:

- $\sum_{R0} = \{a4, sn5, sp5\}$
- $\sum_{R1} = \{a0, a1, b0, b1\}$
- $\sum_{R2} = \{a0, a2, b0, b2\}$
- $\sum_{R3} = \{a0, a3, b0, b3\}$
- $\sum_{R4} = \{a0, a4, b0, b4\}$
- $\sum_{R5} = \{b0, b1, b2\}$
- $\sum_{R6} = \{b0, b2, b3\}$

- $\sum_{R7} = \{b0, b3, b4\}$
- $\sum_{R8} = \{a0, b1, b2, b3\}$

Em seguida verificamos para cada Ri, quais plantas têm evento(s) em comum com o Ri em questão.

Com estas informações, determinaremos os seguintes supervisores modulares:

- Sup1: R0 || Atuador || Indicador_Modulo_Seguinte
- Sup2: R1 || Mesa_Giratoria || Esteira
- Sup3: R2 || Mesa_Giratoria || Teste
- Sup4: R3 || Mesa_Giratoria || Furadeira
- Sup5: R4 || Mesa_Giratoria || Atuador
- Sup6: R5 || Mesa_Giratoria || Esteira || Teste
- Sup7: R6 || Mesa_Giratoria || Teste || Furadeira
- Sup8: R7 || Mesa_Giratoria || Furadeira || Atuador
- Sup9: R8 || Mesa_Giratoria || Esteira || Teste || Furadeira

No Supremica, obtivemos estes supervisores com as seguintes características:

Editor	Simulator	Analyzer				
Name			Type	Q	Σ	→
sup(R0 Atuador Indicador_Modulo_Seguinte)			Supervisor	4	4	7
sup(R1 Esteira Mesa_Giratoria)			Supervisor	5	5	8
sup(R2 Mesa_Giratoria Teste)			Supervisor	3	4	4
sup(R3 Mesa_Giratoria Furadeira)			Supervisor	3	4	4
sup(R4 Mesa_Giratoria Atuador)			Supervisor	3	4	4
sup(R5 Teste Mesa_Giratoria Esteira)			Supervisor	20	7	36
sup(R6 Mesa_Giratoria Teste Furadeira)			Supervisor	12	6	20
sup(R7 Mesa_Giratoria Furadeira Atuador)			Supervisor	12	6	20
sup(R8 Esteira Mesa_Giratoria Teste Furadeira)			Supervisor	48	9	180

Figura 13: Supervisores Modulares

Estes supervisores modulares foram testados e verificados que são controláveis e não bloqueantes.

3.4 Composição Supervisores Modulares

Fazendo a composição dos 9 supervisores modulares obtivemos o seguinte resultado:

Editor	Simulator	Analyzer			
Name		Type	Q	Σ	→
sup(R0) Atuador Indicador_Modulo_Sequinte) sup(R1) Esteira Mesa_Giratoria) sup(R2) Mesa_Giratoria T...		Supervisor	508	13	1682

Figura 14: Composição dos Supervisores Modulares

Observamos que a composição mostrada acima é igual a mostrada na figura 11. No Supremica, verificamos que ela é controlável e não bloqueante, isso significa que o conjunto dos supervisores modulares da Figura 13 é equivalente ao supervisor monolítico mostrado na Figura 11.

A vantagem em aplicar uma solução modular é que reduzimos o tamanho do supervisor, exigimos menos memória e cpu do CLP e a lógica de controle é muito mais compreensível.