

SÍNTESE DE CONTROLE SUPERVISÓRIO COM ABSTRAÇÕES PARA TRATAMENTO DE FILAS

GUILHERME DA S. FISCHER*, ANDRÉ B. LEAL*

* *Laboratório de Automação da Manufatura - LAMAN, Depto. de Engenharia Elétrica
Universidade do Estado de Santa Catarina
Joinville, Santa Catarina, Brasil*

Emails: guilherme.silva.fischer@gmail.com, leal@joinville.udesc.br

Abstract— In this paper an alternative way of modelling industrial plants with *buffers* or *first in, first out* characteristics with the supervisory control theory is presented. The proposed method uses additional models for the plant in order to allow abstractions on the control specifications, leading to a size reduction on the supervisor. The proposed method is then used to model a sorting system and modular local supervisors are synthetised, the results are then compared with other aproaches.

Keywords— Discrete Event Systems, Supervisory Control, Sorting Systems, Local Modular Supervisors, Automation

Resumo— Neste artigo é apresentado um método alternativo para se modelar plantas industriais com filas ou características *first in, first out* com a teoria de controle supervisório. O método proposto é baseado na adição de modelos na planta do sistema que permitem abstrações nas especificações de controle, levando a uma redução no tamanho do supervisor. O método proposto é então usado para modelar um sistema de triagem e supervisores modulares locais são sintetizados, e então os resultados obtidos são comparados com outras abordagens.

Palavras-chave— Sistemas a Eventos Discretos, Teoria de Controle Supervisório, Sistemas de Triagem, Supervisores Modulares Locais, Automação

1 INTRODUÇÃO

A Teoria de Controle Supervisório (TCS) (Ramadge and Wonham, 1989) é uma ferramenta formal que permite a síntese de uma lógica de controle mininamente restritiva e não bloqueante para um Sistema a Eventos Discretos. Para obter esta lógica é feita a modelagem do comportamento da planta e das especificações que devem ser atendidas utilizando autômatos e linguagens, e então uma série de cálculos são realizados para obter o chamado supervisor.

Apesar das vantagens da TCS e desta ter sido amplamente aceita no meio acadêmico, as aplicações industriais ainda são raras, devido ao problema da implementação física (Hellgren, 2005). Porém, na última década, foram desenvolvidas algumas ferramentas que geram código automaticamente a partir do supervisor calculado, além de métodos mais eficientes de implementação. Junto ao problema da implementação física, pode-se destacar também o tamanho dos supervisores gerados como um dos motivos que dificultam o aumento do número de aplicações práticas.

Entre as situações que elevam rapidamente o tamanho dos supervisores destacam-se as necessidades de lidar com contagens e com sequências. A especificação típica de não *overflow* e *underflow* de um *buffer* de capacidade n alimentado por uma máquina na entrada, enquanto outra na saída remove peças, por exemplo, possui $(n+1)$ estados e $(2*n)$ transições. Já para uma fila *first in, first out (FIFO)* o número de estados da especificação cresce de forma exponencial, pois é necessário

salvar também a sequência em que entraram as peças.

Percebe-se que utilizar estas especificações não é uma forma eficiente de lidar com filas, devido ao crescimento exponencial dos supervisores causado pela composição síncrona dos modelos do sistema.

Assim, tem-se por objetivo reduzir o tamanho dos supervisores com a utilização de abstrações possibilitadas pela adição de modelos na planta responsáveis por lidar com essas filas.

Este artigo está dividido como segue: na seção 2 é apresentada a modelagem de filas que não possuem distinção de tipo de peças e também a modelagem de filas que possuem diferentes tipos de peça. Na seção 3 um sistema de triagem é modelado utilizando estas abordagens e os resultados são comparados com trabalhos anteriores. Por fim, na seção 4, é feita uma conclusão sobre os resultados obtidos e futuros trabalhos.

2 MODELAGEM DE ESPECIFICAÇÕES PARA FILAS

Tem-se como objetivo nesta seção apresentar um método alternativo para reduzir o tamanho do supervisor causado por dois tipos de filas normalmente presentes em plantas industriais, aquelas onde apenas a quantidade de peças presentes é importante e aquelas onde a sequência em que as peças entraram também é importante. Para isso, dois sistemas serão apresentados para exemplificar o funcionamento destas filas, e a abordagem tradicional e a proposta serão utilizadas para a

obtenção de supervisores para que os resultados possam ser comparados.

2.1 Modelagem de especificações para filas sem distinção de peças

Considere o problema da Pequena Fábrica apresentada em (Cury, 2001), com o seu armazém ampliado para que caibam quatro peças. A Fig. 1 é uma representação do sistema e a Fig. 2 é a especificação para não *overflow* e *underflow* do armazém.

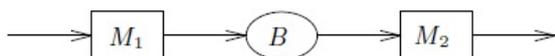


Figura 1: Pequena fábrica

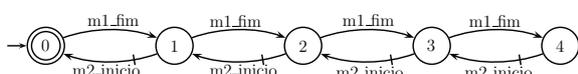


Figura 2: Especificação de não overflow/underflow

Nessa especificação é possível observar três situações distintas sobre quais máquinas podem operar. No estado 0, que representa o armazém vazio, a M2 está proibida, nos estados 1 a 3, que indicam armazém com peça, ambas as máquinas podem operar, e no estado 4, referente ao armazém cheio, a M1 está proibida.

Propõe-se então reduzir este modelo por intermédio da agregação dos estados 1 a 3 através da adição de um modelo na planta que informe a situação do armazém em função da operação das máquinas. A Fig. 3 mostra o modelo da planta a ser adicionado e a nova especificação para o sistema.

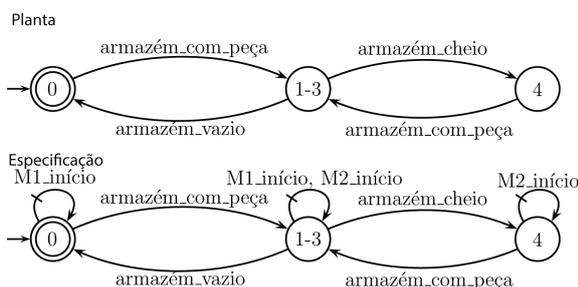


Figura 3: Modelo da Planta e Especificação de não overflow/underflow modificada

Os eventos *armazém_cheio*, *armazém_vazio* e *armazém_com_peça* devem ser gerados por um trecho de código adicional no controlador da planta, que ficará responsável por contar as peças entrando e saindo no armazém e com esta informação, gerar os eventos.

O supervisor monolítico (Ramadge and Wonham, 1989) para a abordagem tradicional possui 18 estados e 32 transições, já o da abordagem proposta possui 12 estados e 36 transições, mas necessita da adição do trecho de código. Apesar disso, ao se aumentar a capacidade do armazém, o supervisor da abordagem tradicional aumenta de tamanho, o que não ocorre na abordagem proposta. A partir da capacidade 5 tanto o número de transições quanto o de estados da abordagem tradicional são maiores dos que da proposta, e este é portanto o ponto onde esta nova abordagem se torna vantajosa para este sistema.

Para um sistema onde há mais máquinas compartilhando o armazém, a solução é semelhante, utilizando-se um modelo da planta que diz quais máquinas podem operar em dada situação. Se uma segunda máquina que produz uma peça for adicionada na entrada do armazém, por exemplo, não seria necessário adicionar estados, mas caso esta máquina produza duas peças por operação, as condições para operação das duas máquinas na entrada são diferentes e portanto, são necessários estados extras.

A grande vantagem dessa abordagem é que os supervisores da planta não aumentam com o tamanho da fila e apesar de ser necessário adicionar no controlador um trecho de código responsável por monitorar as peças entrando e saindo do armazém e gerando os eventos presentes no modelo da planta, o uso de memória por este código não apresenta crescimento exponencial como ocorre com os supervisores, podendo ser, até certo ponto, inexistente.

2.2 Modelagem de especificações para filas com distinção de peças

A modelagem de sistemas onde é necessário ter a informação sobre o tipo de item na fila, e não apenas a quantidade, como sistemas *FIFO*, pode ser simplificada através da adição de um modelo na planta que possua eventos indicando o tipo de peça na hora de sua utilização. Considere o sistema de transporte mostrado na figura 4, a máquina 1 (M1) e a máquina 2 (M2) produzem as Peça_M1 e Peça_M2, respectivamente. Quando as máquinas terminam de operar, o robô 1 (R1) deve pegar essas peças e colocá-las na esteira, quando a peça for detectada pelo sensor, o robô 2 (R2) deve guardar a peça no armazém 1, caso seja uma Peça_M1 ou no armazém 2, para a Peça_M2. A Fig. 5 apresenta a especificação de controle normalmente utilizada nesta situação, os nomes dos eventos seguem a lógica origem_destino do transporte do robô. Limitou-se o tamanho do sistema para apenas dois itens na esteira.

Pode-se substituir essa especificação adicionando-se um modelo que informe o tipo de peça no final da esteira quando esta é

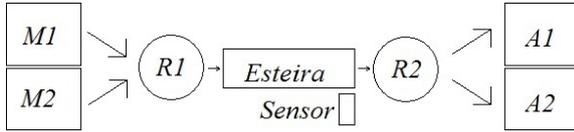


Figura 4: Sistema com transporte de peças diferentes

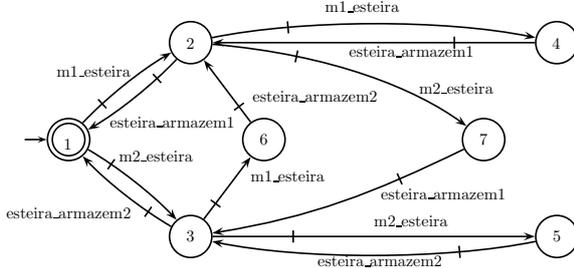


Figura 5: Especificação de transporte do robô 2 pela origem da peça

detectada pelo sensor. Para isto, utilizam-se os modelos de planta e especificação da Fig. 6.

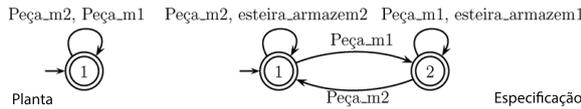


Figura 6: Modelo da Planta e Especificação de operação do robô modificada

Um ponto interessante sobre o modelo adicionado a planta é que este possui comportamento idêntico ao de um sensor que identifica o tipo de peça quanto esta chega no final da esteira e por isso este modelo recebeu o nome de Sensor Virtual.

O supervisor calculado para este sistema tem 202 estados e 627 transições para a abordagem típica, e 48 estados e 220 transições para a abordagem com abstrações. Nota-se que apesar de ser necessário adicionar no controlador um trecho de código que armazene a sequência com que as peças entraram e resgate essa informação quando o sensor for ativado, este trecho de código não possui crescimento exponencial com o tamanho da fila, enquanto na abordagem tradicional a especificação de controle já possui crescimento exponencial mesmo antes da composição síncrona.

Na próxima seção a abordagem proposta é utilizada em um sistema mais complexo, que possui maior similaridade com o que é encontrado na indústria.

3 SISTEMA DE TRIAGEM

Sistemas de triagem são projetados para identificar e classificar objetos e enviá-los para o local correto. Este tipo de sistema pode ter um grande

número de filas onde os objetos são temporariamente armazenados esperando pela classificação, e estas podem apresentar a característica *FIFO*.

A planta de triagem apresentada aqui, junto com outras quatro, faz parte do ITS PLC (de Magalhães, 2012), um pacote de software desenvolvido pela Real Games Lda. que simula instalações industriais a serem controladas por Controladores Lógicos Programáveis (CLPs).

Este sistema foi abordado em (de Aguiar et al., 2012), onde Grafsets foram utilizados para fazer simplificações na planta, como na operação da mesa rotatória descrita a seguir, e então utilizar a TCS na planta simplificada, porém os supervisores continuaram grandes, dificultando o seu uso. Optou-se por utilizar a mesma nomenclatura para os elementos do sistema apresentada no trabalho de (de Aguiar et al., 2012). Já em (Silva, 2013), foram utilizadas Redes de Petri Interpretadas (RPI) para obter uma lógica de controle para este sistema.

O ambiente de simulação do sistema de triagem é composto de cinco esteiras, dez sensores, uma mesa rotatória e dois elevadores automáticos. A Fig. 7 (de Aguiar et al., 2012) mostra o sistema e seus elementos, enquanto a tabela 1 mostra o efeito de cada atuador e o que cada sensor detecta.

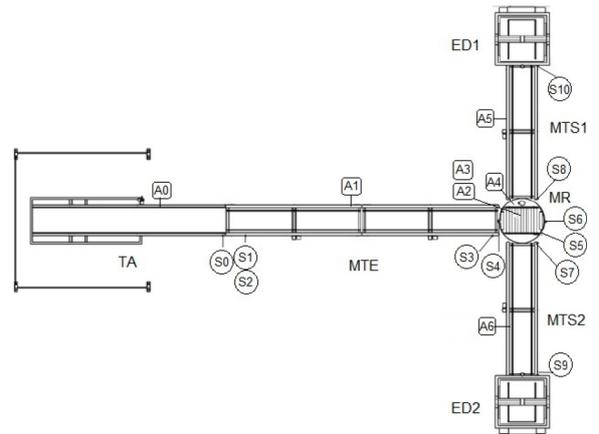


Figura 7: Sistema de Triagem, seus sensores e atuadores

A operação da planta segue a sequência: o Tapete Alimentador (TA) fornece dois tipos de caixas, de alturas $H1$ e $H2$, para a Mesa Transportadora de Entrada (MTE), que leva as caixas até a Mesa Rotatória (MR). A MR contém a Esteira da Mesa Rotatória (EMR), que é bidirecional. Quando uma caixa entra na MR, a MR deve se alinhar com as Mesas Transportadoras de Saída (MTS1 e MTS2), a EMR deve ligar colocando a caixa na MTS correta, que deve então ser ligada, levando a caixa aos elevadores automáticos ED1 ou ED2.

Tem-se como objetivo utilizar a abordagem apresentada neste trabalho para simplificar a característica *FIFO* do sistema, causada pela iden-

Tabela 1: Descrição dos sensores e atuadores

Item	Função
A0	liga/desliga o TA
A1	liga/desliga a MTE
A2	liga/desliga EMR direção MTE-EMR ou EMR-MTS1
A3	liga/desliga EMR direção EMR-MTS2
A4	Alinha a MR com MTE ou MTS1 e MTS2
A5	liga/desliga a MTS1
A6	liga/desliga a MTS2
S0	Caixas no fim do TA
S1	Caixas grandes e pequenas
S2	Caixas pequenas apenas
S3	Caixas no fim da MTE
S4	MR alinhada com MTE
S5	MR alinhada com MTS1 e MTS2
S6	Presença de caixas na MR
S7	Caixas saindo da MR para a MTS2
S8	Caixas saindo da MR pra a MTS1
S9	Caixas no fim de MTS2
S10	Caixas no fim de MTS1

tificação de peças no início de MTE e tomada de decisão apenas após o giro da MR, não sendo utilizadas outras abstrações na planta, de forma que a maior parte do controle do sistema seja feita pelo supervisor.

3.1 Características de operação desejadas

Analisando-se o funcionamento do sistema de triagem definiu-se, com o objetivo de obter a maior eficiência possível no transporte de caixas, as seguintes características:

Sempre que possível o TA deve estar ligado, para alimentar o sistema com caixas.

A MTE, as MTS e a EMR só devem estar ligadas quando houver caixas para transportar, evitando gastos de energia desnecessários.

A MR deve estar alinhada com a MTE quando não estiver transportando caixas, evitando que na chegada de uma caixa seja necessário esperar o giro.

3.2 Modelos da Planta

Cada elemento da planta foi modelado com um autômato de estado finitos representando seu comportamento individual. A Fig. 8 mostra o modelo para as duas primeiras esteiras, TA (modelo G1) e MTE (modelo G2). Nota-se que para TA, optou-se por marcar o estado esteira ligada, os eventos X_liga e $X_desliga$ representam os comandos de ligar e desligar a esteira X, usados também para MTS1 e MTS2.

O modelo G3 na Fig. 9 representa o sensor S0, e G4 é o modelo do sensor S3, tanto S1 quanto

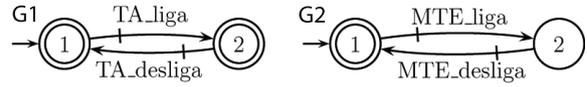


Figura 8: Modelos do TA e da MTE

S2 são abstraídos por um sensor virtual, e não possuem modelos na planta. O evento S_i_ativa é equivalente a uma borda de subida no sensor i, enquanto o evento $S_i_desativa$ é referente a borda de descida. Esta nomenclatura é usada para todos os sensores da planta.

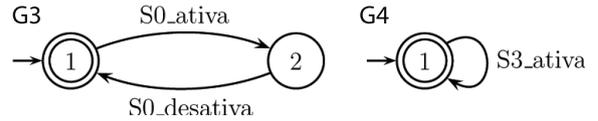


Figura 9: Modelos G3 para o sensor S0 e G4 para o sensor S3

A Fig. 10 apresenta o modelo G5, que inclui a MR, a EMR, o sensor de presença de caixas dentro da MR, S6, os sensores de alinhamento da MR com MTE (sensor S4) e as MTS (sensor S5) e os sensores de saída S7 e S8 em um único modelo. Optou-se por modelar todos estes componentes juntos devido à interação entre eles. O evento MR-Saída é o comando para que a MR gire 90° e alinhe com as MTS, e o comando MR-entrada é o retorno para o alinhamento com MTE. Para a EMR, os eventos de liga/desliga esteira possuem também um sentido associado, S1 para carga de MR quando ela está alinhada com MTE e descarga em MTS1 quando ela esta alinhada com as MTS, e S2 para descarga em MTS2.

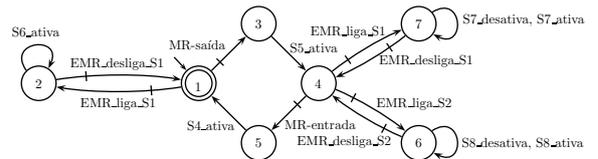


Figura 10: Modelo G5 da MR e componentes relacionados

O autômato G6 da Fig. 11 foi adicionado a planta para simplificar a necessidade de contar o número de peças na MTE. Os dois eventos, que seriam gerados por um trecho de código no controlador, ocorrem quando a primeira caixa entra na MTE ($MTE_não_vazia$), e quando a última caixa presente em MTE entra na MR (MTE_vazia). Nota-se que não há a necessidade de um estado que represente a esteira cheia como ocorre no exemplo da Pequena Fábrica, pois o *overflow* desta ocorre de forma diferente.

O modelo G7 da Fig. 11 é um sensor virtual, que representa um trecho de código que salva a sequência com que as caixas entraram em uma pi-

lha e gera um evento indicando a altura da caixa quando esta é detectada pelo sensor S6. De acordo com este evento, uma especificação de controle toma a decisão sobre qual direção ligar a EMR para descarregar a caixa nas MTS.

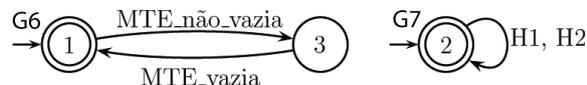


Figura 11: Modelos G6 e G7, abstrações da fila em MTE

Os autômatos G8 e G9 na Fig. 12 representam MTS1 e MTS2 e seus sensores S10 e S9 respectivamente, só há interesse na borda de descida destes sensores, que ocorre quando a caixa sai da esteira e entra no elevador.

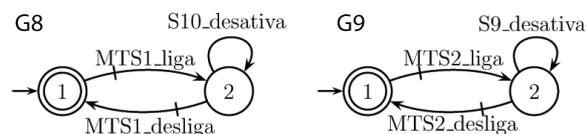


Figura 12: G8 e G9, modelos para as mesas transportadoras de saída

Como nesta planta não é possível ter mais que uma caixa nas MTS, devido a velocidade da MR, não é necessário modelar filas para estas. Caso a mesa rotatória fosse mais rápida, ou as esteiras mais longas, o modelo de abstração proposto para a MTE (modelo G6) poderia ser usado.

3.3 Modelos das especificações

Um total de seis especificações foram projetadas para atender ao método de operação previamente definido para a planta. A primeira delas, E1 na Fig. 13 define que o TA deve ser desligado apenas quando a MTE está desligada e o sensor S0 está ativo.

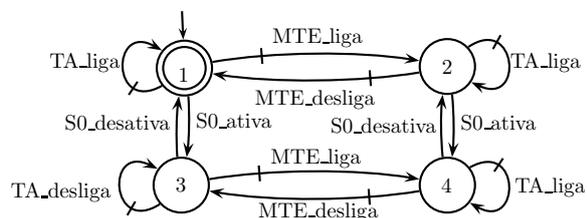


Figura 13: Modelo da especificação E1

A especificação E2 na Fig. 14 foi projetada para ligar a MTE apenas quando há uma caixa a ser levada à MR e a desligá-la quando não há mais caixas para transportar. Além disso, quando uma caixa é detectada no final da MTE pelo sensor S3, que não pode entrar na MR, a MTE deverá parar até que a caixa possa entrar.

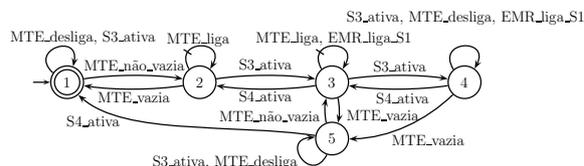


Figura 14: Modelo da especificação E2

A especificação E3 na Fig. 15 é projetada para controlar os procedimentos quando uma caixa entra na MR. Primeiramente a EMR precisa estar ligada, e quando a caixa é detectada pelo sensor S6, é hora de parar a EMR, girar 90°, ligar a EMR na direção correta (que é resultado da especificação E4), e quando a caixa sair de MR, a EMR deve desligar novamente e a MR deve girar de volta para alinhamento com a MTE.

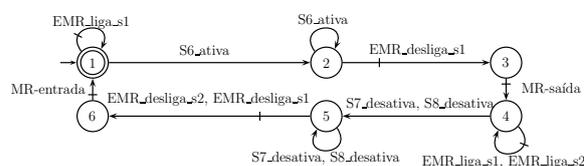


Figura 15: Modelo da especificação E3

Na Fig. 16 a especificação E4 diz que se a MR esta alinhada com a MTE, a EMR pode ser ligada no sentido carregamento de caixas, mas quando a MR está alinhada com as esteiras de saída, a EMR deve ligar de acordo com o evento tipo de caixa, H1 ou H2, explicado anteriormente.

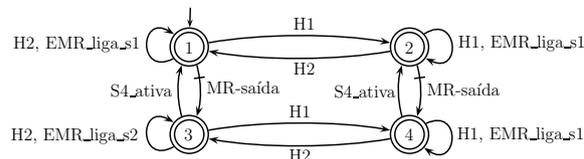


Figura 16: Modelo da especificação E4

As especificações E5 e E6 na Fig. 17 permitem que as esteiras de saída liguem quando uma caixa está saindo da MR para ela, e fazem com que elas desliguem quando a caixa sair.

3.4 Supervisor calculado

A modelagem e a síntese do supervisor foi feita com auxílio do softwares IDES (Rudie, 2006). Tanto a abordagem monolítica quanto a modular local (de Queiroz, 2000) foram utilizadas. A abordagem monolítica resultou em um supervisor com 9728 estados e 92032 transições.

Para a abordagem modular local, um supervisor foi calculado para cada especificação. A tabela 2 mostra os supervisores locais, a especificação e a planta local correspondente, junto com o número de estados e transições resultantes do cálculo.

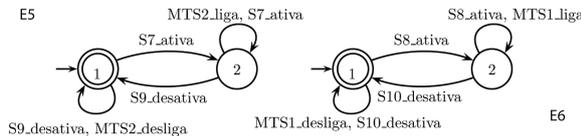


Figura 17: Especificações E5 e E6

Tabela 2: Supervisor Calculado

S	Glocal	E	Est.	Trans.
S1	$G1 G2 G3$	E1	8	20
S2	$G3 G4 G5 G6$	E2	58	255
S3	$G5$	E3	12	20
S3	$G5 G7$	E4	14	56
S5	$G5 G9$	E5	28	88
S6	$G5 G8$	E6	28	88

O teste de modularidade (de Queiroz, 2000) foi feito através da composição síncrona de todos os supervisores locais, resultando em um autômato trim com 9728 estados e 92032 transições, mostrando que os supervisores locais não são conflitantes.

3.5 Comparação com trabalhos anteriores

Em (de Aguiar et al., 2012), 5 supervisores locais foram calculados, com 8686, 2555, 192, 10 e 6132 estados. O supervisor monolítico não pode ser calculado devido a sua complexidade e Op-Abstrações (Pena et al., 2008) foram usadas para verificar a existência de conflito entre os supervisores. Além disso, na implementação do supervisor, é necessário adicionar os grafocets que permitiram as abstrações na planta. Percebe-se então que a proposta deste trabalho possui vantagens em relação ao tamanho dos supervisores.

Já na abordagem de (Silva, 2013), devido ao uso de Redes de Petri Interpretadas e a simplificação para que apenas duas caixas possam entrar na MTE, não é possível fazer uma comparação entre o tamanho das lógicas de controle. Porém, aumentar o tamanho da fila é não uma tarefa simples nesta abordagem, enquanto o supervisor calculado aqui não possui limites quanto ao tamanho desta fila, sendo que o limite está nos trechos de códigos referentes aos modelos G6 e G7, que são fáceis de serem modificadas para tamanhos maiores.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentadas as vantagens de trabalhar com filas adicionando elementos na planta responsáveis pela monitoração destas. As vantagens e desvantagens desta abordagem foram comparadas com outras, mostrando que esta pode ajudar na aceitação da TCS na indústria, pois ela possui as vantagens do uso de uma abordagem for-

mal para a síntese de um controlador, sem elevar excessivamente o tamanho do código e, como consequência, custos.

Trabalhos futuros envolvem a implementação desses supervisores em um CLP ou microcontrolador utilizando geração automática de código e realizar testes na planta virtual do software ITS PLC para terminar a validação do método proposto. Outro trabalho futuro é a utilização desta abordagem para implementar o controlador para uma célula flexível de manufatura na Universidade do Estado de Santa Catarina, que possui, entre outras características, um armazém com capacidade de até 72 peças.

Referências

- Cury, J. E. R. (2001). Teoria de controle supervi-sório de sistemas a eventos discretos, *V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*.
- de Aguiar, R. S. S., da Cunha, A. E. C. and Val-lim, M. B. R. (2012). Síntese de controle supervi-sório modular local para um sistema de triagem, *Congresso Brasileiro de Automática* pp. 2842–2849.
- de Magalhães, A. P. (2012). *Práticas de Automação Industrial*, 2nd edn, Real Games Ltda.
- de Queiroz, M. H. (2000). *Controle modular de sistemas de grande porte*, Dissertação de mes-trado, Universidade Federal de Santa Cata-rina, Departamento de Engenharia Elétrica.
- Hellgren, A. (2005). On the execution of se-quential function charts, *Control Engineering Practice* **13**: 1283–1293.
- Pena, P. N., da Cunha, A. E. C., Cury, J. E. R. and Lafortune, S. (2008). Teste de não-conflito de supervisores modulares locais usando o op-verificador, *Congresso Brasileiro de Automática*.
- Ramadge, P. J. G. and Wonham, W. M. (1989). The control of discrete event systems, *Proceedings of the IEEE* **77**: 81–198.
- Rudie, K. (2006). The integrated event sys-tems tool, *Proceedings of the 8th International Workshop on Discrete Event Systems* pp. 394–395.
- Silva, H. V. D. (2013). *Metodologia de projeto de automação industrial visando a conversão automática de redes de petri interpretadas em códigos implementáveis*, Dissertação de mes-trado, Universidade Tecnológica do Paraná.