

Aplicação de controle modular em um processo industrial de manufatura

Eduardo A. Schmoller¹, Gabriela C. D. Santos¹, Gustavo Bruinsma¹, Hudson D. S. Lapa¹ and Juliano 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 supervisor 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.

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

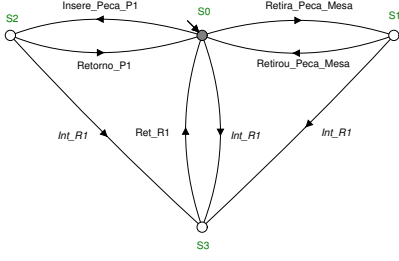
2.1 Plantas

Os robôs 1 e 2, possuem comportamentos similares, onde as rotinas de posicionamentos espaciais são projetadas em forma de funções, onde são acionadas através de sinais vindo do CLP (Controlador Lógico Programável). Os movimentos do robô 1 consistem em:

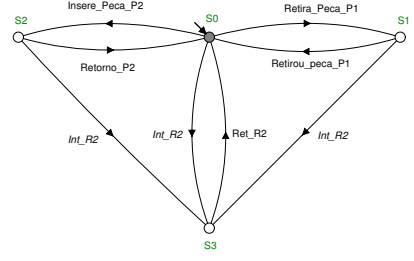
1. Pegar peça na mesa centralizadora, que, na prática, é um conjunto de movimentos que levará o robô até a mesa na posição em que as chapas metálicas se encontram, fazer o acionamento das garras (Ventosas) e quando o mesmo identificou que pegou a peça ele começa o movimento de retorno;
2. Retorno da mesa centralizadora, quando o robô está em uma posição segura ele envia um sinal ao CLP que já pegou a peça e está pronto para o próximo ciclo;
3. Inserir a peça na prensa 1. O robô assim que tem uma peça pode inserir a peça na prensa, similar a primeira operação será realizado um bloco de movimentos até chegar na posição espacial da prensa, assim que chegar as garras são desacionadas deixando a peça na prensa;
4. Quando o robô volta a uma posição segura para operação da prensa ele envia sinal ao CLP que pode iniciar o processo da prensa;
5. Em todos os estados é permitido a ocorrência de evento de interrupção, o retorno da interrupção leva para um estado seguro inicial;

O robô 2 tem o mesmo principio do robô 1, o que diferença é o local que ele remove e insere a peça, ele remove a peça da prensa 1 e insere na prensa 2, sempre retornando a uma posição segura.

A Figura 2 apresenta os modelos para os processos dos robôs 1 e 2.



(a) Robô 1



(b) Robô 2

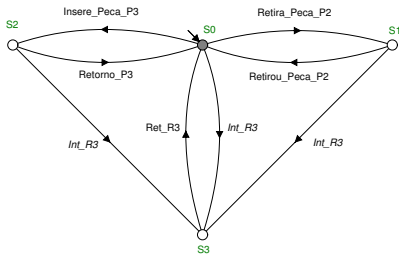
Fig. 2: Plantas robôs 1 e 2

O robô 3 possui as mesmas rotinas que o robô 2, porém na prática assim que ele remove uma peça da prensa 2 ele precisa fazer o descarte dos retalhos, essa operação é feita internamente, assim que ele remove a peça da presa ele vai até à posição do descarte e libera as ventosas que seguram os retalhos, após isso vai para posição segura.

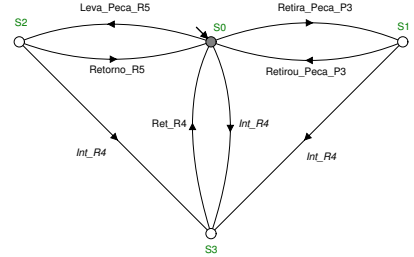
O robô 4 possui uma rotina diferente, no sentido que ele não insere na prensa 4, ele leva a peça até o robô 5, pois na última operação a peça deve estar invertida, então para isso ser possível o robô 4 deve entregar a peça ao robô 5. Logo o robô 4 possui as seguintes rotinas:

1. Remove peça da prensa 3.
2. Retorna para uma posição segura.
3. Leva peça para o robô 5, onde ele só pode retornar assim que o robô 5 mandar sinal que já pegou a peça.
4. Retorno para um ponto seguro após entregar a peça.
5. Em todos os estados é permitido a ocorrência de evento de interrupção, o retorno da interrupção leva para um estado seguro inicial;

A Figura 3 apresenta os modelos para os processos dos robôs 3 e 4.



(a) Robô 3



(b) Robô 4

Fig. 3: Plantas robôs 3 e 4

Como descrito anteriormente o robô 5 pega a peça do robô 4, e ele faz a inserção e remoção na ultima prensa, podemos dividir as rotinas dele em:

1. Pegar peça do robô 4, onde o mesmo vai chegar na posição onde o robô 4 vai largar a peça.
2. Insere a peça na prensa, voltando a uma posição segura para que a prensa possa realizar o trabalho.
3. Retirar a peça depois que a prensa finaliza o trabalho, nessa retirada da peça é feito também a lubrificação da prensa.
4. Ao final a peça é levada 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;

A Figura 4 apresenta o modelo para o processo do robô 5.

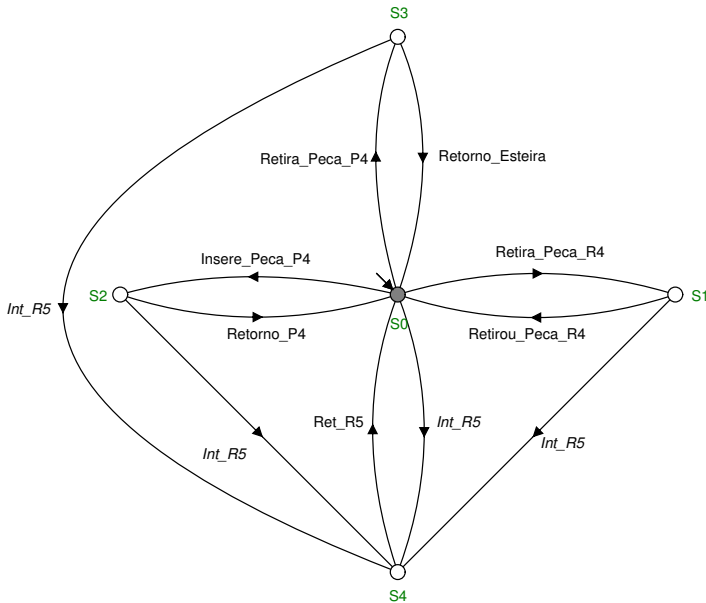


Fig. 4: Planta robô 5

As prensas funcionam da mesma maneira, tendo um acionador denotado por Bimanual, que quando acionado liga o motor fazendo com que ela movimente linearmente na vertical, subindo e descendo, a prensa possui alguns sinais internos para identificar o posicionamento sendo eles:

1. PMS, ponto morto superior, este sinal é enviado quando o martelo da prensa esta na parte superior.
2. PMI, ponto morto inferior, este sinal é enviado quando o martelo da prensa esta na parte inferior.

3. Bimanual, sinal para acionar o motor da prensa para ela realizar o movimento.
4. Após início de operação pode ocorrer evento de interrupção, o retorno da interrupção leva para um estado seguro inicial.

É considerado um ciclo completo de trabalho quando a prensa passa do $PMS \rightarrow PMI \rightarrow PMS$.

A figura 5 apresenta o modelo para a prensa.

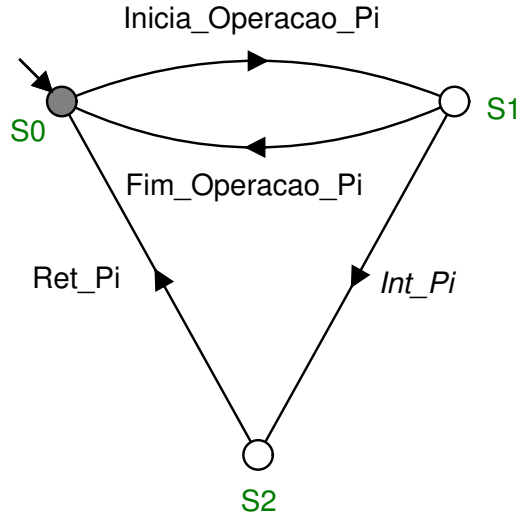


Fig. 5: Planta Prensa

2.2 Especificações

A seção a seguir apresenta as especificações desenvolvidas para cumprir com os requisitos de controle desejados.

A especificação apresentada na Figura 6a permite ao robô 1 retirar peças da mesa centralizadora após o sensor detectar existência de peça sobre a mesa. Já a especificação apresentada na Figura 6b limita o robô 1 a iniciar o processo de inserção na Prensa 1 após ter peça presente na garra.

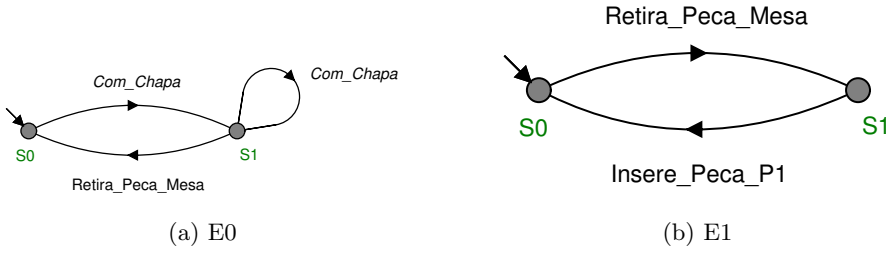


Fig. 6: Especificações 0 e 1

A especificação apresentada na Figura 7a permite que a Prensa 1 inicie a operação após o robô 1 finalizar a inserção e estar em posição segura. Já a especificação apresentada na 7b é o modelo para overflow da Prensa 1 e libera uma nova inserção após a retirada da peça pelo robô 2.

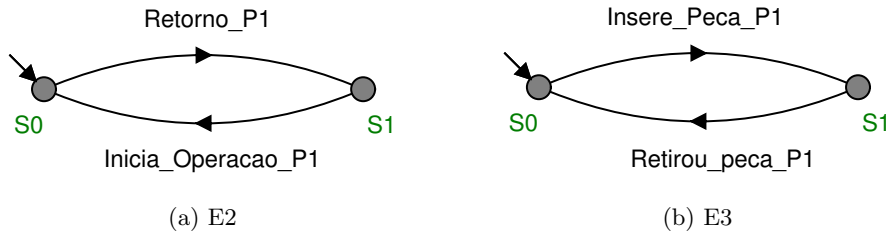


Fig. 7: Especificações 2 e 3

A especificação apresentada na Figura 8a limita o robô 2 a retirar peça da Prensa 1 após o final da operação. Já a especificação apresentada na 8b limita o robô 2 a iniciar o processo de inserção na Prensa 2 após ter peça presente na garra.

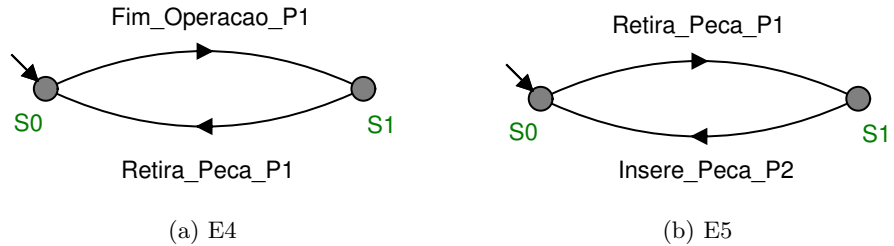


Fig. 8: Especificações 4 e 5

A especificação apresentada na Figura 9a permite que a Prensa 2 inicie a operação após o robô 2 finalizar a inserção e estar em posição segura. Já a especificação apresentada na 9b é o modelo para overflow da Prensa 2 e libera uma nova inserção após a retirada da peça pelo robô 3.

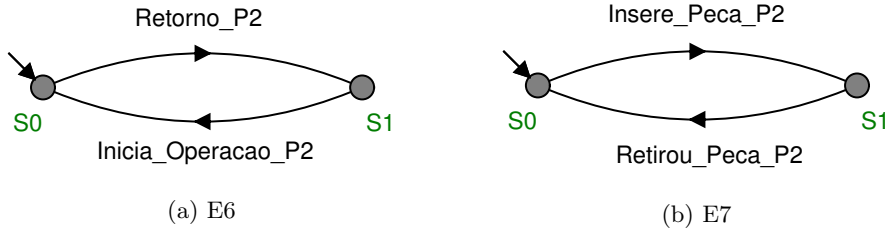


Fig. 9: Especificações 6 e 7

A especificação apresentada na Figura 10a limita o robô 3 a retirar peça da Prensa 2 após o final da operação. Já a especificação apresentada na 10b limita o robô 3 a iniciar o processo de inserção na Prensa 3 após ter peça presente na garra..

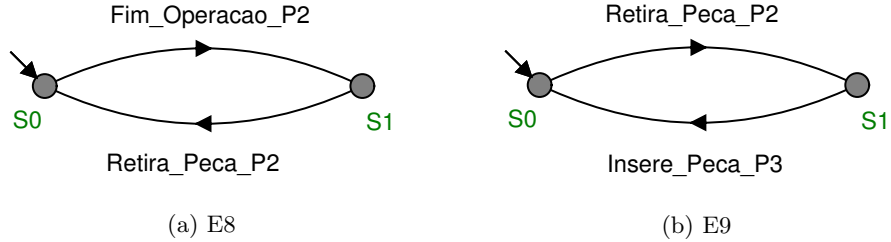
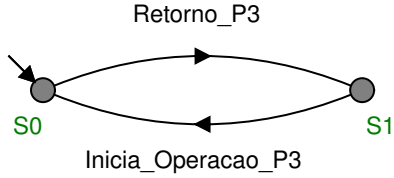
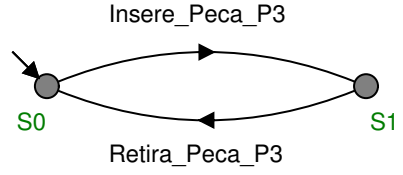


Fig. 10: Especificações 8 e 9

A especificação apresentada na Figura 11a permite que a Prensa 3 inicie a operação após o robô 3 finalizar a inserção e estar em posição segura. Já a especificação apresentada na 11b é o modelo para overflow da Prensa 3 e libera uma nova inserção após a retirada da peça pelo robô 4.



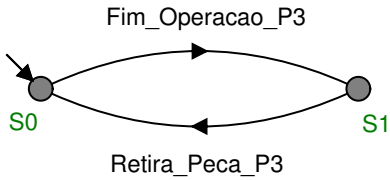
(a) E10



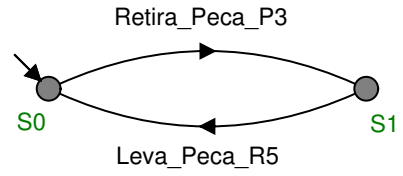
(b) E11

Fig. 11: Especificações 10 e 11

A especificação apresentada na Figura 12a limita o robô 4 a retirar peça da Prensa 3 após o final da operação. Já a especificação apresentada na 12b limita o robô 4 a iniciar o processo de entrega para robô 5 após ter peça presente na garra.



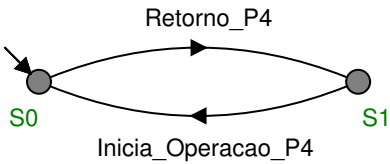
(a) E12



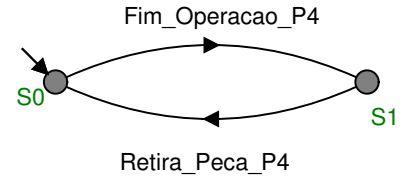
(b) E13

Fig. 12: Especificações 12 e 13

A especificação apresentada na Figura 13a permite que a Prensa 4 inicie a operação após o robô 5 finalizar a inserção e estar em posição segura. Já a especificação apresentada na 13b limita o robô 5 a retirar peça da Prensa 5 após o final da operação.



(a) E14



(b) E15

Fig. 13: Especificações 14 e 15

A especificação apresentada na Figura 14a força robô 4 ao entregar uma peça aguarde o movimento do robô 5 de buscar a peça. Já a especificação apresentada na 14b força o robô 4 a aguardar posição segura do robô 5 para retornar do movimento de entrega de peça.

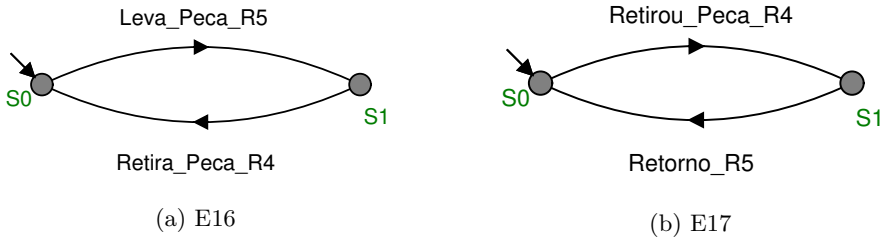


Fig. 14: Especificações 16 e 17

A especificação apresentada na Figura 15a limita o robô 5 a iniciar o processo de inserção na Prensa 4 após ter peça presente na garra. Já a especificação apresentada na 15b permite que o robô 5 pegue uma nova peça do robô 4 após entregar a peça manufaturada na esteira.

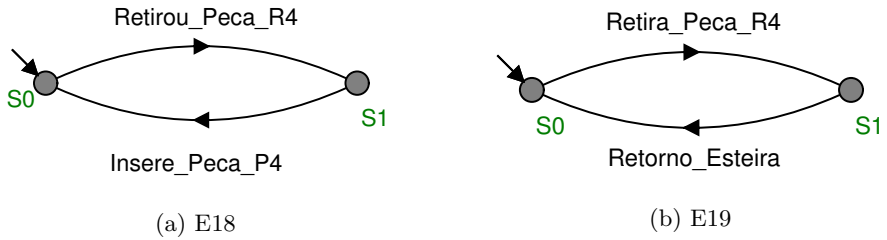


Fig. 15: Especificações 18 e 19

2.3 Solução modular de controle

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

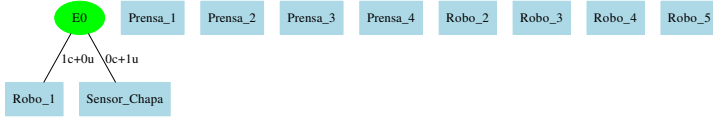


Fig. 16: Estrutura modular para E0

O processo de verificação de modularidade foi executado para todas as especificações, a tabela 1 apresenta o resultado para cada especificação e as respectivas plantas com atuação. Foi verificado que o número máximo de interações de uma especificações 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 controlavel modularmente para cada especificação. A Tabela 2 apresenta o número de estados, transições e eventos para cada supervisor modular e para o supervisor final.

3 Conclusões

Após elaborar as subplantas e todas as especificações locais, os supervisores locais puderam ser calculados, porém, vários retornam um grande número

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

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].

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, 377–382 (2002). <https://doi.org/10.1109/WODES.2002.1167714>