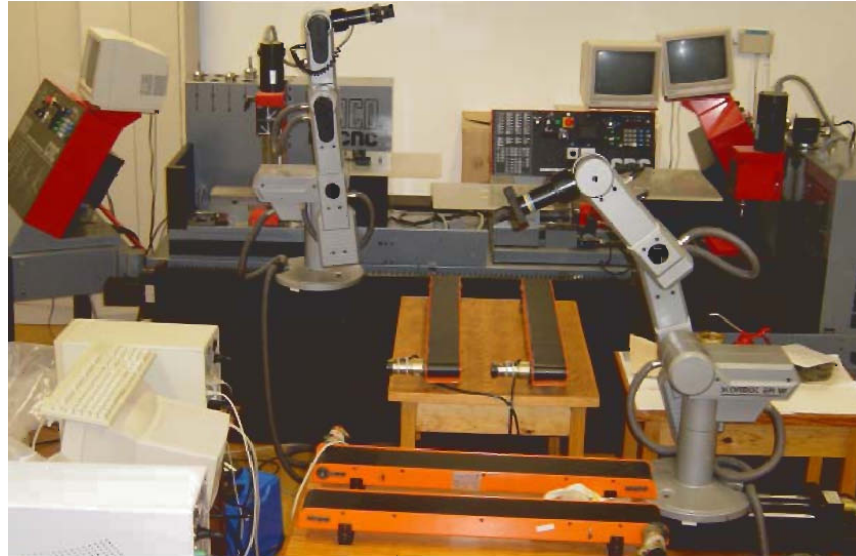




INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO



**Apresentação do TFC 15/2002/L**

**Supervisão de Sistemas de Automação**  
com aplicação a uma Célula de Fabricação Flexível

Hélder Ribeiro	46543
Ricardo Elvas	46676

**DEEC Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores**

11 de Fevereiro, 2004



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

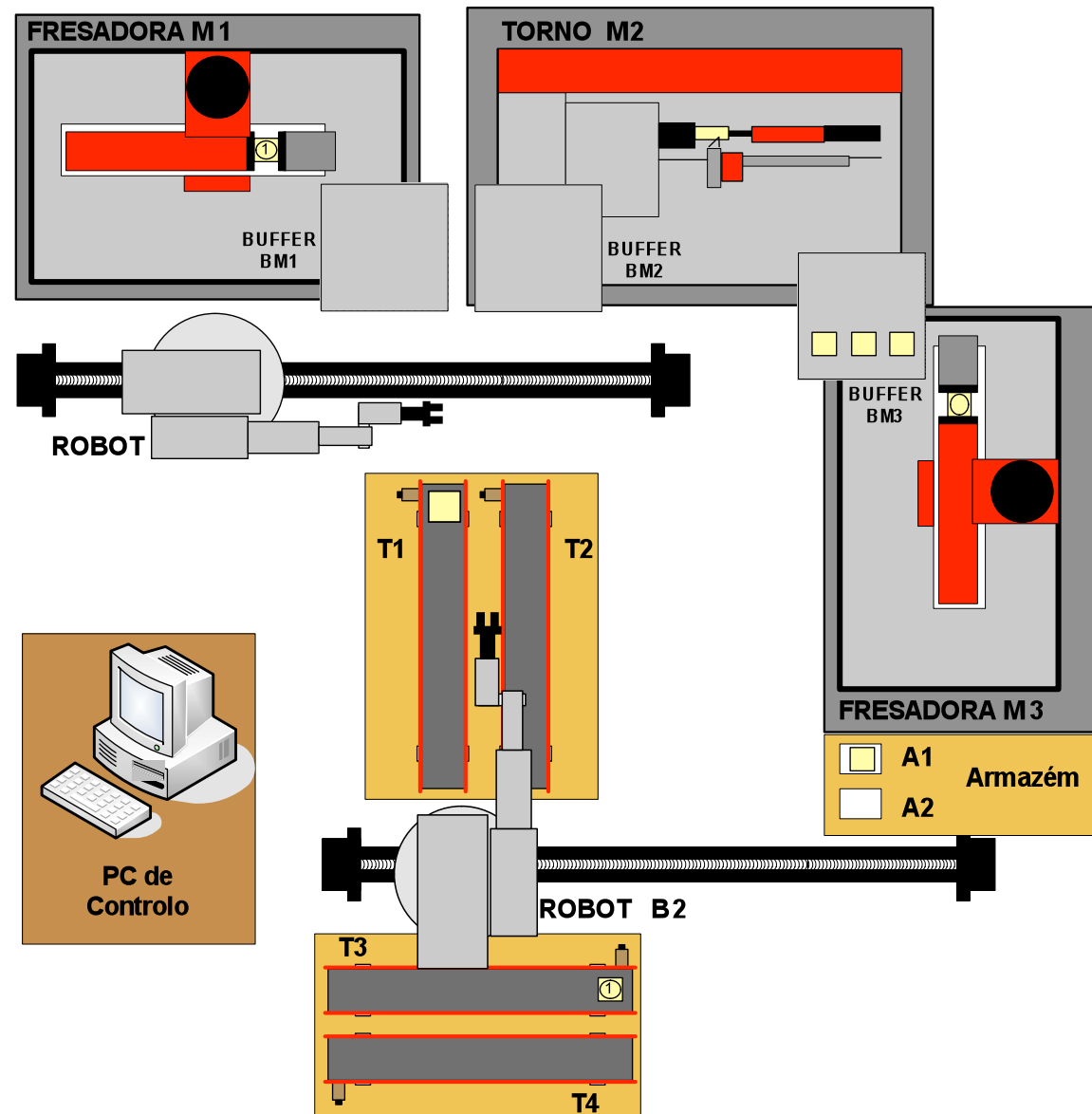
# Sumário

- A Célula de Fabricação Flexível (CFF)
- Redes de Petri
- Modelação da CFF
- Modelação das falhas
- Implementação
- Conclusões



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

# A CFF - Descrição Geral

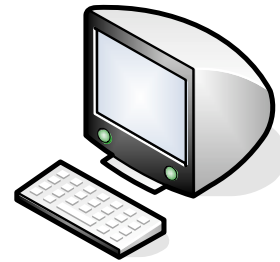


12/7/10

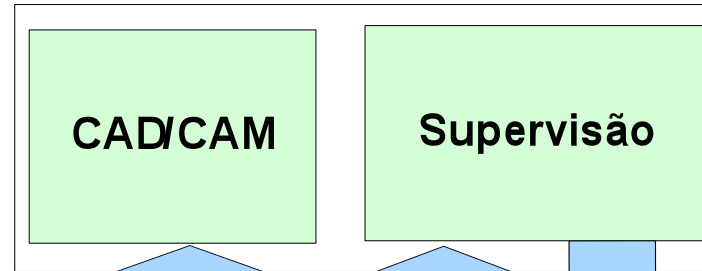


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

# A CFF - Arquitectura Proposta



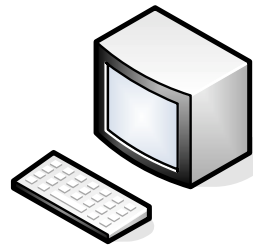
Posto Remoto de  
Supervisão e Design



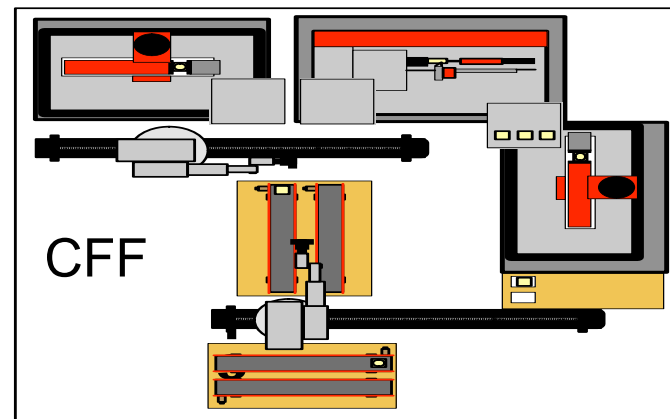
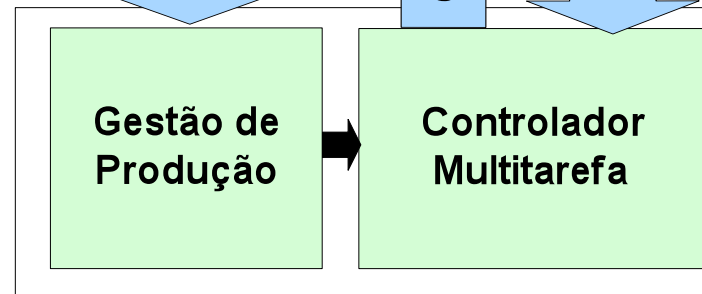
MODELS

EVENTS

AÇÕES



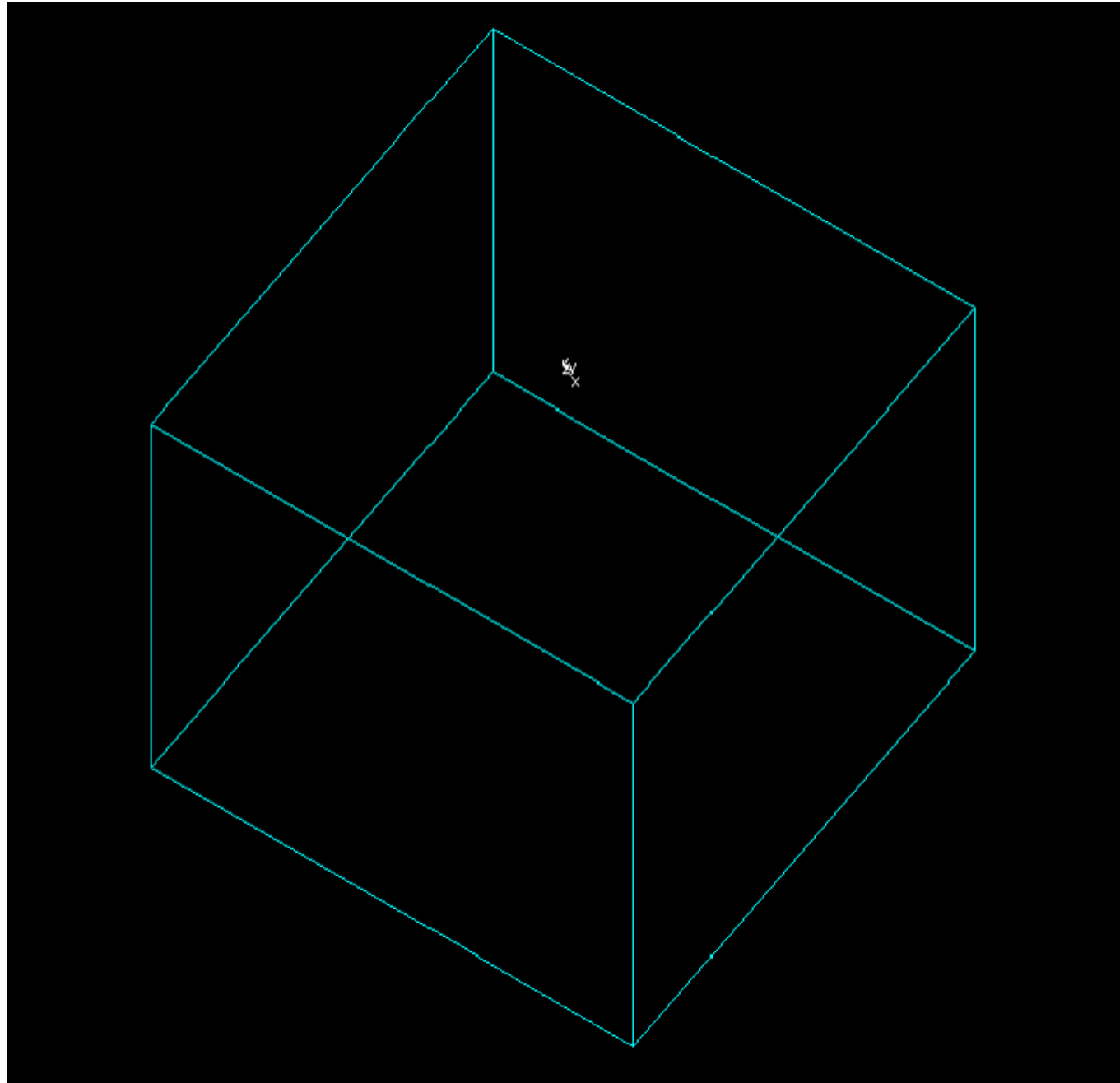
Posto de Fabrico



12/7/10



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO



12/7/10



## Redes de Petri - Definição

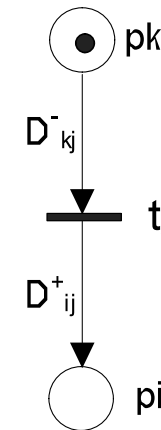
Uma Rede de Petri  $C$  é representada pelo 4-tuplo:

$$C = (P, T, D^+, D^-)$$

$P$  – conjunto finito de  $n$  lugares

$T$  – conjunto finito de  $m$  transições

$D^+ \in \mathbb{Z}_0^{+(n \times m)}$ ,  $D^- \in \mathbb{Z}_0^{+(n \times m)}$  - representam o fluxo entre  $P$  e  $T$ .



### Dinâmica de uma RdP/ Equação de Estado

$$\begin{aligned} \mu(0) &= \mu_0 \\ \mu(k+1) &= \mu(k) + Dq(k) \quad D \in \mathbb{Z}_0^{+(n \times m)}, \mu \in \mathbb{Z}_0^{+(n)}, q \in \mathbb{Z}_0^{+(m)} \end{aligned}$$

$D = D^+ - D^-$  - matriz de incidência

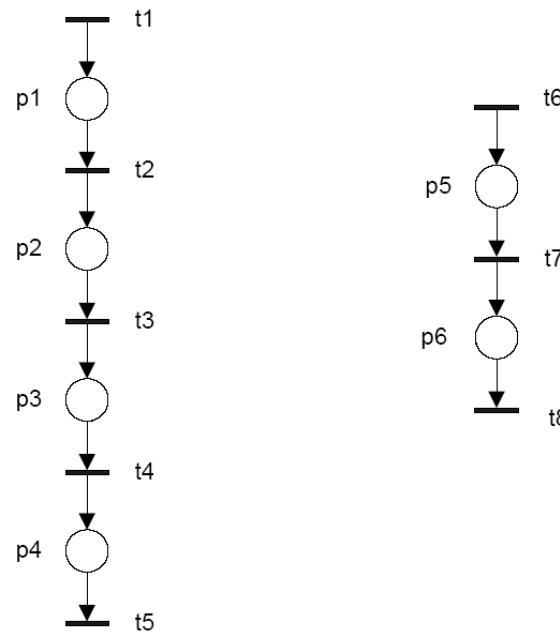
$\mu_0$  - marcação inicial

$q$  - vector de disparo



## Exemplo 1

# Redes de Petri - Controladores



Lugares	Descrição
$p_1$	Agarrando peça
$p_2$	Transporte
$p_3$	Livre
$p_4$	Largando peça
$p_5$	Avançando
$p_6$	Recuando
Transições	
$t_1$	Agarra peça
$t_2$	Vai tapete
$t_3$	Chegou tapete
$t_4$	Larga peça
$t_5$	Largou
$t_6$	Avança
$t_7$	Recua
$t_8$	Termina

**Problema:** Como impor **restrições ao comportamento da rede?**

**Solução:** Tradicional - Técnicas alternativas que não garantem, por si só, optimalidade

## **SÍNTESE DE CONTROLADORES PARA RCPs**

**baseados em invariantes de marcação.**

**Inovadora** - Resultados recentes na supervisão e controlo de SEDs



## Redes de Petri - Controladores

O objectivo de controlo é forçar a RdP a restrições do tipo:

$$L\mu_p \leq b \text{ - Restrição Linear de marcação}$$

Introduzindo uma variável auxiliar, obtém-se a seguinte equação:

$$L\mu_p + \mu_c = b$$

Pela definição de invariante de marcação, obtém-se:

$$X^T = [LI] \begin{bmatrix} D_p \\ D_c \end{bmatrix} = 0$$

$$LD_p + D_c = 0$$

Sempre que se verifique a inequação:  $b - L\mu_{p_0} \geq 0$

É possível obter os controladores da RdP e a marcação inicial dos mesmos através de:

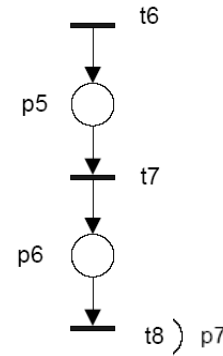
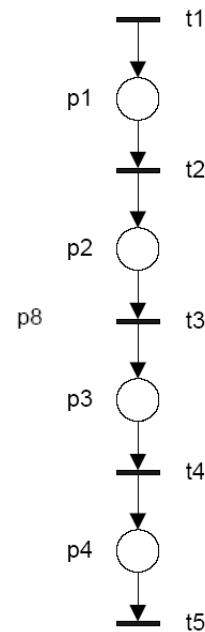
$$D_c = -LD_p$$

$$\mu_{c_0} = b - L\mu_{p_0}$$





## Exemplo 1



# Redes de Petri - Controladores

Lugares	Descrição
$p_1$	Agarrando peça
$p_2$	Transporte
$p_3$	Livre
$p_4$	Largando peça
$p_5$	Avançando
$p_6$	Recuando
Transições	
$t_1$	Agarra peça
$t_2$	Vai tapete
$t_3$	Chegou tapete
$t_4$	Larga peça
$t_5$	Largou
$t_6$	Avança
$t_7$	Recua
$t_8$	Termina

Pretende-se:

1) uma só peça em transporte pelo tapete

$$\mu_5 + \mu_6 \leq 1$$

2) uma só peça em transporte pelo robot

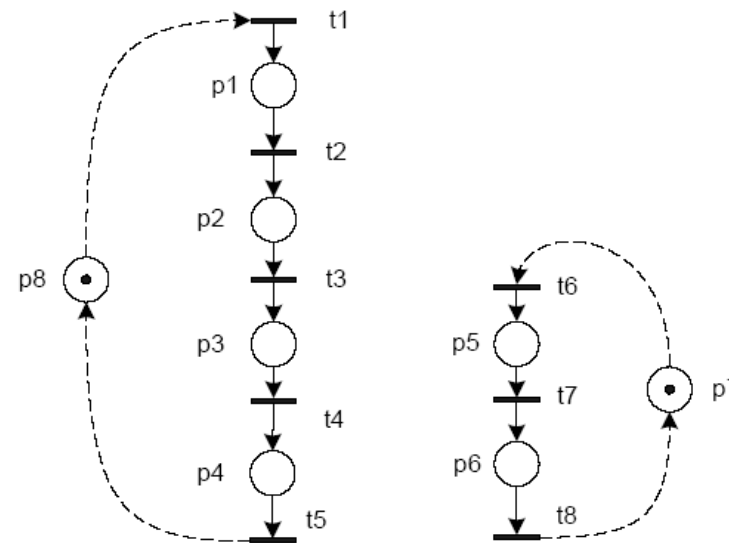
$$\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4 \leq 1$$

$$\mu_{c0} = L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



## Exemplo 2

# Redes de Petri - Controladores



Lugares	Descrição
$p_1$	Agarrando peça
$p_2$	Transporte
$p_3$	Livre
$p_4$	Largando peça
$p_5$	Avançando
$p_6$	Recuando
Transições	
$t_1$	Agarra peça
$t_2$	Vai tapete
$t_3$	Chegou tapete
$t_4$	Larga peça
$t_5$	Largou
$t_6$	Avança
$t_7$	Recua
$t_8$	Termina

**Problema:** Como impor **restrições ao disparo de transições?**

**Solução:** **Controladores baseados em Restrições Lineares Generalizadas**



# Redes de Petri - Controladores

## Restrição Linear Generalizada

$$L\mu + Hq + Cv \leq b$$

$q$  - vector de *disparo*  
 $v$  - vector de *Parikh*

- Generaliza o conceito de restrição linear de marcação
- Possibilita a imposição de restrições envolvendo o disparo de transições

Se a RLG respeitar  $L\mu_0 \leq b$  é possível obter controladores que a impõem

$$D_c^+ = D_{lc}^+ + \max(0, H - D_{lc}^-)$$

$$D_c^- = \max(D_{lc}^-, H)$$

$$\mu_{c0} = b - L\mu_0$$

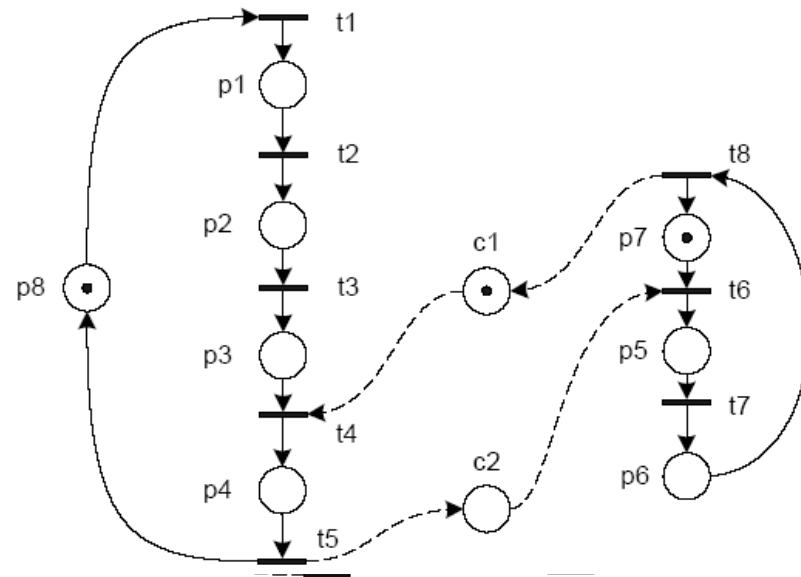
$$D_{lc}^+ = \max(0, -LD - C)$$

$$D_{lc}^- = \max(0, LD + C)$$



## Exemplo 2

# Redes de Petri - Controladores



Lugares	Descrição
$p_1$	Agarrando peça
$p_2$	Transporte
$p_3$	Livre
$p_4$	Largando peça
$p_5$	Avançando
$p_6$	Recuando
Transições	
$t_1$	Agarra peça
$t_2$	Vai tapete
$t_3$	Chegou tapete
$t_4$	Larga peça
$t_5$	Largou
$t_6$	Avança
$t_7$	Recua
$t_8$	Termina

É preciso impor:  
Controladores:

$$1) \text{ rol } v_1 D_c^- = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2) tapete avança depois do robot largar peça

$$v_6 D_c^+ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$L = 0 \quad H = 0 \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Admissibilidade

$$D_{c,uc}^- = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



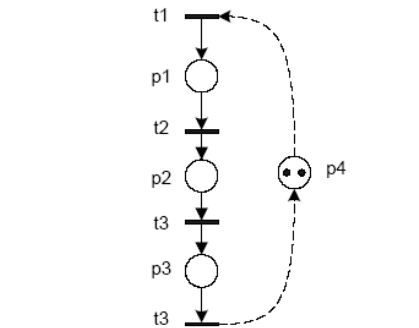
# Modelação da CFF - exemplos

## Tapetes T3 e T4

Lugares	Descrição
$p_1, p_3$	em transporte
$p_2, p_4$	em espera
Transições	
$t_1$	avança
$t_2$	avançou
$t_3, t_6$	fim de transporte*
$t_4$	recua
$t_5$	recuou*

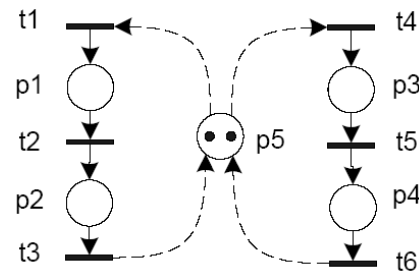
\*transições não controláveis

## Robot B2

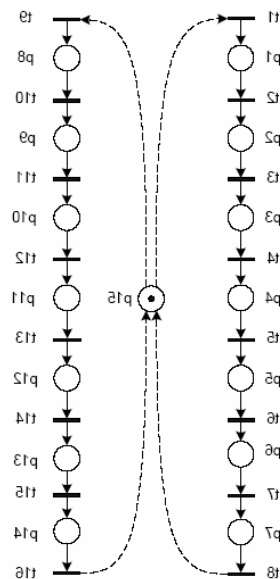


Lugares	Descrição
$p_1$	em transporte
$p_2$	em espera
$p_3$	em transporte
Transições	
$t_1$	avança
$t_2$	avançou*
$t_3$	recua
$t_4$	fim de transporte*

\*transições não controláveis



## Tapetes T1 e T3

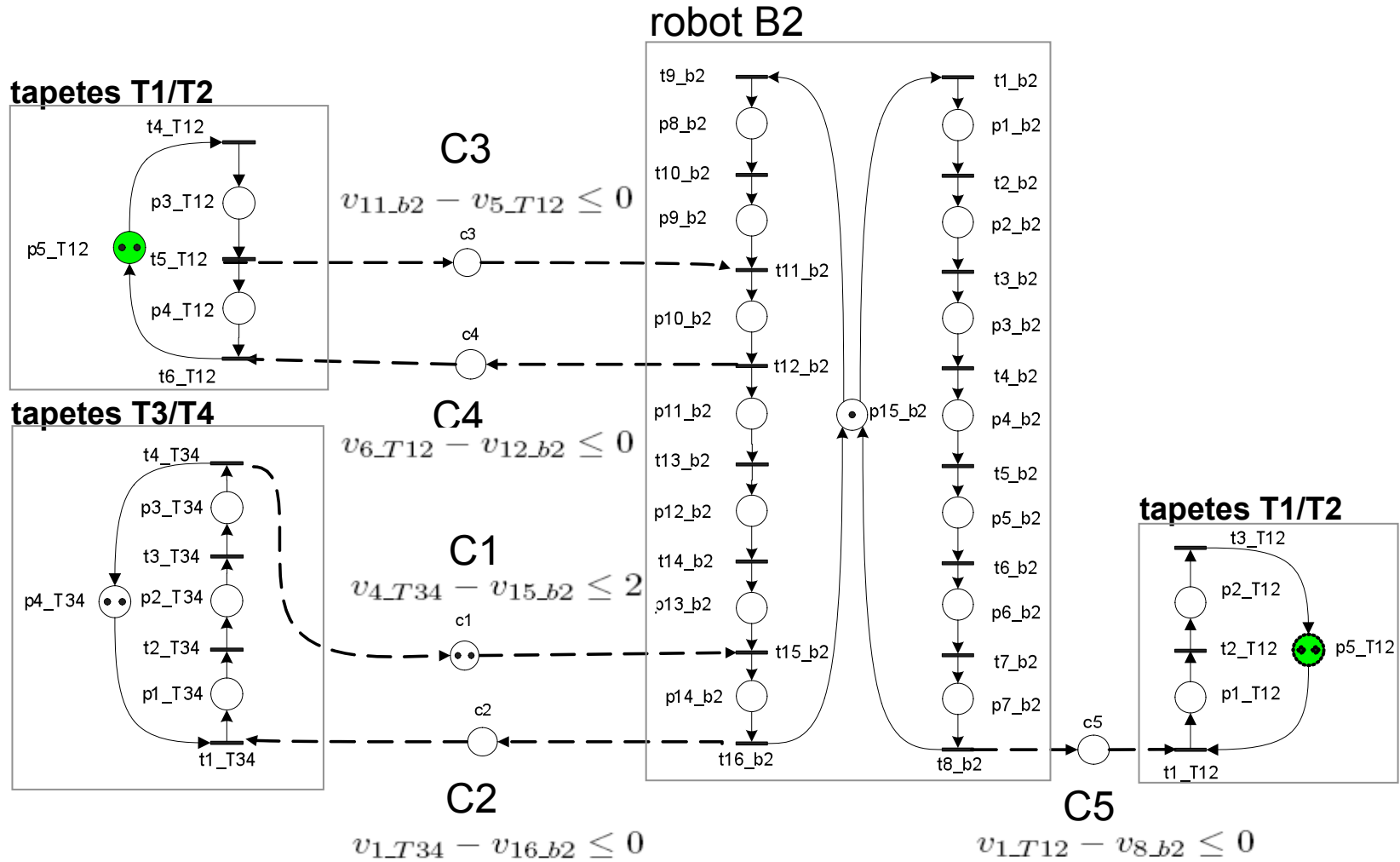


Lugares	Descrição
$p_1$	em deslocamento
$p_2, p_4, p_6, p_9, p_{11}, p_{13}$	em espera
$p_3, p_{10}$	a agarrar
$p_5, p_8, p_{12}$	em deslocamento
$p_7, p_{14}$	a largar
Transições	
$t_1$	vai ao armazém
$t_2, t_6, t_{10}, t_{14}$	chegou*
$t_3, t_{11}$	agarra peça
$t_4, t_{12}$	agarrou*
$t_5$	vai para o T1/T2
$t_7, t_{15}$	larga peça
$t_8, t_{16}$	largou*
$t_9$	vai para o T1/T2
$t_{13}$	vai para o T3/T4

\*transições não controláveis

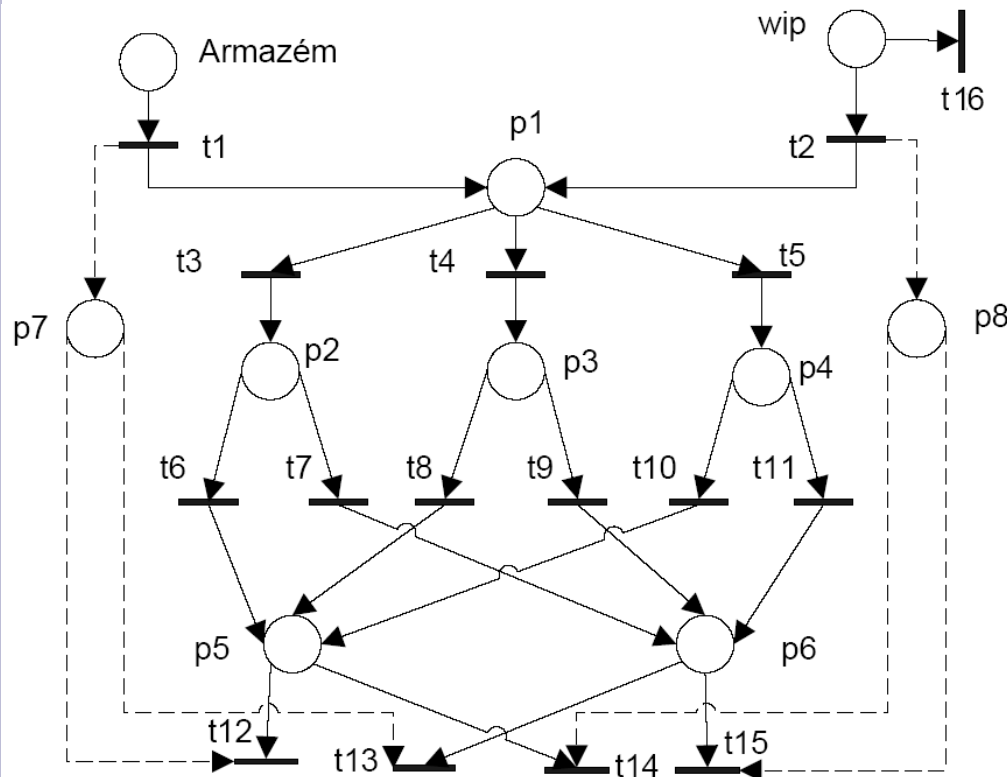


# Modelação da CFF - exemplos





# Modelação da CFF - Sequenciador



Lugares	Descrição
<i>p<sub>armazem</sub></i>	Armazém
<i>p<sub>wip</sub></i>	WIP (peças em fabrico)
<i>p<sub>1</sub></i>	escolhe peça
<i>p<sub>2,p3,p4</sub></i>	máquinas 1,2 e 3
<i>p<sub>5</sub></i>	destino buffers
<i>p<sub>6</sub></i>	destino máquinas
Transições	
<i>t<sub>1</sub></i>	escolhe do armazém
<i>t<sub>2</sub></i>	escolhe do WIP
<i>t<sub>3,t4,t5</sub></i>	vai para máquina 1, 2 ou 3
<i>t<sub>6,t8,t10</sub></i>	destino <i>buffers</i> 1,2 ou 3
<i>t<sub>7,t9,t11</sub></i>	destino maquinação 1,2 ou 3
<i>t<sub>12</sub></i>	armazém → buffer
<i>t<sub>13</sub></i>	armazém → máquina
<i>t<sub>14</sub></i>	máquina → buffer
<i>t<sub>15</sub></i>	máquina → máquina
<i>t<sub>16</sub></i>	máquina → saída

Responsável pelo sequenciamento do fabrico

Modela todas as combinações possíveis

Engloba todas as combinações reais de fabrico

Provoca explosão de estados na análise



# Modelação da CFF – Análise da RdP

RDP com **126 lugares** e **106 transições**

A RdP é coberta por p-invariantes:

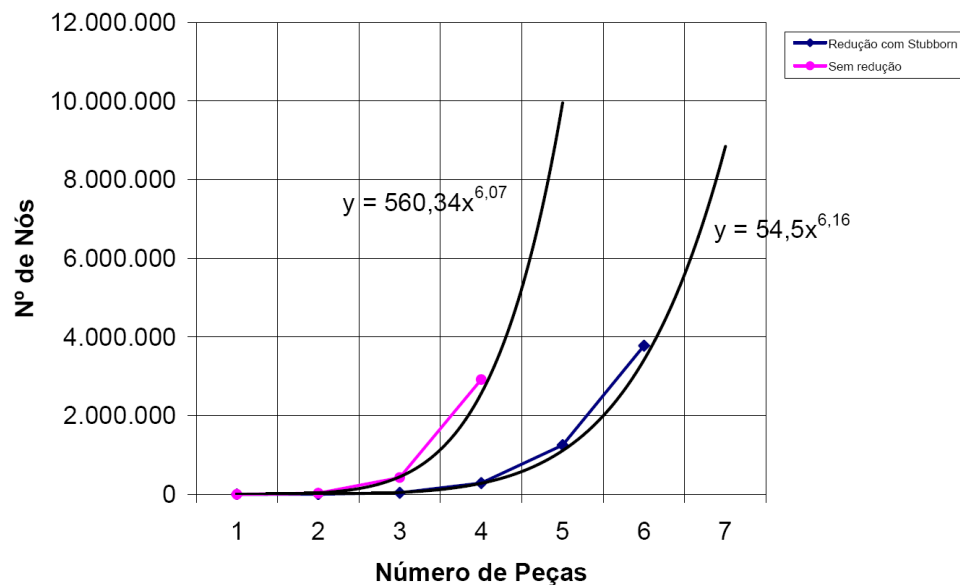
**Limitação - a RdP é Limitada**

Vivacidade - nada se conclui

A RdP é coberta por t-invariantes:

Vivacidade - nada se conclui

Análise exaustiva – grafo de alcançabilidade



Peças	$R$	$R_{stubb}$
1	622	70
2	313.25	2.788
3	426.646	40.758
4	2.919.694	288.322
5	$> 9 \times 10^6$	1.250.706
6	-	3.780.684

**Até lotes de 6 peças, não foram detectadas marcações mortas...**





## Problema:

Não se prevê a ocorrência de qualquer falha no sistema.

## Consequência:

Qualquer tipo de falha bloqueia o sistema...

**Exemplos:** Impacto dos robots, erros de comunicação, erros na maquinação, alarme de segurança, etc

## Solução:

Modelar e implementar um mecanismo de detecção e recuperação de falhas, **sem alterar o sistema de controlo já implementado.**



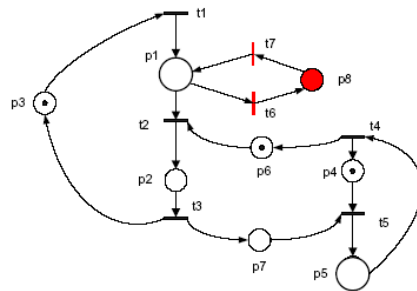
# Modelação das Falhas

Metodologia proposta:

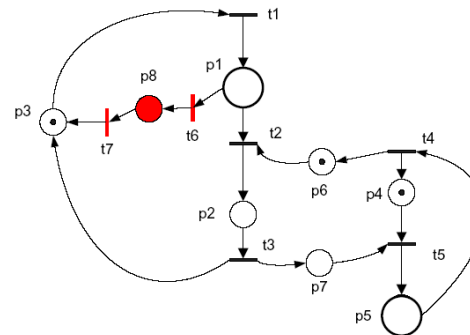
Enumeração das acções de recuperação de cada falha

Classificação das falhas quanto à abrangência

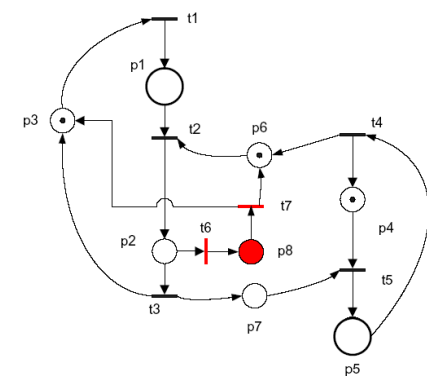
P-locais



locais a um módulo



globais



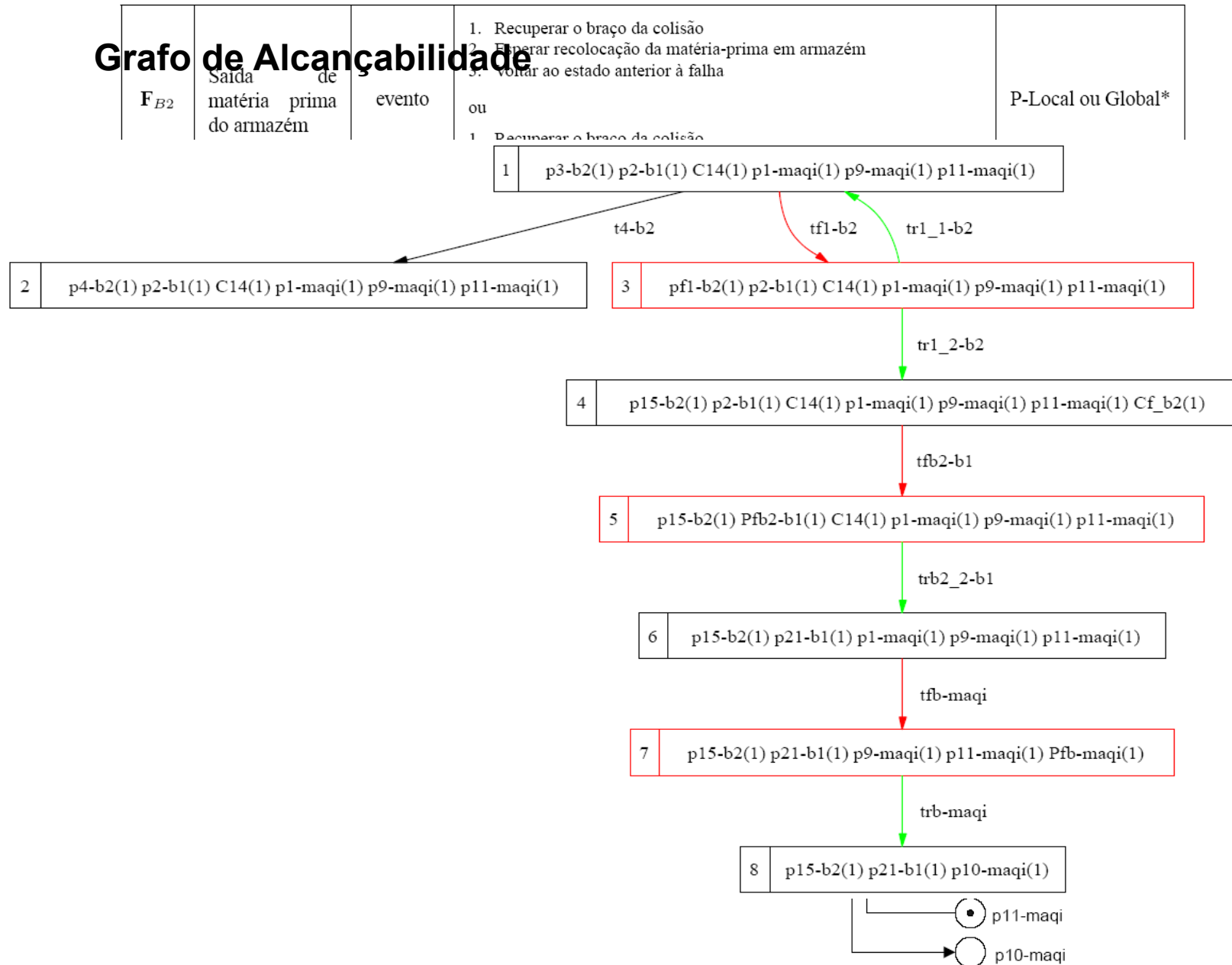
Modelação das extensões a apender à RdP original

Verificação das condições que garantem a conservação de propriedades



# Modelação das Falhas - exemplo

## Grafo de Alcançabilidade





# Modelação das Falhas – Análise da RdP Final

RdP com **147 lugares** e **144 transições**

A RdP é coberta por p-invariantes:

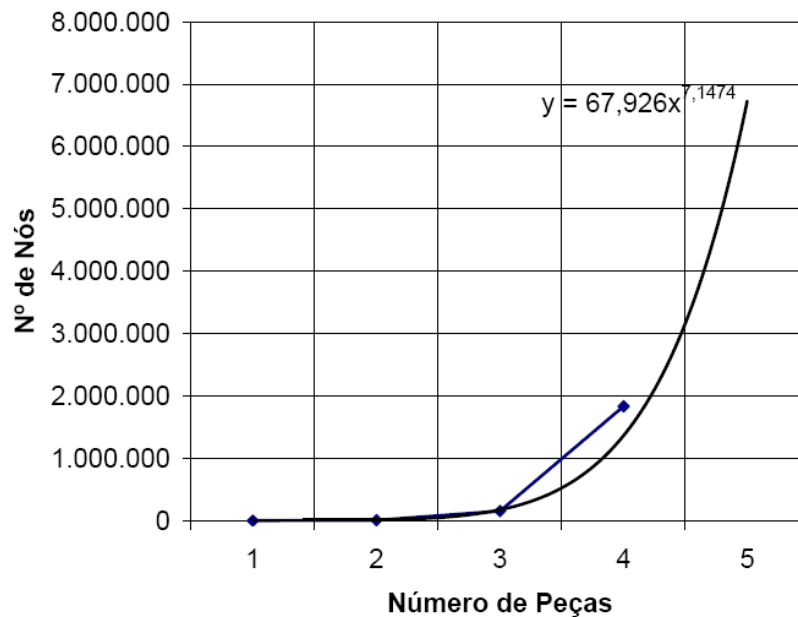
**Limitação - a RdP é Limitada**

Vivacidade - nada se conclui

A RdP é coberta por t-invariantes:

Vivacidade - nada se conclui

Análise exaustiva – grafo de alcançabilidade

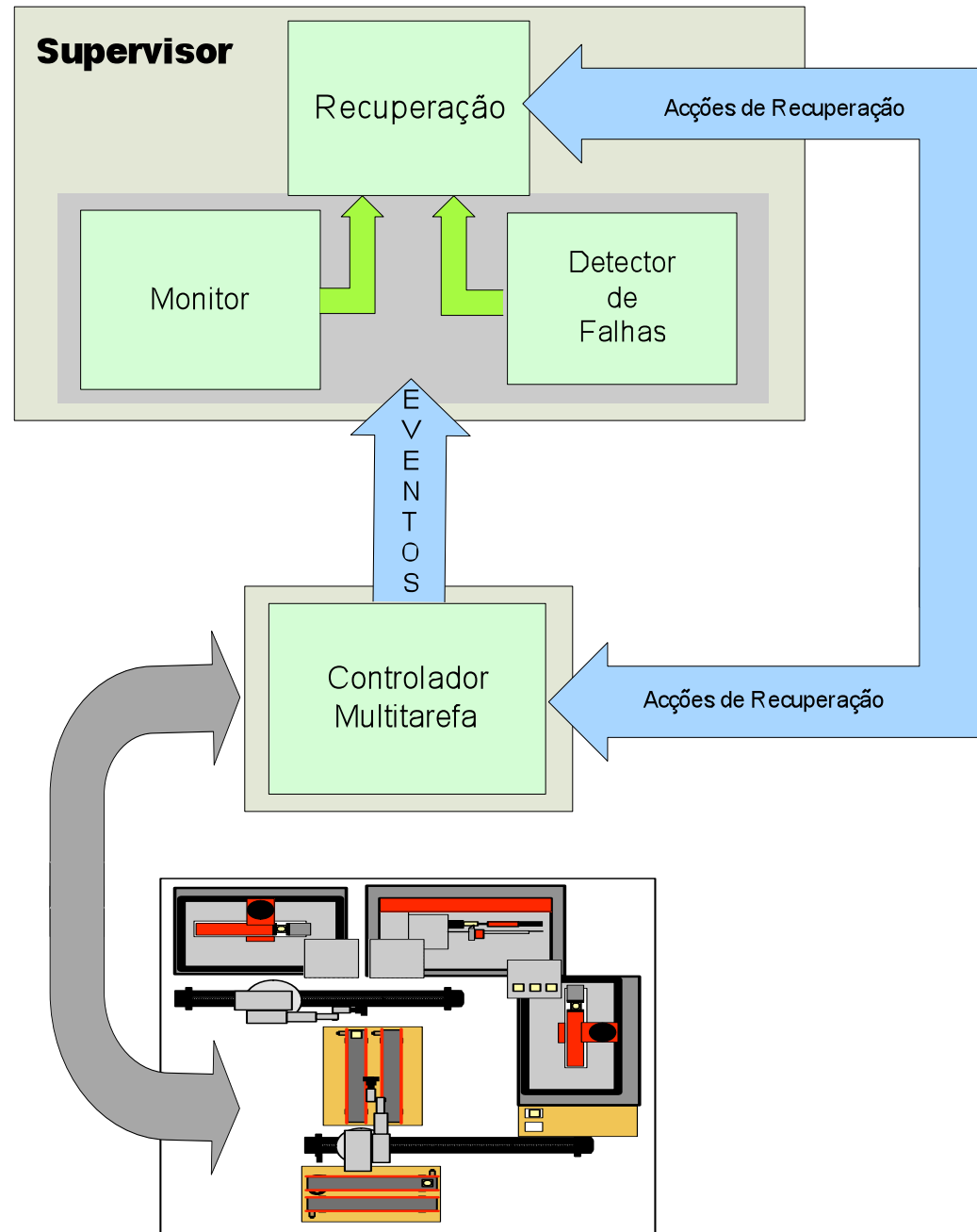


Peças	$R_{stubb}$
1	85
2	6.468
3	154.676
4	1.834.268
5	> 5.699.698

**Até lotes de 4 peças, não foram detectadas marcações mortas...**



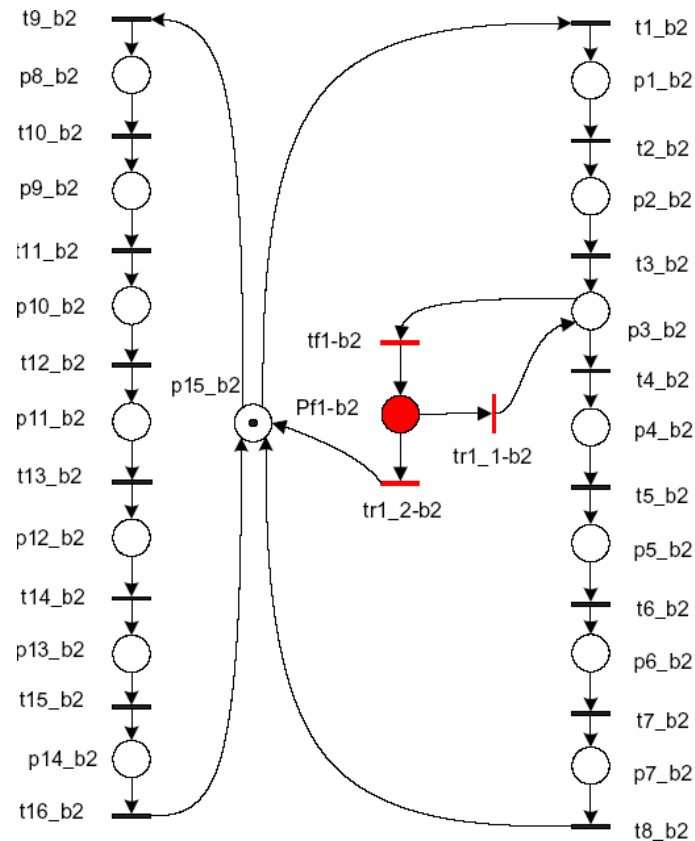
# Implementação Prática





# Implementação Prática - Monitor

## RdP observada



## Equações de estado

$$\mu(0)_i = \mu_{0_i},$$

$$\mu(k+1)_i = \mu(k)_i + D_i q(k)_i$$



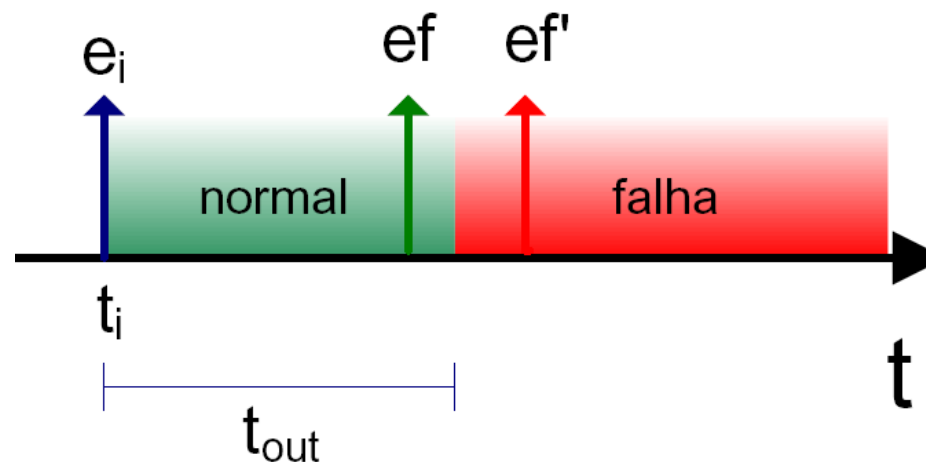
# Implementação – Detector de Falhas

Baseado na detecção de sequências de eventos incorrectas

Definição de Expectativa

$$x_f = (e_i, t_i, e_f, t_{out})$$

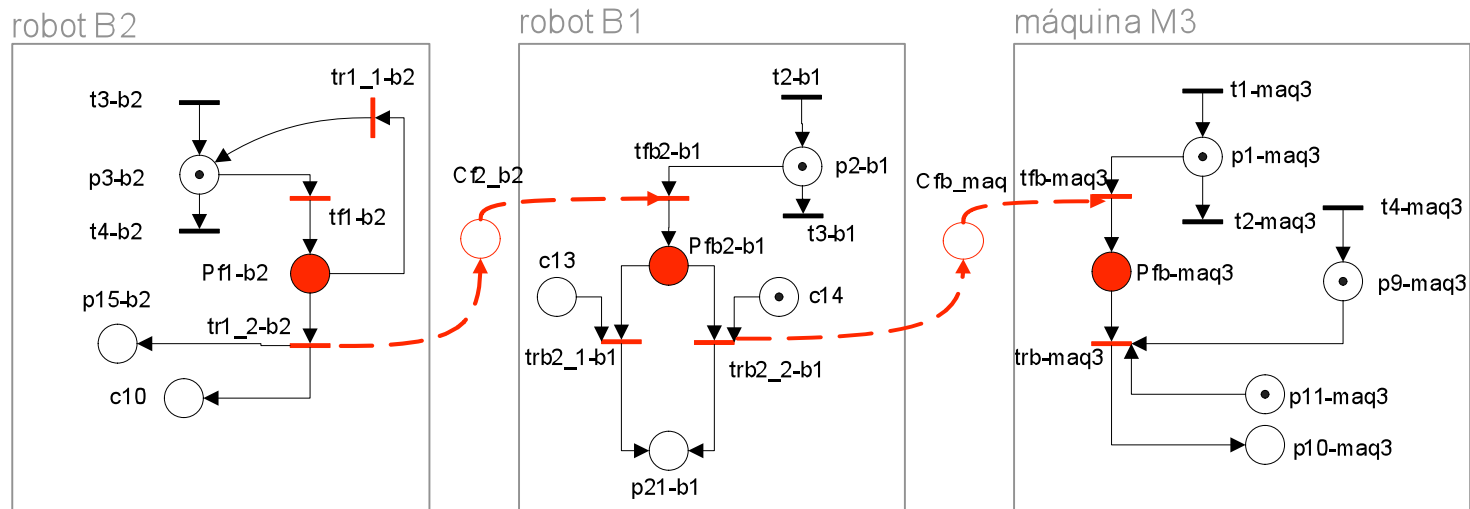
Mecanismo de Detecção





# Implementação - Recuperação

## Recuperação da falha FB2



Recuperação de B2	ordem	Recuperação de B1	ordem	Recuperação de M3	ordem
Ocorreu falha no braço 2 - 00:03	1	Reinicia Thread - 02:18	3 e 4	Reinicia Thread - 02:19	5 e 6
Termina Thread - 00:03					
Recuperação					
C2 Abortou Programas - 00:03					
C2 Controlo Activo - 00:04					
C2 Iniciou Programa de B2 - 00:04					
C2 Abortou Programas - 00:17					
C2 Home Position de B2 - 00:18					
C2 Iniciou Programas - 02:14					
C2 Thread Retomada - 02:18					
Peça Retira Peça de Produção - 02:18					
Recuperado					
Inicia Thread - 19: 2:18	2				





## Conclusões

Propôs-se uma **arquitectura para a supervisão de sistemas de automação**, com incidência na detecção e recuperação de falhas.

Efectuou-se um estudo exaustivo do **sistema de eventos discretos que modela a célula de fabricação flexível a supervisionar**, bem como das propriedades estruturais e topológicas da mesma

Desenvolveu-se uma **metodologia para a recuperação da célula** de fabricação flexível, baseada na síntese directa de controladores de supervisão para Redes de Petri.

A arquitectura proposta foi **implementada e validada**, em tempo real, na supervisão da CFF

A inclusão de um posto de CAD/CAM conferiu **maior actualidade e verticalidade** à CFF

A CFF do LSCN possui, agora, **maior flexibilidade** no seu processo de fabrico.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

12/7/10

26

**FIM**



## Problemas ocorridos durante a fase de implementação prática

- Problemas na leitura das portas série, devido a deficiências nas rotinas de comunicação da aplicação de controlo original.
- Placa BocaBoard apresenta mau funcionamento para metade das 16 portas.
- Placa de controlo dos motores passo-a-passo da máquina 3 avariada
- Ponte de díodos, do circuito de potência da máquina 1, queimada.
- Mau funcionamento da base linear da máquina 1.
- Avaria no aperto da máquina 2.
- Desprogramação das EPROMs do controlador 2 devido a avaria na fonte de alimentação.
- Monitor da máquina 3 avariado.



**Posto de Design**

Modelos por Enviar: MoldePeça2

Modelos em Fabrico: MoldePeça2, MoldePeça1, MoldePeça3

Novo Modelo

Alterar Modelo

Eliminar

Receber

Eliminar

Fechar

**Novo Modelo**

Nome: Numero1

Armazém: 1 (selected), 2

Operação: 1

Máquina CNC: FRESA 1

Ficheiro CNC: C:\Documents and Settings\cfc\...

OK

CANCEL

Confirmar

**Sessão de Produção**

Tipo	Nome	Tamanho do Lote
2	MoldePeça1	2
3	MoldePeça3	3

Enviar Produção

Produzir já

Cancelar

Tamanho do Lote: 2 peças

**IST - Aplicação Remota**

Design: Monitor: 1020P

OnLine

Limpar Ecrã

Máquina 3

Estado

Máquina 2

Estado

Máquina 1

Estado

Peças

Tapete 1

Estado

Tapete 2

Estado

Braço 1

Estado

Braço 2

Estado

Tapete 3

Estado

Tapete 4

Estado

Controlador 1

Controlador 2

Célula



# Comunicações

