

APLICAÇÃO DA TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO NO DESENVOLVIMENTO DE CONTROLES ELETRÔNICOS PARA REFRIGERAÇÃO

CARLOS A. TEIXEIRA⁽¹⁾, ANDRÉ B. LEAL^{(2)*}, BRUNA P. DA S. ZANICOSKI⁽²⁾⁺

⁽¹⁾Setor de Pesquisa & Desenvolvimento - Embraco Electronic Controls - EECON
Dona Francisca, 8300, Módulo 1 / Bloco B, 89239-270, Joinville, SC, Brasil

⁽²⁾Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC
Campus Universitário Prof. Avelino Marcante s/n, Bom Retiro, 89223-100, Joinville, SC, Brasil

E-mails: carlos_a_teixeira@embraco.com.br, leal@joinville.udesc.br

Abstract— This article presents an application of the supervisory control theory in the development of control logics for refrigerators. A structure containing a Peltier Tiny-Refrigerator controlled by an electronic board was developed, aiming to create and validate different control strategies. The local modular control method is applied in the supervisor synthesis, skirting computational restrictions found in the monolithic approach.

Keywords— Discrete-event systems, supervisory control, local modular, Peltier effect, embedded systems.

Resumo— Este artigo apresenta uma aplicação da teoria de controle supervisório no desenvolvimento de lógicas de controle para refrigeradores. Uma estrutura contendo um Mini-Refrigerador Peltier controlado por uma placa eletrônica foi desenvolvida, visando criar e validar diferentes estratégias de controle. A técnica de controle modular local é utilizada na síntese dos supervisores, contornando dificuldades computacionais encontradas na abordagem monolítica.

Palavras-chave— Sistemas a eventos discretos, controle supervisório, modular local, efeito Peltier, sistemas embarcados.

1 Introdução

Organização do raciocínio devido à existência de um processo visual, maior depuração de erros na fase de concepção, capacidade de verificação e análise de desempenho e possibilidade de geração automática de código são benefícios já conhecidos do uso de técnicas de modelagem na criação de *software*.

Somada a essas características, a aplicação da teoria de controle supervisório (Wonham, 2005), por meio de ferramentas para cálculo automático de supervisores a partir de modelos pequenos da planta e das especificações de controle, permite tratar problemas complexos como um conjunto de problemas menores, mostrando-se assim como uma técnica promissora nesse campo de atuação.

Este artigo apresenta uma aplicação da teoria de controle supervisório no desenvolvimento de lógicas de controle para Refrigeradores. É utilizada uma estrutura contendo um Mini-Refrigerador Peltier controlado por uma placa eletrônica.

Devido à impossibilidade de cálculo do autômato que modela o comportamento global da planta livre por meio das ferramentas computacionais disponíveis, optou-se pelo uso da técnica de controle modular local (de Queiroz e Cury, 2002), sendo obtidos 4 supervisores que em conjunto resultam no mesmo desempenho de um supervisor monolítico.

O artigo está organizado como segue. A seção 2 ilustra o problema em estudo. A seção 3 apresenta a modelagem da planta. A seção 4 mostra a síntese dos supervisores. Por fim, apresentam-se as conclusões.

2 Apresentação do Problema

Visando criar e validar diferentes estratégias de controle, foi desenvolvido um dispositivo intitulado Mini-Refrigerador, que visa reproduzir o comportamento dinâmico de um refrigerador residencial ou comercial (ver Figura 1).

Esse dispositivo possui 2 compartimentos para os quais pode-se implementar diferentes estratégias de controle. A temperatura pode ser regulada em 3 níveis n_1 , n_2 e n_3 situados na faixa [8, 12] °C para o compartimento A e [14, 18] °C para o compartimento B. Um diagrama da estrutura física é ilustrado na Figura 2.

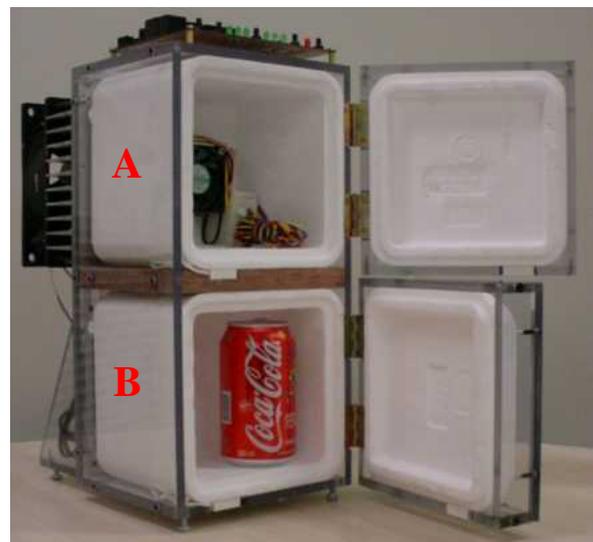


Figura 1. Foto do Mini-Refrigerador.

* Tutor e + bolsista do Grupo PET Engenharia Elétrica da UDESC.

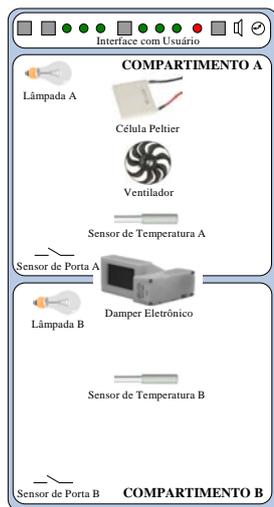


Figura 2. Estrutura do Mini-Refrigerador.

Uma célula Peltier (Nolas et al, 2006) desempenha a função de transmitir o calor de dentro dos compartimentos para o ambiente externo, substituindo o compressor hermético comumente utilizado nos refrigeradores. Um damper (abertura móvel) eletrônico permite ajustar o fluxo de ar entre os compartimentos.

A circulação do ar frio presente nas proximidades de célula Peltier dentro do compartimento é forçada através de um ventilador conectado junto a essa célula. Dois sensores de temperatura do tipo cápsula NTC monitoram a temperatura nos compartimentos A e B.

A iluminação interna dos compartimentos é feita por meio de lâmpadas e o estado das portas (aberta ou fechada) é monitorado através de sensores magnéticos.

Uma interface localizada na parte superior da estrutura possui teclas que permitem ao usuário ligar e desligar o sistema, ajustar o nível de temperatura dos compartimentos e desligar um alarme sonoro. Essa interface contém leds que possibilitam visualizar o nível de temperatura atualmente ajustado para cada compartimento e o estado das portas.

Na estratégia de controle aqui apresentada:

- a temperatura no compartimento A é regulada de acordo com o nível de temperatura selecionado pelo usuário e a temperatura medida pelo sensor A. É utilizada estratégia do tipo liga-desliga, tendo a célula Peltier como elemento de atuação.
- no compartimento B o controle é feito em função do nível de temperatura escolhido pelo usuário e a temperatura medida pelo sensor B. O ajuste é feito por meio da abertura e fechamento do damper eletrônico.
- se uma ou ambas as portas estiverem abertas, um led de indicação é aceso e um contador é ini-

ciado. Se esse contador alcançar um determinado valor t , um alarme de porta aberta é disparado. Esse alarme é desativado através de uma tecla de desligamento ou pelo fechamento de ambas as portas. Caso o alarme sonoro seja desativado através da tecla, ele não retornará a soar mesmo que as portas sejam mantidas abertas.

Outras estratégias de controle podem ser criadas utilizando a presente estrutura do Mini-Refrigerador.

Um controlador eletrônico (ver Figura 3), baseado no microcontrolador MICROCHIP PIC16F690 (Microchip Technology Inc., 2007), foi concebido visando implementar os supervisores obtidos por meio da teoria de controle supervisiório.

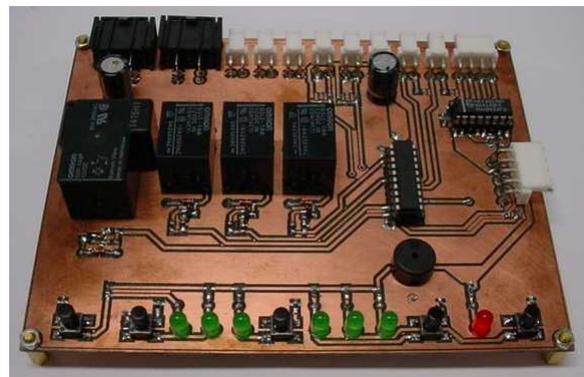


Figura 3. Foto do Controlador Eletrônico.

Este controlador possui entradas para os sensores de temperatura dos compartimentos A e B e sensores das portas A e B, e dispõe de saídas para o acionamento da célula Peltier, damper eletrônico, ventilador e lâmpadas A e B.

A interface com o usuário possui teclas de liga/desliga, ajuste da temperatura desejada para os compartimentos A e B e desligamento do alarme sonoro de porta aberta. Esta interface contém leds indicativos do nível de temperatura ajustado pelo usuário para os compartimentos A e B e led indicativo do estado das portas A e B (um único led para ambas as portas). Montado sobre a placa há uma buzina utilizada como alarme de porta aberta.

3 Modelagem da Planta

A planta G é composta por 23 subplantas G_i 's, que descrevem o comportamento livre dos elementos do Mini-Refrigerador. Foram identificados 46 eventos, sendo 34 controláveis e 12 não-controláveis.

3.1 Descrição dos Eventos

Os eventos controláveis são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Conjunto de Eventos Controláveis.

Evento	Descrição
a_1	selecionar nível n_1 para o compartimento A
b_1	selecionar nível n_2 para o compartimento A
c_1	selecionar nível n_3 para o compartimento A
a_2	selecionar nível n_1 para o compartimento B
b_2	selecionar nível n_2 para o compartimento B
c_2	selecionar nível n_3 para o compartimento B
a_3 / b_3	ligar / desligar célula Peltier
a_4 / b_4	abrir / fechar o damper eletrônico
a_5 / b_5	ligar / desligar ventilador
a_6 / b_6	ligar / desligar buzina
a_7 / b_7	ligar / desligar lâmpada A
a_8 / b_8	ligar / desligar lâmpada B
a_9 / b_9	ligar / desligar led de nível baixo comp. A
a_{10} / b_{10}	ligar / desligar led de nível médio comp. A
a_{11} / b_{11}	ligar / desligar led de nível alto comp. A
a_{12} / b_{12}	ligar / desligar led de nível baixo comp. B
a_{13} / b_{13}	ligar / desligar led de nível médio comp. B
a_{14} / b_{14}	ligar / desligar led de nível alto comp. B
a_{15} / b_{15}	ligar / desligar led de porta aberta
a_{16} / b_{16}	iniciar contagem / zerar contador de tempo de porta aberta

A Tabela 2 descreve os eventos não-controláveis.

Tabela 2. Conjunto de Eventos Não-Controláveis.

Evento	Descrição
d_1	temperatura no compartimento A torna-se maior que a constante Cut_In_A
e_1	temperatura no compartimento A torna-se menor que a constante Cut_Out_A
d_2	temperatura no compartimento B torna-se maior que a constante Cut_In_B
e_2	temperatura no compartimento B torna-se menor que a constante Cut_Out_B
d_3 / e_3	porta A foi aberta / porta A foi fechada
d_4 / e_4	porta B foi aberta / porta B foi fechada
f_1	contador de tempo de porta aberta alcançou seu valor máximo
f_2	tecla de ajuste do nível de temperatura do compartimento A foi pressionada
f_3	tecla de ajuste do nível de temperatura do compartimento B foi pressionada
f_4	tecla de desligamento do alarme sonoro de porta aberta foi pressionada

3.2 Modelagem dos Elementos da Planta

As seqüências de ajuste do nível de temperatura para os compartimentos A e B são modeladas pelos autômatos G_1 e G_2 , mostrados na Figura 4.

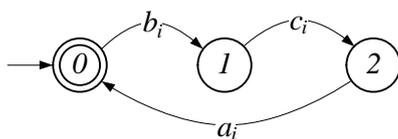


Figura 4. Autômatos G_i , $i = 1, 2$.

O damper eletrônico e a célula Peltier são modelados pelos autômatos G_3 e G_4 , o ventilador é modelado pelo autômato G_5 , a buzina pelo autômato G_6 , a lâmpada A pelo autômato G_7 e a lâmpada B pelo autômato G_8 .

Os leds indicadores de nível baixo, médio e alto para o compartimento A são modelados pelos autô-

matos G_9 , G_{10} e G_{11} e os leds indicadores de nível baixo, médio e alto para o compartimento B são modelados pelos autômatos G_{12} , G_{13} e G_{14} . O modelo do led indicador de porta aberta é definido pelo autômato G_{15} . Os autômatos G_3 - G_{15} são apresentados na Figura 5.

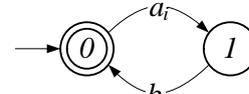


Figura 5. Autômatos G_i , $i = 3, 4, \dots, 15$.

O comportamento do contador de porta aberta é modelado pelo autômato G_{16} , ilustrado na Figura 6.

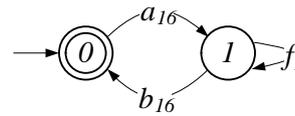


Figura 6. Autômato G_{16} .

Os sensores de temperatura dos compartimentos A e B são modelados pelos autômatos G_{17} e G_{18} e os modelos dos sensores de porta A e B são definidos pelos autômatos G_{19} e G_{20} . A Figura 7 apresenta os autômatos G_{17} - G_{20} .

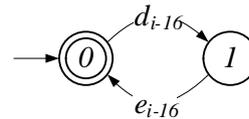


Figura 7. Autômatos G_i , $i = 17, 18, 19$ e 20 .

As teclas de ajuste do nível de temperatura dos compartimentos A e B e a tecla de desligamento do alarme sonoro de porta aberta são modeladas respectivamente pelos autômatos G_{21} , G_{22} e G_{23} , apresentados na Figura 8. Visando simplificar a solução do problema, a tecla Liga/Desliga não foi modelada, sendo tratada durante a etapa de implementação.

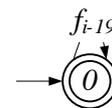


Figura 8. Autômatos G_i , $i = 21, 22$ e 23 .

O estado inicial nos autômatos G_1 a G_{23} reflete uma situação típica presente durante a energização de um sistema deste tipo. O estado inicial de cada subplanta foi marcado de forma a indicar que uma tarefa é completada quando o subsistema retorna à sua condição inicial.

3.3 Modelagem das Restrições Físicas

Através de uma análise da planta em estudo, foi possível identificar condições nas quais determinados eventos nunca irão ocorrer. Essas situações foram adicionadas ao modelo por meio da criação de restrições físicas (Moraes e Leal, 2006), visando torná-lo mais fiel ao comportamento real do sistema.

Observando a relação entre a célula Peltier e o sensor de temperatura A, foi criada a restrição física R_1 , que restringe a ocorrência do evento e_1 se a célula Peltier estiver desligada e d_1 se a célula Peltier estiver ligada.

De modo análogo, observando a relação entre o damper eletrônico e o sensor de temperatura B, foi concebida a restrição física R_2 , que restringe a ocorrência do evento e_2 se o damper eletrônico estiver fechado e d_2 se o damper eletrônico estiver aberto.

Os autômatos de tais restrições são apresentados na Figura 9.

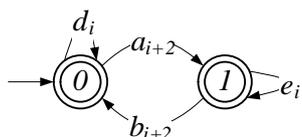


Figura 9. Autômatos das restrições físicas R_i , $i = 1$ e 2 .

4 Síntese dos Supervisores

4.1 Definição das Especificações

Foram concebidas 13 especificações buscando restringir o comportamento da planta ao comportamento desejado.

A especificação E_1 define que a célula Peltier pode ser ligada somente se a temperatura no compartimento A tornar-se maior que a constante Cut_In_A e que a célula Peltier pode ser desligada somente se a temperatura no compartimento A tornar-se menor que a constante Cut_Out_A . Por sua vez, a especificação E_2 define que o damper eletrônico pode ser aberto somente se a temperatura no compartimento B tornar-se maior que a constante Cut_In_B e tal damper pode ser fechado somente se a temperatura no compartimento B tornar-se menor que a constante Cut_Out_B . A Figura 10 apresenta os autômatos dessas especificações.

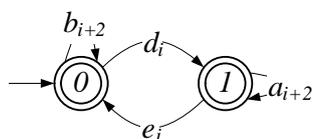


Figura 10. Autômatos das especificações E_i , $i = 1$ e 2 .

A especificação E_3 dita que a lâmpada A e o ventilador podem ser ligados somente se a porta do compartimento A for aberta, e que esses elementos podem ser desligados somente se essa porta for fechada. O autômato dessa especificação é mostrado na Figura 11.

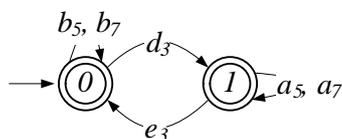


Figura 11. Autômato da especificação E_3 .

Analogamente, a especificação E_4 define que a lâmpada B pode ser ligada somente se a porta do compartimento B for aberta, e que essa lâmpada pode ser desligada somente se a respectiva porta for fechada. O autômato dessa especificação é ilustrado na Figura 12.

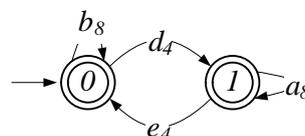


Figura 12. Autômato da especificação E_4 .

O autômato mostrado na Figura 13, modela a especificação E_5 , que define que o ventilador pode ser ligado somente se a célula Peltier estiver ligada, e que o ventilador pode ser desligado somente se a célula Peltier estiver desligada.

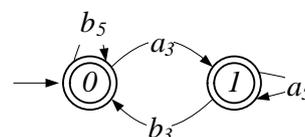


Figura 13. Autômato da especificação E_5 .

O controle do contador de tempo de porta aberta é feito em função do led de porta aberta, que reflete a condição das portas. A especificação E_6 (ver autômato da Figura 14) dita que esse contador pode ser iniciado somente se o led de porta aberta for comandado para acender (ocorrer o evento *ligar led de porta aberta*), e que tal contador pode ser zerado somente se o referido led for comandado para apagar (ocorrer o evento *desligar led de porta aberta*).

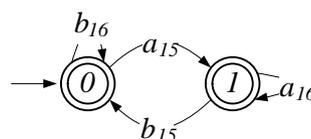


Figura 14. Autômato da especificação E_6 .

A especificação E_7 dita que a buzina pode ser ligada somente se o contador de porta aberta alcançar seu valor máximo (ver Figura 15).

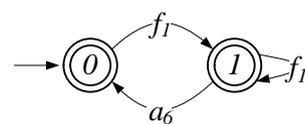


Figura 15. Autômato da especificação E_7 .

A especificação E_8 define que a buzina pode ser desligada somente se a tecla de desligamento do alarme sonoro de porta aberta for pressionada ou ambas as portas forem fechadas. O fechamento de ambas as portas é sinalizado pela ocorrência do evento *desligar led de porta aberta*. O acoplamento entre o estado das portas e o led de porta aberta é feito atra-

vés da especificação E_9 , apresentada posteriormente, na Figura 17.

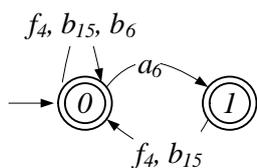


Figura 16. Autômato da especificação E_8 .

A especificação E_9 (ver autômato da Figura 17) define que o led de porta aberta pode ser ligado somente se a porta A e/ou a porta B for aberta. Tal especificação garante ainda que somente se ambas as portas forem fechadas o led de porta aberta pode ser desligado.

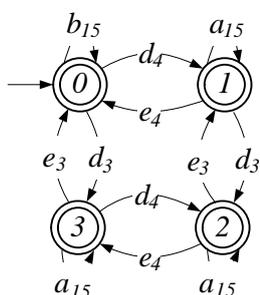


Figura 17. Autômato da especificação E_9 .

O comportamento dos leds indicadores do nível de temperatura para o compartimento A (B) de acordo com o nível de temperatura ajustado para tal compartimento é ditado pela especificação E_{10} (E_{11}), apresentada na Figura 18-a (18-b).

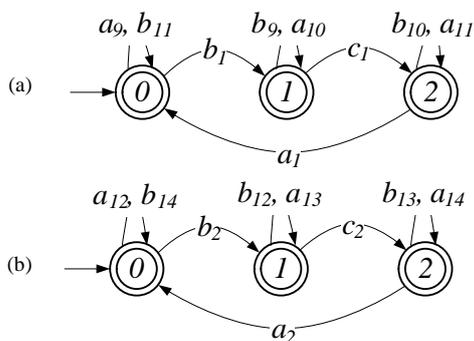


Figura 18. Autômatos das especificações E_{10} e E_{11} .

A mudança do nível de temperatura desejado para os compartimentos A e B, em decorrência do apertado da tecla de ajuste correspondente, é feita através das especificações E_{12} e E_{13} , respectivamente. Tais especificações são apresentadas na Figura 19.

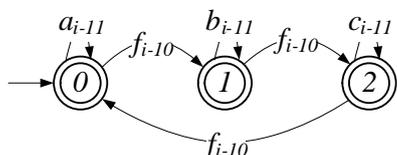


Figura 19. Autômatos das especificações E_i , $i = 12$ e 13 .

4.2 Abordagem Monolítica

Na abordagem monolítica para síntese do supervisor, é necessário obter um autômato que modele o comportamento global da planta livre. Neste problema, o autômato resultante tem 2.359.296 estados e os programas GRAIL (Reiser et al, 2006), TCT (Feng e Wonham, 2006) e UMDES (Lafortune, 2005) não conseguem efetuar o cálculo da composição síncrona. Sendo assim, foi necessário o uso de uma abordagem mais apropriada.

4.3 Abordagem Modular Local

Na abordagem modular local, ao invés de se construir um único controlador monolítico para toda a planta, obtém-se um controlador local para cada especificação (ou subconjunto de especificações), modelando esse controlador local apenas em termos das subplantas afetadas por sua ação.

Desta forma, além da modularidade das especificações, explora-se a modularidade da planta, de forma a diminuir a complexidade computacional da síntese dos supervisores.

A abordagem de controle modular é bastante vantajosa no sentido de promover maior flexibilidade, maior eficiência computacional e segurança na aplicação do controle. Entretanto, para que possa ser empregada é necessário que os supervisores resultantes sejam localmente modulares, isto é, que a ação conjunta dos supervisores tenha o mesmo desempenho que a do supervisor monolítico.

No presente problema, devido ao tamanho da planta livre, a metodologia de escolha dos supervisores modulares locais (SMLs) mostrou-se importante, por influenciar na execução (tempo de processamento e quantidade de memória utilizada) do teste de modularidade local utilizando as ferramentas computacionais existentes.

Inicialmente optou-se por utilizar 13 supervisores modulares locais SML_j (um para cada especificação E_i), com as plantas modulares locais G_j obtidas através do produto síncrono das subplantas e restrições físicas que possuem eventos de E_i . Esta tentativa foi inviabilizada em virtude de dificuldades computacionais no processo de verificação de conflito entre os supervisores utilizando as ferramentas de software (GRAIL, TCT e UMDES) e hardware (Pentium IV 2,4GHz, memória RAM 1GB 533 MHz e sistema operacional Windows XP) disponíveis.

Desta forma, partiu-se para o uso de 4 supervisores modulares locais $SML_j = \text{supC}(G_j, K_j)$, onde $K_j = G_j // E_j$, $j = A, B, C, D$, sendo $G_A = G_2 // G_{18} // R_2$, $G_B = G_3 // G_5 // G_6 // G_7 // G_8 // G_{15} // G_{16} // R_1$, $G_C = G_2 // G_{12} // G_{13} // G_{14} // G_{22}$, $G_D = G_1 // G_9 // G_{10} // G_{11} // G_{21}$, $E_A = E_2$, $E_B = E_1 // E_3 // E_4 // E_5 // E_6 // E_7 // E_8 // E_9$, $E_C = E_{11} // E_{13}$ e $E_D = E_{10} // E_{12}$, com os termos E_j escolhidos agrupando-se especificações que possuem eventos comuns entre si e os termos G_j obtidos pelo produto síncrono das subplantas e res-

trições físicas contendo eventos existentes na especificação E_j .

A utilização da metodologia de escolha dos termos E_j acima mencionada, tornou possível efetuar o teste de modularidade local com facilidade. Informações sobre o número de estados e transições dos supervisores obtidos são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Supervisores Modulares Locais.

SML	Estados	Transições
SML_A	4	4
SML_B	4	8
SML_C	72	168
SML_D	72	168

4.4 Redução dos Supervisores

Através do procedimento *Supreduce* do TCT, foram obtidos os SMLs reduzidos cujas características estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Supervisores Modulares Locais Reduzidos.

SMLR	Estados	Transições
$SMLR_A$	2	4
$SMLR_B$	2	6
$SMLR_C$	9	30
$SMLR_D$	9	30

5 Conclusão

Na presente aplicação a abordagem monolítica de síntese de supervisores mostrou-se inadequada devido a dificuldades computacionais no cálculo da planta livre utilizando as ferramentas disponíveis.

Diante disto, a alternativa utilizada foi a abordagem modular local. Nessa abordagem, a escolha das plantas locais mostrou-se importante por influenciar na execução (tempo de processamento e quantidade de memória utilizada) do teste de verificação de conflito entre os supervisores.

O procedimento de redução dos supervisores modulares locais disponibilizado pelo TCT foi bastante eficiente para o problema em estudo.

O presente trabalho encontra-se em fase de implementação e testes de performance e detalhes sobre essas etapas serão divulgados em breve.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Embraco Electronic Controls, por incentivar a realização desse trabalho.

Referências Bibliográficas

- Microchip Technology Inc. (2007). Datasheet DS41262D, www.microchip.com.
- Reiser, C., da Cunha, A. E. C., Cury, J. E. R. (2006). The Environment Grail for Supervisory Control of Discrete Event Systems, *8th International*

Workshop on Discrete Event Systems (WODES), Michigan.

Feng, L. and Wonham, W. M. (2006). TCT: A Computation Tool for Supervisory Control Synthesis, *8th International Workshop on Discrete Event Systems (WODES)*, Michigan.

Moraes, W.R. e Leal, A.B. (2006). Controle Supervisório do Transportador de Entrada de um Sistema Flexível de Manufatura. *Proceedings of the VII International Conference on Industrial Applications - Induscon*, Recife, Brasil.

Nolas, G. S., Sharp, J. and Goldsmid, J. (2006). *Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Developments*, 1st Ed, Springer, New York.

Lafortune, S. (2005). UMDES-LIB software library, www.eecs.umich.edu/umdes/toolboxes.html.

Wonham, W. M. (2005). Supervisory Control of Discrete-Event Systems, *Technical Report*, Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto. ECE 1636F/1637S 2005-06, www.control.utoronto.ca/DES.

de Queiroz, M. H. and Cury, J. E. R. (2002). Synthesis and Implementation of Local Modular Supervisory Control for a Manufacturing Cell, *6th International Workshop on Discrete Event Systems (WODES)*, v. 1, p. 377-382, Zaragoza.