

Aplicação de controle modular em um processo industrial de manufatura

Eduardo A. Schmoller¹, Gabriela C. D. Santos¹, Gustavo Bruinsma¹, Hudson D. S. Lapa¹ and Julianio Rinaldi¹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Via do
Conhecimento, Pato Branco, 85503-390, PR, Brasil.

Contributing authors: schmoller@alunos.utfpr.edu.br;
gabrielasantos.1998@alunos.utfpr.edu.br;
gustavobruinsma@alunos.utfpr.edu.br;
HUDSONLAPA@alunos.utfpr.edu.br; julianorinaldi@gmail.com;

1 Introdução

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um controle supervisorio para uma planta industrial com processo de manufatura. A figura 1 apresenta uma visão da planta industrial a ser modelada e simulada.



Fig. 1: Planta industrial

A planta é composta por:

- Mesa centralizadora com teste de chapa;
- 5 robôs manipuladores;
- 4 prensas;
- Esteira para destinação final das peças;

Partindo de uma posição segura para todos os robôs, o primeiro robô inicia sua movimentação para pegar a chapa da mesa centralizadora e levar até a primeira prensa, ao finalizar o processo o segundo robô faz o transporte até a segunda prensa e assim sucessivamente até o robô 4, que entrega a peça ao robô 5 e esse insere na ultima prensa e realiza a entrega o produto pronto para a esteira.

No caso de uma interrupção o sistema retorna a uma condição inicial em que todos robôs retornam a posição de segurança, estão livre de peças e as prensas ficam livres de peças e no ponto morto superior. Um operador, se necessário manualmente fará o controle do robô para a retirada de peças que estejam no meio do processo e voltar a posição de segurança para um recomeço da linha de manufatura, isso ocorre pois ele perde a referência de localização, justificando o *reset* de todos os elementos.

O controle modular será aplicado dada a possibilidade de tratar individualmente cada etapa do conjunto descentralizando em subplantas e especificações locais, formando os supervisores locais. Se não conflitarem entre si, irão compor um supervisor completo com comportamento equivalente a um supervisor monolítico.

2 Modelos projetados

Neste capítulo são apresentadas a modelagem para as plantas, especificações e controle modular para o processo industrial de manufatura observado e estudado.

2.1 Plantas

Os robôs 1 e 2 possuem comportamentos similares, em que as rotinas de posicionamentos espaciais são projetadas em forma de funções, as quais são acionadas por meio de sinais provenientes do Controlador Lógico Programável (CLP).

Os movimentos e funções que o robô 1 exerce consistem nas seguintes operações:

1. Pegar uma peça na mesa centralizadora: operação a qual na prática é identificada como um conjunto de movimentos que levará o robô até a posição na mesa em que as chapas metálicas estão localizadas. Após chegar nessa posição, o robô aciona as garras formadas por ventosas para pegar a peça e ao identificar que a peça foi pega, esse começa o movimento de retorno;
2. Retornar da mesa centralizadora: quando o robô 1 está em uma posição segura (definida como a posição inicial do robô) após voltar da mesa centralizadora, esse envia um sinal ao CLP indicando que já está com a peça e pode seguir para a próxima operação;
3. Inserir a peça na prensa 1: quando o robô 1 tem uma peça e está na posição segura, ele pode inserir a peça na prensa 1, e similarmente a primeira operação será realizado um conjunto de movimentos até chegar na posição espacial da prensa 1. Assim que o robô chega na prensa as garras formadas por ventosas liberam a peça para o trabalho da prensa;
4. Retornar da prensa 1: após o retorno do robô 1 da posição espacial da prensa 1 para uma posição segura, um sinal é enviado ao CLP para liberar o processo de trabalho da prensa 1;
5. Em todos os estados é permitido a ocorrência de eventos de interrupção, o retorno após uma interrupção o leva para um estado inicial seguro.

Para o robô 2, aplicam-se os mesmos princípios de operação do robô 1, porém o diferencial entre eles é o local de remoção e inserção da peça. Sendo assim, o robô 2 vai pegar a peça na prensa 1 após essa atingir o ponto motor superior (PMS). Já com a posse da peça, o robô 2 irá retornar a posição segura e quando liberado vai inserir a peça na prensa 2. Após isso, esse retorna para a posição segura.

Os modelos para a planta dos robôs 1 e 2 são apresentados na Figura 2, onde são mostrados os eventos responsáveis pela transição de estados dos robôs. Vale destacar o fato de haver eventos de interrupção para os robôs 1 e 2, denominados por *Int_R1* e *Int_R2*, respectivamente. Essas interrupções podem ocorrer devido alguma problema de reparo em algum componente da planta ou por violações de segurança da área restrita para o funcionamento

dessa. Portanto, caso ocorra um evento de interrupção, os eventos que permite a volta do funcionamento dos robôs 1 e 2 foi, respectivamente, denominados por *Ret_R1* e *Ret_R2*, fazendo com que os robôs voltem ao estado seguro inicial.

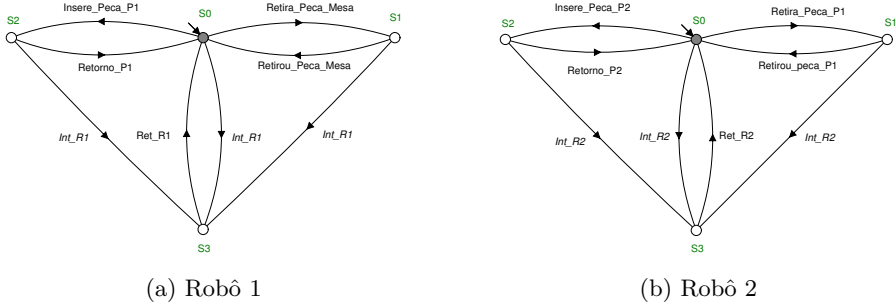


Fig. 2: Plantas dos robôs 1 e 2.

O robô 3 possui as mesmas rotinas de operações que o robô 2, porém na prática assim que esse retirar uma peça da prensa 2, ele precisará fazer o descarte dos retalhos da peça. Essa operação é feita internamente, então assim que esse retira a peça da prensa 2, vai até a posição do descarte, liberando as ventosas que seguram os retalhos. Após feito o descarte, o robô 3 vai para a posição segura e segue a operação, quando liberado, para inserir a peça na prensa 3.

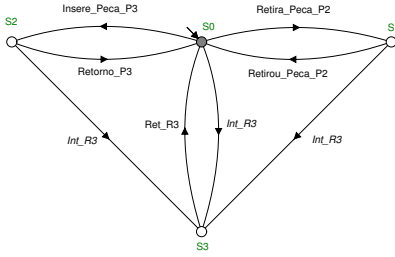
O modelo da planta do robô 3 é mostrado na Figura 3a, na qual estão identificados os eventos responsáveis pela transição de estados no robô 3. Novamente o evento de interrupção aparece, agora para o robô 3 e é identificado por *Int_R3*, assim como o evento *Ret_R3* de retorno para o estado inicial seguro. Portanto, cada o robô irá possuir seu evento de interrupção e retorno para estado inicial seguro.

O robô 4 possui uma rotina de operação que difere dos robôs anteriores, uma vez que esse não insere peça em uma prensa. O robô em questão leva a peça que retirou até o robô 5, uma vez que na última operação de trabalho sobre a peça, essa deve estar invertida ao ser inserida na prensa 4. Logo, o robô 4 possui as seguintes operações:

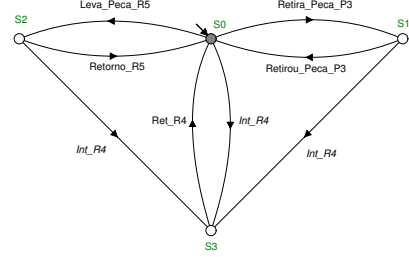
1. Remover peça da prensa 3: o robô 4 a partir da sua posição segura, irá até a prensa 3 retirar a peça;
2. Retornar para uma posição segura: uma vez que o robô 4 pegou a peça na prensa 3, ele retorna para a posição segura aguardando o próximo comando do CLP;
3. Levar a peça para o robô 5: o robô 4 entrega a peça já invertida para o robô 5; onde ele só pode retornar assim que o robô 5 mandar sinal que já pegou a peça;

4. Retornar para a posição segura: após entregar a peça para o robô 5, o robô 4 retornará para a posição segura;
5. Em todos os estados é permitido a ocorrência de evento de interrupção, o retorno da interrupção leva para um estado seguro inicial.

O modelo da planta do robô 4 é apresentado na Figura 3b, onde são mostrados os eventos responsáveis pela transição de estados do respectivo robô.



(a) Robô 3



(b) Robô 4

Fig. 3: Plantas dos robôs 3 e 4.

Como descrito anteriormente, o robô 5 é responsável por pegar a peça do robô 4 e, inserir e remover a peça na última prensa do processo industrial. As rotinas do robô 5 são apresentadas a seguir:

1. Pegar peça do robô 4: após receber um sinal do CLP de que o robô 4 está posicionado com a peça pronta para ser levada para a próxima prensa, o robô 5 irá até ele para pegar a peça;
2. Inserir a peça na prensa 4: com a peça capturada, o robô 5 vai inserir a peça na prensa 4 e retornar para a posição segura para que a prensa possa realizar o trabalho;
3. Retirar a peça da prensa 4: após a prensa 4 finalizar o trabalho na peça, o robô 5 vai remover a peça dessa prensa e lubrificar a prensa para a próxima peça;
4. Depositar a peça na esteira: uma vez com a peça retirada da prensa 4, o robô levará a peça até uma esteira onde é feito o descarte da mesma;
5. Em todos os estados é permitido a ocorrência de evento de interrupção, o retorno da interrupção leva para um estado seguro inicial.

O modelo da planta do robô 4 é apresentado na Figura 4, onde são mostrados os eventos responsáveis pela transição de estados do respectivo robô. Nota-se que o robô 5 possui mais estados e eventos que os robôs anteriores, fato que ocorre por esse além de pegar a peça e inserir na prensa 4, o robô também remove a peça da prensa e a leva até a esteira.

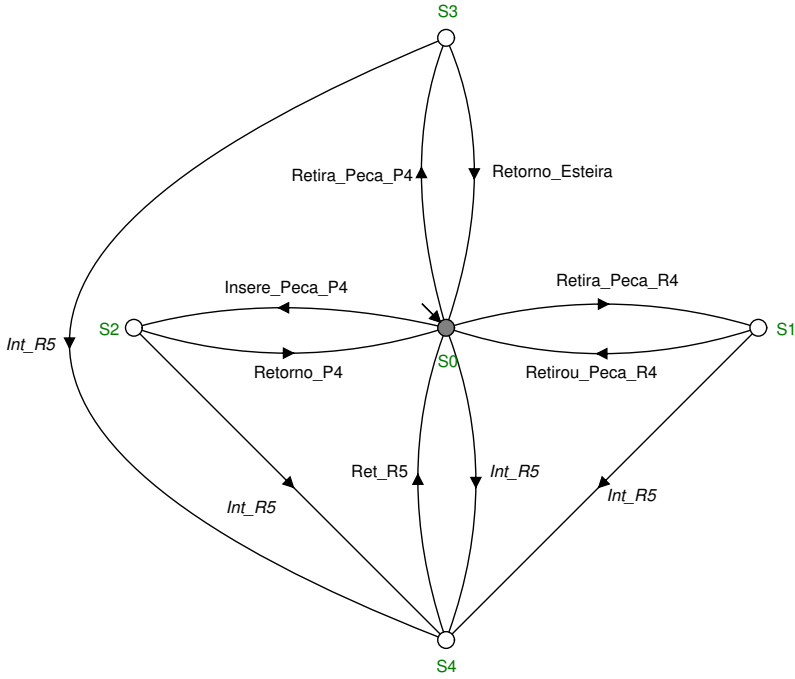


Fig. 4: Planta do robô 5.

Todas as quatro prensas funcionam da mesma maneira, tendo um acionador denotado por Bimanual, o qual ao ser acionado liga o motor fazendo com que essa movimente-se linearmente na vertical, subindo e descendo. As prensas possuem alguns sinais internos para identificar o posicionamento dessa, sendo eles:

1. Ponto morto superior (PMS): este sinal é enviado quando o martelo da prensa esta na parte superior;
2. Ponto morto inferior (PMI): este sinal é enviado quando o martelo da prensa esta na parte inferior;
3. Bimanual: sinal para acionar o motor da prensa e permitir ela de realizar o movimento;
4. Após início de operação pode ocorrer algum evento de interrupção e o retorno da interrupção leva a prensa para um estado seguro inicial.

A planta para as prensas é mostrada na Figura 5, onde verifica-se os eventos de início e final de operação da prensa e, também os eventos relacionados com a interrupção. Vale destacar que é considerado um ciclo completo de trabalho da prensa quando esta passa do $PMS \rightarrow PMI \rightarrow PMS$.

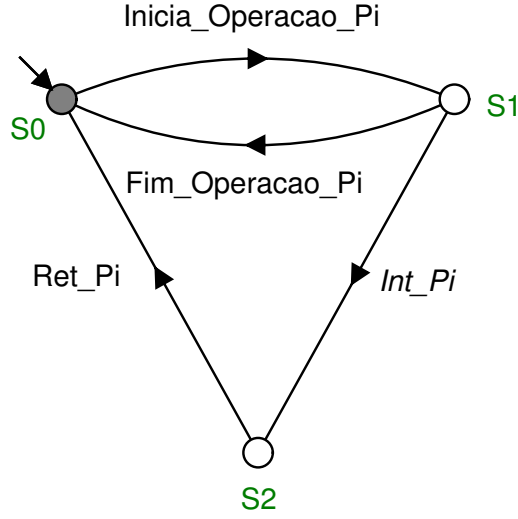


Fig. 5: Planta da prensa.

2.2 Especificações

A seção que se segue apresenta as especificações propostas para coordenar as ações entre as suplantas para criar o fluxo do processo de manufatura.

A especificação apresentada na figura 6a direciona o robô 1 a retirar a chapa da mesa centralizadora (Retira_Peca_Mesa) após o sensor presente na mesa detectar existência de uma peça (Com_Chapa). Enquanto a especificação apresentada na figura 6b faz com que o robô 1 inicie o processo de inserção da chapa na prensa 1 (Insere_Peca_P1) após ter à retirado da mesa centraliza e estar presente na garra (Retira_Peca_Mesa).

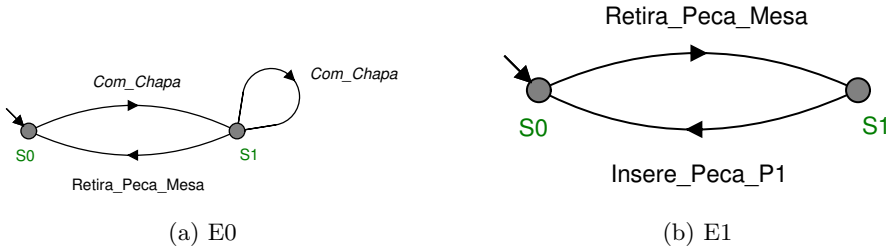


Fig. 6: Especificações 0 e 1

Na figura 7a a especificação libera a prensa 1, inicia a operação (Inicia_Operacao_P1) após o robô 1 finalizar a inserção da chapa e ter retornado

à uma posição segura (Retorno_P1). Na especificação apresentada na figura 7b modela a situação de *overflow* da prensa 1, pois libera uma nova inserção (Insere_Peca_P1) somente após a retirada da peça pelo robô 2 (Retirou_peca_P1).

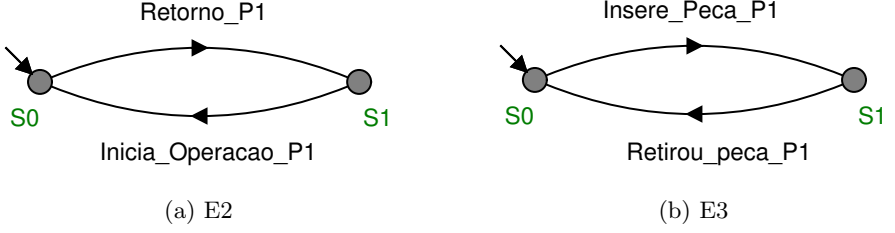


Fig. 7: Especificações 2 e 3

A especificação apresentada na figura 8a limita o robô 2 a fazer retirada da peça na prensa 1 (Retira.Peca.P1) após o final da operação (Fim_Operacao_P1). A figura 8b inibe o robô 2 de iniciar o processo de inserção na prensa 2 (Insere.Peca.P2) antes que a peça esteja presente na garra (Retira.Peca.P1).

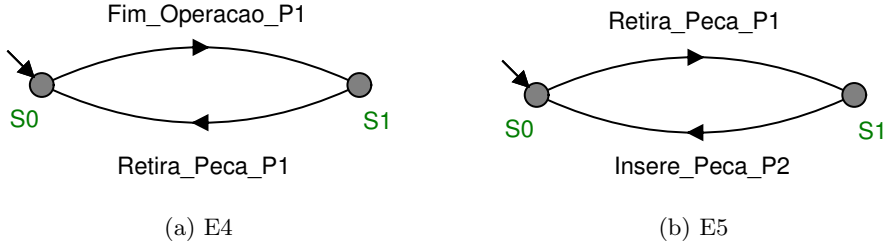


Fig. 8: Especificações 4 e 5

A especificação apresentada na figura 9a libera a prensa 2 para iniciar a operação (Inicia_Operacao_P2) após o robô 2 finalizar a inserção e retornar à uma posição segura (Retorno_P2). E a especificação apresentada na figura 9b modela a situação de *overflow* da prensa 2 e libera uma nova inserção (Insere_Peca_P2) somente após a retirada da peça pelo robô 3 (Retirou_Peca_P2).

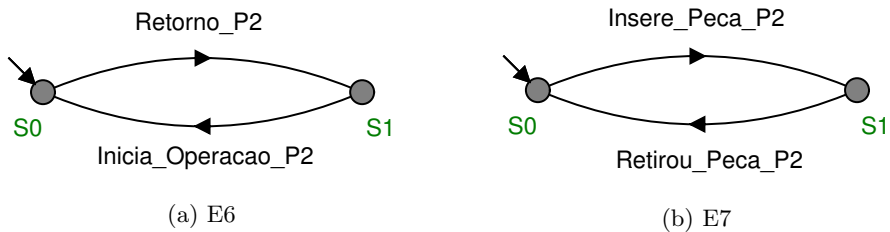


Fig. 9: Especificações 6 e 7

A especificação apresentada na figura 10a limita o robô 3 a retirar peça da prensa 2 (Retira_Peca_P2) após o final da operação (Fim_Operacao_P2). E a especificação apresentada na figura 10b limita o robô 3 a iniciar o processo de inserção na prensa 3 (Insere_Peca_P3) após a peça estar presente na garra (Retira_Peca_P2).

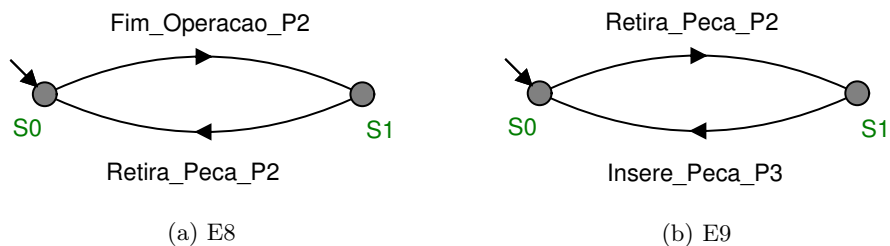


Fig. 10: Especificações 8 e 9

A especificação apresentada na figura 11a permite que a prensa 3 inicie a operação (Inicia_Operacao_P3) após o robô 3 finalizar a inserção e estar em posição segura (Retorno_P3). A especificação apresentada na figura 11b é o modelo para *overflow* da prensa 3 e libera uma nova inserção (Insere_Peca_P3) somente após a retirada da peça pelo robô 4 (Retira_Peca_P3).

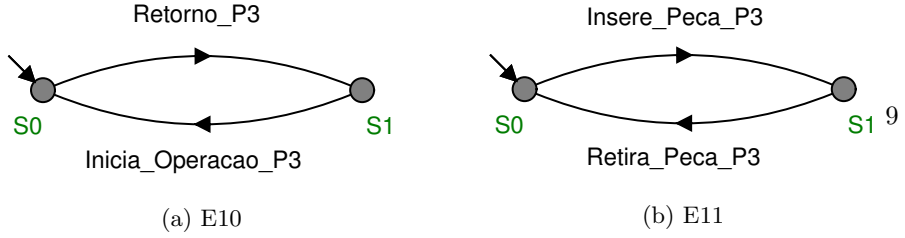


Fig. 11: Especificações 10 e 11

A especificação apresentada na figura 12a limita o robô 4 a retirar peça da prensa 3 (Retira_Peca_P3) somente após o final da operação (Fim_Operacao_P3). A especificação apresentada na figura 12b limita o robô 4 a iniciar o processo de entrega para robô 5 (Leva_Peca_R5) após a peça estar presente na garra (Retira_Peca_P3).

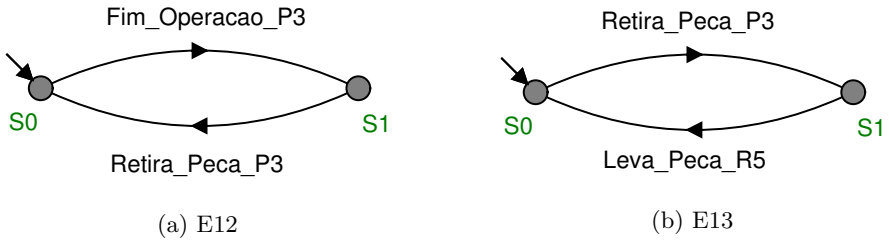
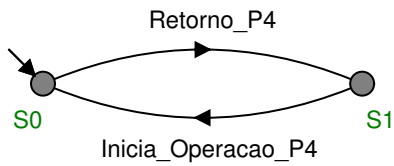
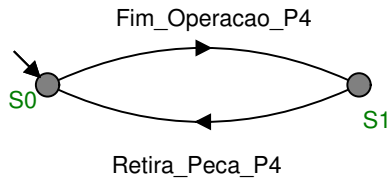


Fig. 12: Especificações 12 e 13

A especificação apresentada na figura 13a permite que a Prensa 4 inicie a operação (Inicia_Operacao_P4) após o robô 5 finalizar a inserção e estar em posição segura (Retorno_P4). A especificação apresentada na 13b limita o robô 5 a retirar peça da prensa 5 (Retira_Peca_P4) após o final da operação (Fim_Operacao_P4).



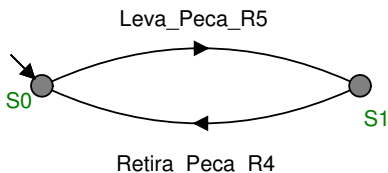
(a) E14



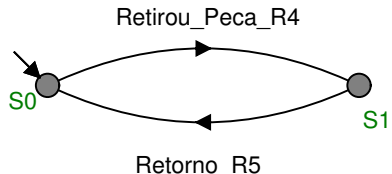
(b) E15

Fig. 13: Especificações 14 e 15

A especificação apresentada na figura 14a força robô 4 ao entregar uma peça (Leva_Peca_R5) aguarde o movimento do robô 5 de buscar a peça (Retira_Peca_R4). A especificação apresentada na figura 14b força o robô 4 a aguardar o retorno para a posição segura do robô 5 (Retorno_R5) para retornar ao movimento de entrega de peça entre a prensa 4 e o robô 5 (Retirou_Peca_R4).



(a) E16



(b) E17

Fig. 14: Especificações 16 e 17

A especificação apresentada na figura 15a limita o robô 5 a iniciar o processo de inserção na prensa 4 (Insere_Peca_P4) após ter uma peça presente na garra (Retirou_Peca_R4). A especificação apresentada na 15b permite que o robô 5 pegue uma nova peça do robô 4 (Retira_Peca_R4) após entregar a peça manufaturada na esteira (Retorno_Esteira).

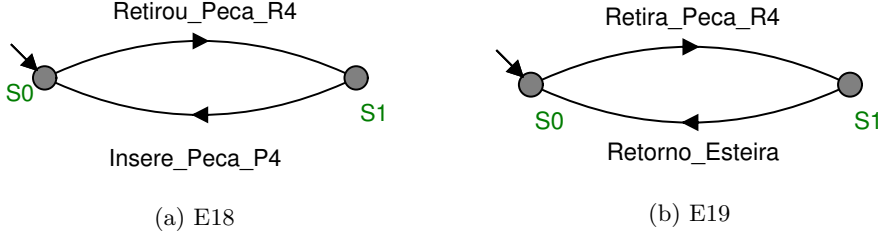


Fig. 15: Especificações 18 e 19

2.3 Solução modular de controle

O software Supremica [1] disponibiliza a funcionalidade para verificação da modularidade dos modelos desenvolvidos. A Figura 16 apresenta o resultado da análise de modularidade para especificação E0 com as plantas, podemos verificar que a especificação realiza controle de eventos sobre o robô 1 e sobre sensor chapa sem ter dependência com outras plantas.

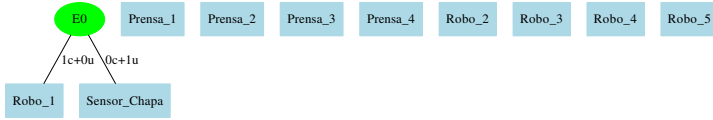


Fig. 16: Estrutura modular para E0

O processo de verificação de modularidade foi executado para todas as especificações individualmente. A tabela 1 apresenta o resultado para cada especificação e as respectivas plantas que se relacionam. Foi verificado que o número máximo de interações de uma especificação é com duas plantas.

Table 1: Relações entre plantas e especificações

Especificação	Planta 1	Planta 2
E0	Sensor Chapa	Robô 1
E1	Robô 1	
E2	Robô 1	Prensa 1
E3	Robô 1	Robô 2
E4	Robô 2	Prensa 1
E5	Robô 2	
E6	Robô 2	Prensa 2
E7	Robô 2	Robô 3
E8	Robô 3	Prensa 2
E9	Robô 3	
E10	Robô 3	Prensa 3
E11	Robô 3	Robô 4
E12	Robô 4	Prensa 3
E13	Robô 4	
E14	Robô 5	Prensa 4
E15	Robô 5	Prensa 4
E16	Robô 4	Robo 5
E17	Robô 4	Robo 5
E18	Robô 5	
E19	Robô 5	

Utilizando-se da relação entre especificações e plantas foi calculado o supervisor não bloqueante e controlável modularmente para cada especificação. A Tabela 2 apresenta o número de estados, transições e eventos para cada supervisor modular que serão utilizados para obter o supervisor final.

Table 2: Supervisores Modulares

Supervisor	Estados	Eventos	Transições
Sup 0	8	7	23
Sup 1	6	6	10
Sup 2	24	10	73
Sup 3	32	12	120
Sup 4	24	10	73
Sup 5	6	6	10
Sup 6	24	10	73
Sup 7	32	12	120
Sup 8	24	10	73
Sup 9	6	6	10
Sup 10	24	10	73
Sup 11	32	12	120
Sup 12	24	10	73
Sup 13	6	6	10
Sup 14	30	12	98
Sup 15	30	12	98
Sup 16	40	14	159
Sup 17	40	14	159
Sup 18	9	8	18
Sup 19	9	8	18

Por limitação computacional não foi possível realizar a composição de todos os supervisores para obtenção do controlador final, isso se deu devido à explosão do número de estados.

3 Conclusões

Após elaborar as plantas e todas as especificações locais, os supervisores locais puderam ser calculados, porém vários retornam um grande número de estados e transições. Ao fazer o produto síncrono para obter o equivalente ao controle monolítico houve uma explosão de estados pelo crescimento exponencial associado à complexidade da síntese modular local.

Logo é sugerido a aplicação de ferramentas que possam reduzir o número de dados, como algoritmos de minimização para os supervisores locais antes de obter o supervisor completo [2], ou ainda aplicar o controle utilizando características de mestre e subordinado.

References

- [1] Malik, R.: Waters/Supremica IDE, 2.6, The University of Waikato (2020)
- [2] de Queiroz, M.H., Cury, J.E.R.: Synthesis and implementation of local modular supervisory control for a manufacturing cell. In: Sixth International Workshop on Discrete Event Systems, 2002. Proceedings., pp. 377–382 (2002). <https://doi.org/10.1109/WODES.2002.1167714>