

# MODELAGEM E ANÁLISE DE UMA CÉLULA DE MANUFATURA

M. Tazza

CPGII - CEFET - PR - Av. Sete de Setembro, 3105  
80230 - CURITIBA - PR - Brasil

**Resumo** - Descrevem-se os processos de modelagem e análise de uma célula de furação e inspeção de placas de circuito impresso. Modela-se o comportamento das estações, dos armazéns e do elemento de manipulação de paletes na célula. Deriva-se o modelo que captura o padrão de alocação, utilização e liberação de recursos. Ambos os modelos são descritos através de redes de Petri. A partir do padrão de utilização de recursos são desenvolvidas equações para a análise quantitativa da célula. As equações permitem a determinação dos parâmetros de avaliação do sistema: desempenho, índices de utilização das estações e do braço mecânico, gargalos.

**Abstract** - We describe the modeling and analysis processes of a boring and inspection cell for printed circuits boards. The behavioral model of the workstations, buffers and manipulation element is presented. The model for resources allocation, utilization and release patterns derived. Both models are described using Petri nets. Equations for the quantitative analysis of the manufacturing cell are developed. The equations allow the computation of the performance parameters of the system: throughput, utilization index of workstations and transport element, bottlenecks.

## 1. INTRODUÇÃO

Descreve-se o processo de modelagem e análise de uma célula de furação e inspeção de placas de circuito impresso. O processo de furação é responsável pela execução de um padrão de furos num sanduíche de placas virgens. O processo de inspeção é responsável pela detecção de interrupções, estreitamentos e alargamentos das trilhas além dos limites

de tolerância estabelecidos. O processo químico intermediário entre a furação e a inspeção (metalização de furos, banho, corrosão) não é tratado.

Considera-se que as placas a furar e inspecionar estejam fixadas em paletes apropriados. O processo de paletização e despaletização não é modelado. Os processos de furação e inspeção não são sequenciais, existindo independência causal entre eles. Os processos compartilham um braço mecânico para a movimentação de paletes entre os armazéns de entrada/saída e as máquinas. Pode existir paralelismo entre processos de furação, de inspeção e de movimentação do braço mecânico. O compartilhamento do braço impede o paralelismo entre processos de carga e/ou descarga das máquinas.

A escolha de um braço mecânico como elemento de manipulação de paletes coloca restrições sobre o arranjo físico das máquinas e armazéns da célula. Considera-se neste estudo um braço com movimento de avanço/recuo da garra, rotação sobre a base e deslocamento linear sobre trilho. Os arranjos possíveis são, basicamente, variações do arranjo de linha (simples ou dupla) e circular (completo, semi-círculo, em U).

Um modelo dirigido à análise quantitativa da célula deve capturar os aspectos da **parte-operativa** (incluindo máquinas, transporte e armazenamento), do **arranjo físico** e do **controle**. Na modelagem da parte operativa devem ser descritas as características operacionais das máquinas (capacidade de furação/inspeção) e do elemento de manipulação (velocidade de avanço/recuo, de rotação, de deslocamento). O arranjo físico é incluído no modelo a partir das dimensões das máquinas e armazéns e da distância entre seus pontos de acesso (pontos de colocação/retirada de paletes pelo braço mecânico).

Apoio financeiro parcial: FINEP proc. 1670/89  
RHAÉ proc. 600130/89.4

A inclusão dos aspectos relacionados ao controle em um modelo analítico é delicada. Supomos uma célula específica (máquinas, armazéns, arranjo físico, braço mecânico). O desempenho da célula - peças manufaturadas por unidade de tempo - depende, além das características especificadas, do programa de controle da célula. O intervalo de valores para o desempenho vai de zero (limite inferior, controle em dead-lock) até um máximo teórico. Desprezando o limite inferior, existem duas "regiões" de desempenho, uma definida pelos programas seqüenciais e outra pelos programas de controle que desfrutam o possível paralelismo entre os processos de manufatura. O modelo desenvolvido captura o controle nesta última região, permitindo a determinação do limite superior e inferior do desempenho.

A seção 2 descreve o desenvolvimento dos modelos. A seção 3 modela o padrão de utilização dos recursos e desenvolve as equações para a análise quantitativa. Os modelos estão baseados em redes de Petri (Reisig - 1985; Peterson - 1981). As equações para a análise quantitativa são desenvolvidas em detalhe em Tazza. M. (1985).

## 2. MODELAGEM

Descrevem-se os modelos comportamentais da parte operativa (estações, transporte e armazenamento) da célula. Os modelos estão baseados em redes de lugar/transição temporizadas. O conceito de tempo é introduzido como um "tempo de permanência" de marcas em lugares da rede. O detalhamento do modelo temporal utilizado está descrito em Tazza - 1985; Richter - 1985.

### 2.1 Parte Operativa

#### 2.1.1 Estação de Furação

O modelo da estação representa o padrão de alocação, utilização e liberação do recurso.

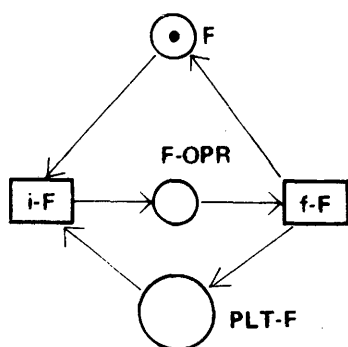


Figura 1. Modelo comportamental de uma estação.

A marca em F modela a máquina de furação em estado disponível. A marcação do lugar PLT-F, inicialmente vazia, modela um palete com placas de furação. A

ocorrência da transição i-F (início de furação) coloca uma marca no lugar F-OPR, representando a utilização do recurso máquina operando sobre um palete. A ocorrência da transição f-F (fim de furação) devolve uma marca ao lugar F (máquina em disponibilidade) e uma marca no lugar PLT-F (interpretada, agora, como palete já processado). Note-se que não está modelada a interação com o braço-mecânico, responsável pela carga/descarga de paletes, nem com o controle, responsável pelo envio do sinal de início de furação (seções 2.3 e 2.4 respectivamente).

#### 2.1.2 Estação de Inspeção

O modelo das estações de inspeção é idêntico ao das de furação, com a interpretação correspondente.

## 2.2 Sistema de Manipulação de Paletes

### 2.2.1 Armazenamento

O processo de furação é alimentado por paletes a partir de um armazém de entrada (EF); ao fim da operação, o palete com placas já furadas é colocado, via braço mecânico, no armazém de saída (SF). Os armazéns correspondentes do processo de inspeção são denominados EI e SI (fig. 2).

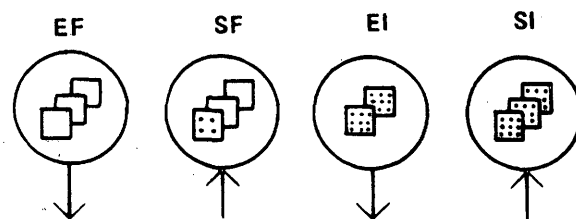


Figura 2. Armazéns de entrada/saída dos processos

### 2.2.2 Manipulação

O modelo do braço mecânico especifica os serviços a serem prestados, sob solicitação do controle, dentro da célula:

- serviço AF: alimentação das estações de furação com paletes de placas virgens (a partir de EF)
- serviço DF: descarga das estações de furação e colocação de paletes em SF
- serviço AI: alimentação das estações de inspeção (a partir de EI)
- serviço DI: descarga das estações de inspeção e colocação de paletes em SI
- serviço PBM: posicionamento do braço mecânico

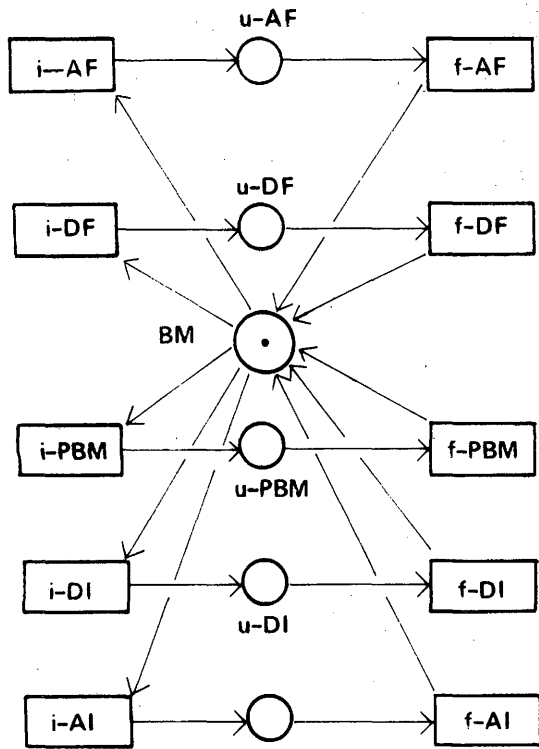


Figura 3. Modelo comportamental do braço mecânico.

No modelo da fig. 3 a marcação do lugar BM é interpretada como a disponibilidade do braço mecânico. Os lugares u-AF, u-DF,... são interpretados como a utilização do braço mecânico na prestação do serviço correspondente (Alimenta Furação, Descarrega Furação,...). Os processos associados aos serviços são mutuamente exclusivos. O tempo de permanência de marcas nos lugares u-AF, u-DF,... (duração dos processos de carga/descarga de máquinas) depende das características operacionais do braço mecânico (velocidade de rotação/deslocamento) e do

arranjo físico dos componentes. A ocorrência de transições i-AF i-DF (f-AF, f-DF), modela o início (fim) do processo de carga da furação, descarga da furação, etc. A habilitação das transições está condicionada ao envio de um sinal do controle da estação ao braço mecânico. A ocorrência das transições de fim de carga/descarga ou fim de posicionamento (f-PBM) implica o envio de um sinal do braço mecânico ao controle da estação. A ligação com o controle será feita na seção 2.4.

### 2.3 Integração Parte Operativa

Os modelos desenvolvidos nas seções anteriores serão ligados originando o modelo da célula (fig. 4). A ligação será feita através da inclusão de arcos entre lugares e transições dos modelos individuais de forma a representar o fluxo de paletes na célula e garantir sua continuidade.

### 2.4 Controle

A função do controle é coordenar a execução dos processos de manufatura e de movimentação de paletes na célula. Modela-se a troca de sinais entre o controle e os componentes da parte operativa.

#### 2.4.1 Controle das Estações

A tabela 1 resume os sinais enviados às estações de furação e inspeção e os sinais de resposta destas ao controle da célula.

O modelo da ligação do controle com as estações de furação está representado na fig. 5. Para a inspeção o modelo comportamental é estruturalmente idêntico, trocando as estações e o identificador dos lugares cuja marcação identifica a presença de sinais de controle (Ini-F e Fim-F).

SINAL	ORIGEM	DESTINO
Ini-F (iniciar-furação)	Controle	Estações de furação
Ini-I (iniciar inspeção)	Controle	Estações de inspeção
Fim-F (fim-furação)	Estações de furação	Controle
Fim-I (fim-inspeção)	Estações de inspeção	Controle

Tabela 1. Troca de sinais entre controle e parte operativa

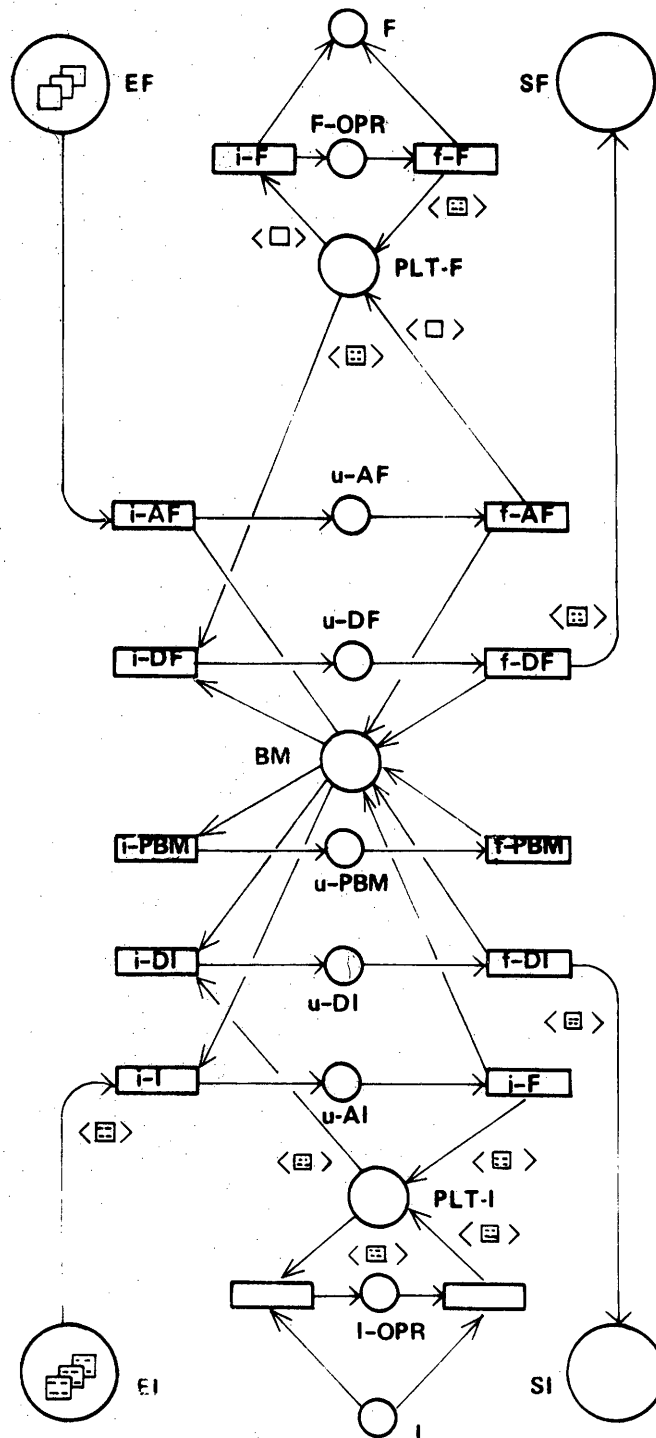


Figura 4. Integração das máquinas, braço-mecânico e armazéns

174

### 2.4.2 Controle do Sistema de Manipulação

A tabela 2 resume a troca de sinais entre o controle e o braço mecânico.

O controle do Braço Mecânico está representado na rede da fig. 6.

O modelo permite um só processo ativo relacionado ao braço mecânico, mesmo que no controle sinais conflitantes sejam enviados simultaneamente. A ocorrência dos eventos e-AF e e-DI no controle num mesmo passo, por exemplo, origina um conflito sobre os eventos i-AF e i-DI do braço mecânico. O modelo não mostra a resolução do conflito.

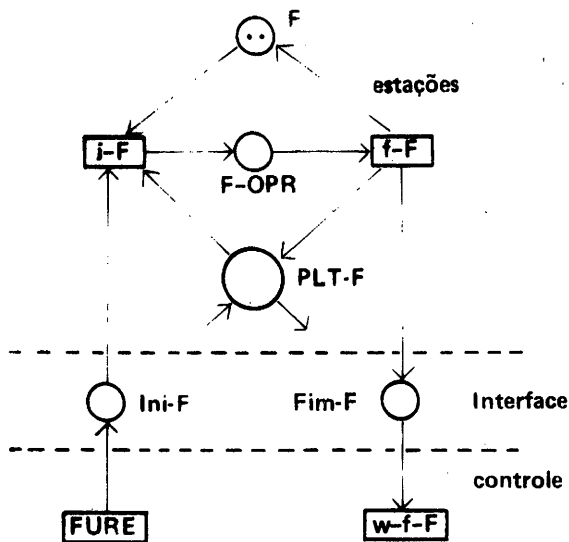


Figura 5. Ligação do controle com estações de furação

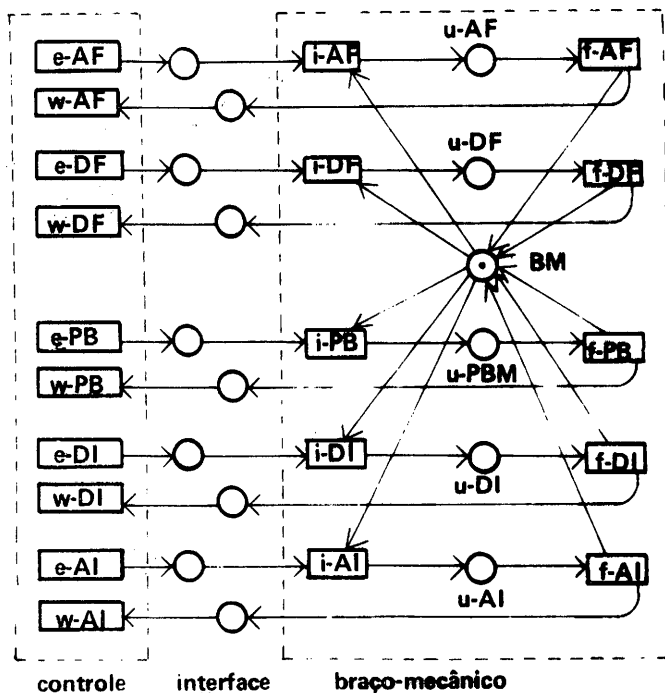


Figura 6. Ligação do controle com o braço mecânico

SINAL	INTERPRETAÇÃO	ORIGEM	DESTINO
AF	Alimentar Furação	Controle	Braço Mecânico
Fim-AF	Alimentação Furação Concluída	Braço Mecânico	Controle
AI	Alimentar Inspeção	Controle	Braço Mecânico
Fim-AI	Alimentação Inspeção Concluída	Braço Mecânico	Controle
DF	Descarregar Furação	Controle	Braço Mecânico
Fim-DF	Descarga Furação Concluída	Braço Mecânico	Controle
DI	Descarregar Inspeção	Controle	Braço Mecânico
Fim-DI	Descarga Inspeção Concluída	Braço Mecânico	Controle
PBM	Posicionar Braço Mecânico	Controle	Braço Mecânico
Fim-PBM	Posicionamento Concluído	Braço Mecânico	Controle

Tabela 2. Troca de sinais entre o controle e o Braço Mecânico

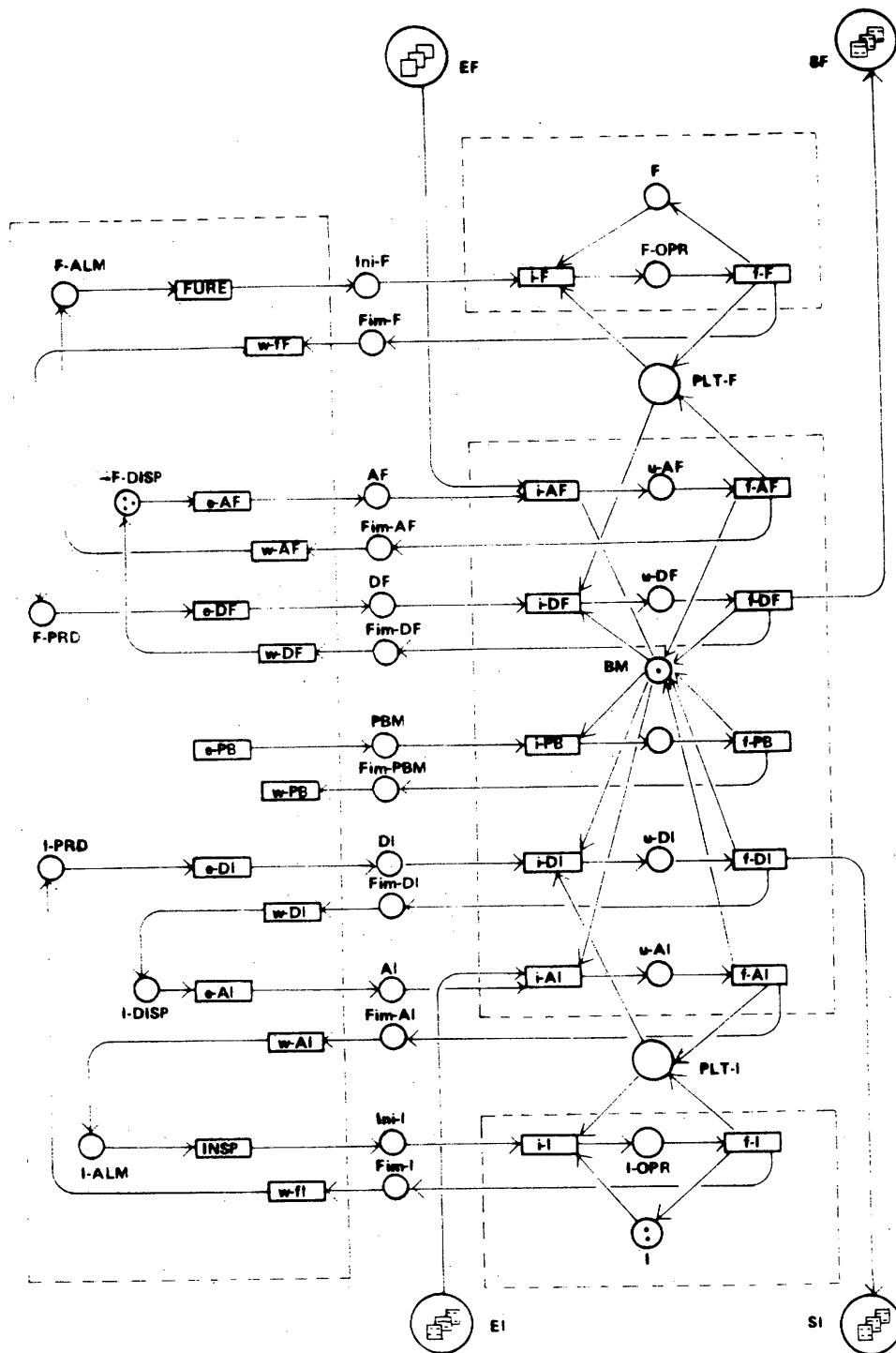


Figura 7. Integração controle/parte-operativa

### 2.4.3 Integração do Controle com a Parte Operativa

Concluindo o passo de modelagem procede-se à integração dos modelos da parte operativa com o modelo do controle. O modelo do controle apresentado nas seções 2.4.1 e 2.4.2 será expandido de forma a incluir a descrição do estado dos componentes da parte operativa. Com a expansão garantir-se-á a possibilidade de paralelismo entre processos e a eliminação dos conflitos sobre a utilização do braço mecânico. A expansão está baseada na inclusão de lugares na parte controle, cuja marcação resume o estado das máquinas e do braço mecânico. O comportamento do controle será restringido ao envio de sinais consistentes com o estado dos componentes da parte operativa. Em resumo, a rede que modela a integração do controle com a parte operativa é resultante da integração da rede da fig. 4 com o modelo de controle definido nas figuras 5 e 6, acrescida dos lugares de controle de estado.

Os lugares usados pelo controle da célula na descrição do estado dos componentes da parte operativa são interpretados a seguir. A marcação dos lugares F-DISP, F-ALM e F-PRD indica o número de máquinas de furação no estado de Disponibilidade (parada, sem paleta), de Alimentação (parada, com paleta contendo placa a furar) e Parada (parada, com paleta contendo placa já manufaturada). A marcação do lugar F-OPR indica o número de máquinas em operação. A marcação inicial dos lugares F e F-DISP deve ser igual,  $Mo(F) = Mo(F-DISP)$ , indicando que o número de máquinas em disponibilidade inicialmente é igual ao número de máquinas no sistema. O mesmo vale para a marcação dos lugares correspondentes no processo de inspeção.

É interessante "acompanhar" uma marca em F-DISP. Pela ocorrência da transição e-AF (evento de alimentar furação) a marca é retirada de F-DISP e colocada em AF; a ocorrência de i-AF, início da operação de alimentação pelo braço mecânico, retira a marca de AF (além de uma marca representando um paleta de EF) e coloca uma marca em u-AF, interpretada como máquina sendo alimentada com um paleta pelo braço mecânico. Ao final da alimentação (ocorrência de f-AF) é colocado um paleta em PLT-F e enviado um sinal (Fim-AF) ao controle. Pela ocorrência de w-AF (espera alimentação da furação) é incluída uma marca em F-ALM. O controle pode agora enviar o sinal Ini-F para iniciar a furação através do evento FURE. Com a ocorrência de i-F tem início o processo de furação e uma marca é incluída em F-OPR. O evento f-F devolve uma marca em PLT-F (paleta já processado) e a marca em Fim-F avisa o controle do término da operação. A ocorrência de w-f F coloca uma marca em F-PRD. O controle pode solicitar um serviço de descarga da máquina ao braço mecânico (evento e-DF). A descarga retira a marca em PLT-F; na conclusão (f-DF) o paleta é colocado na saída (SF) e o aviso de conclusão é enviado ao controle (marca em Fim-DF). Com a

recepção do sinal Fim-DF (evento w-DF) a marca é colocada em F-DISP, fechando o ciclo Disponibilidade → Alimentada → Operação → Parada → Disponibilidade. Note-se que com  $Mo(F) > 1$  diversos processos podem rodar em paralelo, sujeitos ao uso seqüencial dos serviços do braço mecânico. O modelo de controle apresentado define uma classe de programas de controle. Cada programa tem um padrão comportamental diferente, mas todos corretos no sentido de que o envio de sinais à parte operativa é coerente com o estado desta. Por exemplo, não é possível iniciar um programa com o comando FURE: a marcação inicial  $Mo(F-ALM)$  vazia impede o envio do sinal Ini-F. A marcação inicial  $Mo(F-DISP) > 0$ ,  $Mo(I-DISP) > 0$  e  $Mo(BM-DISP) = 1$  obrigam um programa de controle a iniciar com um comando de alimentação de estação (e-AF ou e-AI) ou com um comando de posicionamento ao braço mecânico.

Finalmente, deve ser notado que mesmo equivalentes sob o aspecto da correção, os padrões de comportamento da parte controle não são equivalentes sob o ponto de vista de desempenho da parte operativa controlada. A diferença no desempenho é consequência do paralelismo, associado a um programa, na utilização dos recursos de manufatura e transporte.

## 3. ANÁLISE

### 3.1 Obtenção do Modelo de Extração

O modelo desenvolvido na seção anterior (fig. 7) não é adequado para tratamento analítico. As dificuldades são decorrentes da multiplicidade de programas de controle que podem ser escritos, fazendo com que qualquer resultado numérico tenha que ser interpretado em função do programa. Segue-se uma abordagem onde o controle é abstraído. O modelo deverá retratar apenas os aspectos de utilização de recursos na célula (máquinas e transporte). As unidades de recurso serão modeladas através de marcas que fluem numa rede de lugar-transição. Os lugares da rede modelam os diferentes estados dos recursos (disponibilidade, utilização, etc.) e as transições modelam a mudança de estado. O desenvolvimento do modelo está baseado no acompanhamento de uma marca em F-DISP (seção 2.4.3) e em I-DISP, incluindo a competição pelo recurso braço mecânico.

Uma marca permanece em F-DISP ou I-DISP devido à não disponibilidade momentânea do braço mecânico. Os lugares u-AF e u-AI, modelam a utilização do braço mecânico em operações de alimentação das máquinas de furação e inspeção, respectivamente. Marcas em F-ALM (I-ALM) modelam máquinas alimentadas. Marcas em F-OPR e I-OPR modelam máquinas em operação sobre paletes correspondentes. Marcas em F-PRD e I-PRD modelam máquinas paradas esperando o braço mecânico para operação de descarga. Marcas em u-DF e u-DI modelam a operação de descarga de máquinas pelo

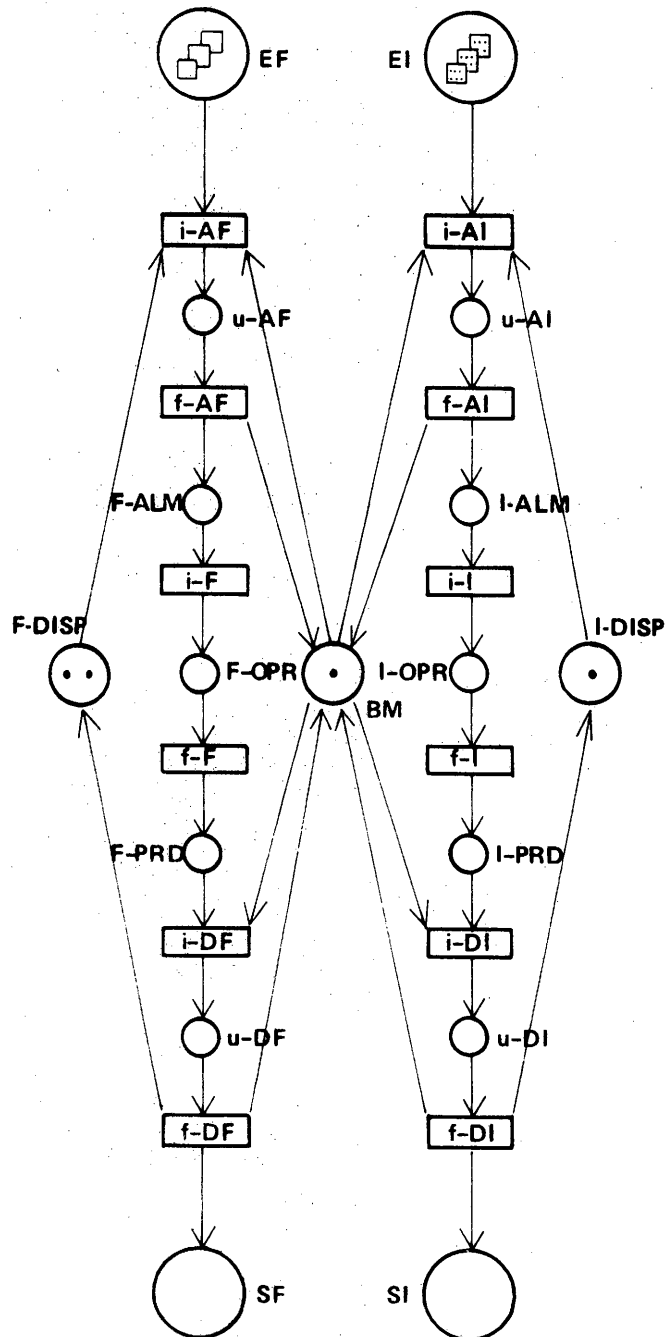


Figura 8. Modelo da utilização para duas estações de furação e uma de inspeção.

braço mecânico. Note-se que há competição pelo recurso compartilhado (braço mecânico), impedindo o paralelismo de operações de carga/descarga.

Para a análise quantitativa de célula é necessária a definição dos tempos de permanência de marcas nos lugares da rede. A tabela 3 resume a interpretação dos tempos na rede. Para cada lugar  $s$ ,  $z(s)$  indica o tempo de permanência de marcas em  $s$ .

Para os lugares associados ao processo de inspeção a interpretação é simétrica.

### 3.2 As equações de fluxo

O período de utilização das estações de furação  $P(N-F)$  e de inspeção  $P(N-I)$  é dado pela soma dos tempos de permanência nos estados parciais de indis-



TEMPO	INTERPRETAÇÃO	OBSERVAÇÕES
$Z_w(F-DISP)$	Tempo de espera pelo braço mecânico para operação de alimentação.	Dado de saída fornecido pelo modelo.
$Z(u-AF)$	Tempo de utilização do braço mecânico numa operação de alimentação.	Dado de entrada; variável em função da posição do braço.
$Z_w(F-ALM)$	Tempo de espera pelo sinal do controle para iniciar operação.	Dado de entrada; igual ou semelhante a zero.
$Z(F-OPR)$	Tempo de operação sobre um pallet.	Dado de entrada; função da máquina e da peça no pallet.
$Z_w(F-PRD)$	Tempo de espera pelo braço mecânico para operação de descarga.	Dado de saída fornecido pelo modelo.
$Z(u-DF)$	Tempo de utilização do braço mecânico numa operação de descarga.	Dado de entrada; variável em função da posição do braço.

Tabela 3. Interpretação dos tempos na rede

ponibilidade ( $u-AF$ ,  $F-OPR$ ,  $u-DF$ ) e ( $u-AI$ ,  $I-OPR$  e  $u-DI$ ) para furação e inspeção, respectivamente.

$$P(N-F) = Z(u-AF) + Z(F-OPR) + Z(u-DF) \quad (\text{eq. 1a})$$

$$P(N-I) = Z(u-AI) + Z(I-OPR) + Z(u-DI) \quad (\text{eq. 1b})$$

Os tempos  $Z_w(F-DISP)$  e  $Z_w(F-PRD)$  (resp.  $Z_w(I-DISP)$  e  $Z_w(I-PRD)$ ) não foram incluídos por serem tempos de espera induzidos em função das velocidades relativas dos processos (dados de saída). Os tempos  $Z_w(F-ALM)$  e  $Z_w(I-ALM)$ , tempos de espera pelo sinal de controle, são iguais ou semelhantes a zero. O período de utilização de um recurso representa o tempo de indisponibilidade do recurso ao atender uma solicitação (manufatura de um pallet).

O desempenho de um subsistema isolado  $N_i$ ,  $D(N_i)$ , de um processo de manufatura, é uma medida do número de pallets atendidos por unidade de tempo. É função do número de estações disponíveis na célula ( $Mo(F-DISP)$  e  $Mo(I-DISP)$ ) e dos períodos de utilização.

$$D(N-F) = \frac{Mo(F-DISP)}{P(N-F)} \quad (\text{eq. 2a})$$

$$D(N-I) = \frac{Mo(I-DISP)}{P(N-I)} \quad (\text{eq. 2b})$$

Para o recurso compartilhado (braço-mecânico) o cálculo é diferente. A idéia será introduzida de forma intuitiva. Supõe-se uma situação onde  $Z(u-AF) \gg Z(u-AI)$  e  $Z(u-DF) \gg Z(u-DI)$ . Se não existirem pallets de inspeção no sistema, o braço mecânico será alocado exclusivamente ao processo de furação e seu período de utilização será ditado por  $Z(u-AF)$  e  $Z(u-DF)$ . Não existindo pallets de furação, o período será ditado por  $Z(u-AI)$  e  $Z(u-DI)$ , menor que no caso anterior. O cálculo do período de utilização do recurso compartilhado implica a inclusão da ponderação ( $p_i$ ) no atendimento de pallets de furação e inspeção:

$$P(N-BM) = p_1 \cdot (Z(u-AF) + Z(u-DF)) + p_2 \cdot (Z(u-AI) + Z(u-DI)) \quad (\text{eq. 1c})$$

onde  $p_1 + p_2 = 1.0$  e  $0 \leq p_i \leq 1.0$

O desempenho do braço mecânico será

$$D(N-BM) = \frac{Mo(BM)}{P(N-BM)} = \frac{1}{P(N-BM)} \quad (\text{eq. 2c})$$

As equações 2a, 2b e 2c dão a capacidade de atendimento de cada componente isolado, sem levar em conta a interação no sistema. O desempenho da célula será ex-

presso por um par  $(D(N - F), D(N - I))$  já que existem dois processos independentes. Cada elemento do par é resultante da interação entre o processo envolvido (furação/inspeção) e o elemento de transporte. Numa interação paralela entre dois componentes com taxas de atendimento diferentes, o mais lento ditará o desempenho do todo. Designa-se por  $D(F / BM)$  e  $D(I / BM)$  o desempenho resultante da interação do subsistema de furação  $F$  com o subsistema de transporte  $BM$ .

$$D(F/BM) = \min [ D(N - F), p_1 \cdot D(N - BM) ] \quad (\text{eq. 3a})$$

$$D(I/BM) = \min [ D(N - I), p_2 \cdot D(N - BM) ] \quad (\text{eq. 3b})$$

Note-se que o cálculo do desempenho em uma interação leva em conta a "parcela" do desempenho do recurso compartilhado ( $p_1 \cdot D(N-BM)$ ) usada para atender cada componente na interação.

A partir do desempenho dos componentes do sistema e da interação entre eles (eq. 3a e 3b) é possível determinar o índice de sub-utilização  $U(N_1)$  dos recursos no sistema.

caso 1:  $p_1 \cdot D(N - BM) < D(N - F)$

$$U(N-F) = 1 - \frac{p_1 \cdot D(N-BM)}{D(N-F)} \quad (\text{eq. 4a})$$

$$U(N - BM/F) = 0$$

onde  $U(N - BM/F)$  é a subutilização do  $BM$  na interação com o processo de furação.

caso 2:  $p_1 \cdot D(N-BM) > D(N - F)$

$$U(N - F) = 0$$

$$U(N - BM/F) = p_1 \cdot \left( 1 - \frac{D(N-F)}{p_1 \cdot D(N-BM)} \right) \quad (\text{eq. 4b})$$

caso 3:  $p_1 \cdot D(N - BM) = D(N - F)$

$$U(N - F) = U(N - BM/F) = 0 \quad (\text{eq. 4c})$$

Para a interação do braço mecânico com o processo de inspeção as equações são simétricas, usando  $p_2$  como valor de ponderação e  $U(N-BM/I)$  para a subutilização

decorrente da interação. As equações apresentadas serão aplicadas à rede da fig. 8 para um caso específico.

### 3.3 Estudo de Caso

#### 3.3.1 Descrição

O sistema é formado por duas máquinas de furação e uma de inspeção dispostas em linha. A movimentação de paletes é feita por um braço mecânico sobre trilhos (fig. 9)

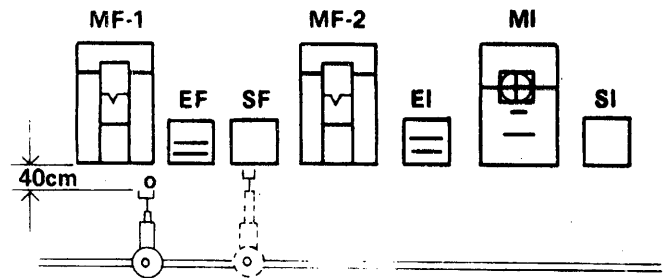


Figura 9. Arranjo físico do sistema.

Nos equipamentos estão marcados os pontos de acesso do braço mecânico aos mesmos. Consideram-se máquinas e armazéns com dimensões hipotéticas: largura das máquinas: 120 cm, largura dos armazéns: 50 cm, distância entre equipamentos: 30 cm. A tabela-4 resume as distâncias  $d(e_i, e_j)$  entre o ponto de acesso do equipamento  $e_i$  e o do equipamento  $e_j$ .

$e_i, e_j$	EF, MF-1	EF, MF-2	MF-1, SF	MF-2, SF	EI, MI	MI, SI	MF-2, EI
$d(e_i, e_j)$ (cm)	115	195	195	115	115	115	115

Tabela 4. distância entre pontos de acesso de equipamentos.

A distância entre o braço mecânico com garra retrátila e um ponto de acesso é de 40 cm (fig. 9). As máquinas de furação tem capacidade operacional de 300 furos/minuto e a máquina de inspeção tem capacidade de 30  $\text{cm}^2/\text{minuto}$ .

A tabela 5 resume as características operacionais do braço mecânico.

<id>	CARACTERÍSTICA	VALOR	INTERPR.
$V_{\ell}$	Velocidade de deslocamento linear no trilho.	80 (cm/s)	
$V_a$	Velocidade de avanço da garra.	40 (cm/s)	
$V_r$	Velocidade de recuo da garra.	40 (cm/s)	
$V_{\theta}$	Velocidade de rotação sobre a base.	20 (º/s)	
$A_{m\acute{a}x}$	Alcance máximo do braço	150 (cm)	
$A_{m\acute{i}n}$	Alcance mínimo do braço	100 (cm)	
$Z_i$	Tempo de interação com equipamentos	4 (s)	

Tabela 5. características do braço mecânico.

O tempo de interação com os equipamentos,  $Z_i$ , é o tempo necessário para efetuar a colocação/retirada de um palete em/de uma máquina ou armazém, com o braço mecânico posicionado no ponto de acesso e garra em avanço máximo.

A partir dos dados da tabelas 4 e 5 é possível calcular os tempos de transferência de paletes para utilização no modelo da fig. 8.

### 3.3.2 Cálculo dos tempos

Os tempos de entrada para o modelo são  $Z(u-AF)$ ,  $Z(F-OPR)$  e  $Z(u-DF)$  para o processo de furação e  $Z(u-AI)$ ,  $Z(I-OPR)$  e  $Z(u-DI)$  para o de inspeção. A interpretação foi dada na tabela 3. Cada tempo assinalado é composto por duas parcelas, uma constante e outra variável, designadas, respectivamente, por  $Z(x)c$  e  $Z(x)v$ .

i) Determinação das parcelas constantes: correspondem à situação em que o braço mecânico está posicionado junto ao ponto de acesso a partir do qual inicia a operação. Por exemplo, numa operação de alimentação da máquina de inspeção.  $Z(u - AI)c$  considera que o braço mecânico está posicionado no ponto de acesso de EI (entrada da inspeção).  $Z(u - AI)c$  será então o tempo necessário para pegar um palete em EI e colocá-lo em MI.

i.a)  $Z(u - AF)c$ : a tabela-6 dá os detalhes do cálculo

O fator "d" nas expressões representa os 40 cm entre a garra recolhida e o ponto de acesso de MF e EF (fig. 9). O termo  $Zd$  foi calculado usando a média das distâncias  $d(EF, MF - 1)$  e  $d(EF, MF - 2)$ .  $Z_a$  e  $Z_r$  são computados duas vezes, correspondendo às operações de retirada de palete de EF e sua colocação em MF<sub>i</sub>.

i.b)  $Z(u - DF)c$ : devido à simetria no arranjo físico  $Z(u - DF)c = Z(u - AF)c = 13,94s$ . Note-se que para um arranjo diferente daquele da fig. 9 é necessário um novo cálculo de  $d(e_i, e_j)$ , a partir do qual seria montada a tabela 6 correspondente.

i.c)  $Z(u - AI)c$  e  $Z(u - DI)c$ : o procedimento é o mesmo do item i.a; devido à simetria do arranjo para o processo de inspeção  $Z(u - AI)c = Z(u - DI)c = 13,43s$ .

ii) Determinação das parcelas variáveis: correspondem à situação em que o braço mecânico encontra-se em outra posição que não junto ao ponto de acesso do equipamento onde inicia a operação de carga/descarga. Representam o tempo de deslocamento necessário para ir da posição atual até o ponto de acesso em questão. As parcelas variáveis são representadas por um intervalo fechado onde o limite inferior é zero (posicionamento junto ao ponto de acesso de início de operação) e o limite superior é representado pelo deslocamento a partir do ponto de acesso mais afastado do de destino.

ii.a)  $Z(u - AF)v$ : o limite superior corresponde ao posicionamento junto ao ponto de acesso de SI;  $d(SI, EF) = 575$  cm e  $V_I = 80$ cm/s originam  $Z(u - AF)v = [0,0 : 7,19]$

ii.b)  $Z(u - DF)v$ :  $d(SI, MF - 1) = 630$ cm,  $d(SI, MF - 2) = 345$ cm; o valor médio  $\bar{d}(SI, MF) = 517$  cm;  $Z(u - DF)v = [0 : 6,47]$

ii.c)  $Z(u - AI)v$ :  $d(MF - 1, EI) = 460$  cm;  $Z(u - AI)v = [0,0 : 5,75]$

ii.d)  $Z(u - DI)v$ :  $d(MF - 1, MI) = 575$  cm;  $Z(u - DI)v = [0,0 : 7,19]$

Os tempos  $Z(F - OPR)$  e  $Z(I - OPR)$ , correspondentes aos tempos de operação, são função das características operacionais das máquinas (300 furos/minuto e 30 cm<sup>2</sup>/min respectivamente) e das características das

placas nos paletes. Estas últimas variáveis serão consideradas como variáveis independentes: número de furos para furação e área da placa para inspeção.

### 3.3.3 Aplicação das equações de fluxo

Os tempos determinados na seção anterior serão usados nas equações de cálculo dos períodos de utilização (eq. 1a, 1b e 1c). Para cada período será avaliado o melhor caso (mc, correspondente à utilização da parcela constante do tempo) e o pior caso (pc), correspondente à utilização do limite superior da parcela variável.

$$P(N-F)_{mc} = Z(u-AF)_c + Z(F-OPR) + Z(u-DF)_c = 27.88 + Z(F-OPR)$$

$$P(N-F)_{pc} = Z(u-AF)_c + 7.19 + Z(F-OPR) + Z(u-DF)_c + 6.47 = 41.54 + Z(F-OPR)$$

$$P(N-I)_{mc} = 26.86 + Z(I-OPR)$$

$$P(N-I)_{pc} = 39.8 + Z(I-OPR)$$

Note-se que no cálculo do período do braço mecânico (eq-1) as parcelas  $Z(F-OPR)$  e  $Z(I-OPR)$  não são levadas em conta.

O desempenho do processo de furação,  $D(N-F)$ , será, no melhor caso:

$$D(N-F)_{mc} = Mo(F-DISP) / P(N-F)_{mc} = 2 / [27.88 + Z(F-OPR)]$$

no pior caso:

$$D(N-F)_{pc} = Mo(F-DISP) / P(N-F)_{pc} = 2 / [41.54 + Z(F-OPR)]$$

TERMO	INTERPRETAÇÃO	EXPRESSÃO	VALOR (s)
$Z_a$	Tempo de avanço da garra	$Z_a = d/V_a$	1
$Z_{i-ef}$	Tempo de interação com EF	definido	4
$Z_r$	Tempo de recuo da garra	$Z_r = d/V_r$	1
$Z_d$	Tempo de deslocamento de EF até MF <sub>i</sub>	$Z_d = \frac{d(EF, MF)}{V_e}$	1.94
$Z_a$	Tempo de avanço da garra	$Z_a = d/V_a$	1
$Z_{i-mf}$	Tempo de interação com MF	definido	4
$Z_r$	Tempo de recuo da garra	$Z_r = d/V_r$	1
$Z(u-AF)_c$			13.94

Tabela 6. determinação de  $Z(u-AF)_c$ .

A tabela 7 mostra o valor de  $Z(F-OPR)$  para placas com número crescente de furos, juntamente com os valores correspondentes de  $P((N-F)_{mc})$ ,  $P(N-F)_{pc}$ ,  $D(N-F)_{mc}$  e  $D(N-F)_{pc}$ .

O cálculo das entradas da tabela 7 é óbvio. A tabela 8 corresponde às entradas da tabela-7 para o processo de inspeção.

Os resultados acima mostram o melhor e o pior caso dos processos de furação e inspeção isolados, sem considerar a interação com o braço mecânico. Será fixado o valor  $(p_1, p_2) = (0.5, 0.5)$  para a ponderação das alocações do braço mecânico. A equação 1c fornece:

$$P(N-BM)_{mc} = 0.5(27.88) + 0.5(26.86) = 27.37s$$

$$P(N-BM)_{pc} = 0.5(41.54) + 0.5(39.8) = 40.67s$$

Note-se que o período de utilização do braço mecânico não é afetado pelo aumento no tempo das operações  $Z(F - OPR)$  e  $Z(I - OPR)$ . Com estes valores a taxa de prestação de serviços de carga/descarga de máquinas será, no melhor caso e pior caso (eq. 2c):

$$D(N-BM)_{mc} = 1/P(N-BM)_{mc} = 0.036536$$

$$D(N-BM)_{pc} = 1/P(N-BM)_{pc} = 0.024588$$

As equações 3a e 3b fornecem o desempenho dos processos de manufatura considerando a interação com o elemento de transporte.

### 3.3.4 Análise das curvas

A fig. 10 representa  $D(N-F)_{mc}$  e  $D(N-F)_{pc}$  vs. número de furos das placas. No mesmo gráfico estão repre-

Nº FUROS	Z(F-OPR)	P(N-F) <sub>mc</sub>	P(N-F) <sub>pc</sub>	D(N-F) <sub>mc</sub>	D(N-F) <sub>pc</sub>
100	20	47.88	61.54	0.04177	0.0325
200	40	67.88	81.54	0.02946	0.02453
300	60	87.88	101.54	0.02876	0.01969
400	80	107.88	121.54	0.01854	0.01645
500	100	127.88	141.54	0.01564	0.01413
600	120	147.88	161.54	0.01352	0.01238
700	140	167.88	181.54	0.011913	0.011016
800	160	187.88	201.54	0.010645	0.00992
900	180	207.88	221.54	0.00962	0.00903
1000	200	227.88	241.54	0.00877	0.00828
2000	400	427.88	441.54	0.00467	0.00453
3000	600	627.88	641.54	0.00318	0.003117
4000	800	827.88	841.54	0.002416	0.002376
5000	1000	1027.88	1041.	0.001946	0.00192

Tabela 7.  $Z(F-OPR)$ ,  $P(N-F)$ ,  $D(N-F)$

sentadas as curvas resultantes da interação do processo de furação com o braço mecânico ( $D(F/BM)_{mc}$  e  $D(F/BM)_{pc}$  vs. N-FUROS).

Para placas com número de furos no intervalo 100 a 400 a diferença entre as curvas de desempenho para o melhor e pior caso ( $D(N-F)_{mc}$  e  $D(N-F)_{pc}$ ) é relativamente grande. Esta diferença diminui, tornando-se irrelevante à medida que aumenta N-FUROS; neste caso a parcela mais importante no cálculo de  $D(N-F)$  é o tempo de operação ( $Z(F-OPR)$ ), diminuindo o efeito do tempo de posicionamento do braço mecânico, responsável pela diferença entre o melhor e o pior caso. Na curva  $D(N-F)_{mc}$ , para N-FUROS < 430 o processo de furação, isolado, tem desempenho maior que a taxa de prestação de serviços do braço mecânico, fixa em 0.018268 serviços/seg. O

desempenho do sistema resultante da interação é ditado pelo componente mais lento (eq. 3a), no caso o braço mecânico. O processo de furação apresentará um índice de subutilização das máquinas maior que zero. O mesmo argumento vale para a curva de pior caso  $D(N-F)_{pc}$  para N-FUROS < 600. Para N-FUROS > 430 (melhor caso) e N-FUROS > 600 (pior caso) o tempo de furação  $Z(F-OPR)$  cresce de forma a tornar o processo de furação mais lento que o de carga/descarga (associado ao braço mecânico). O desempenho do sistema resultante da interação é ditado pela furação e o braço mecânico apresentará um índice crescente de subutilização (eq. 4b). A intersecção das curvas de melhor e pior caso para os componentes envolvidos na interação dita a região de desempenho do processo de furação (área sombreada da Fig. 10).

ÁREA (cm <sup>2</sup> )	Z(I-OPR)	P(N-I) <sub>mc</sub>	P(N-I) <sub>pc</sub>	D(N-I) <sub>mc</sub>	D(N-I) <sub>pc</sub>
10	20	46.86	59.8	0.02134	0.01672
20	40	66.86	79.8	0.01495	0.01253
30	60	86.86	99.8	0.01151	0.01002
40	80	106.86	119.8	0.00936	0.00835
50	100	126.86	139.8	0.00788	0.00715
60	120	146.86	159.8	0.00681	0.00626
70	140	166.86	179.8	0.00599	0.00556
80	160	186.86	199.8	0.00535	0.00500
90	180	206.86	219.8	0.00483	0.00455
100	200	226.86	239.8	0.00441	0.00417
200	400	426.86	439.8	0.00234	0.00227
300	600	626.86	639.8	0.00159	0.00156
400	800	826.86	839.8	0.00121	0.00119
500	1000	1026.86	1039.8	0.00097	0.00096

Tabela 8. Z(I-OPR), P(N-I), D(N-I)

A fig. 11 mostra as curvas de subutilização (melhor e pior caso) correspondente à fig. 10. Para  $100 < N\text{-FUROS} < 430$  o processo de furação mostra um índice de subutilização  $U(N\text{-F})_{mc}$  decrescente, enquanto  $U(N\text{-BM}/F)_{mc}$  é zero. Para  $N\text{-FUROS} > 430$   $U(N\text{-F})_{mc} = 0$ , enquanto o braço mecânico mostra um índice de subutilização  $U(N\text{-BM}/F)_{mc}$  crescente. Para o pior caso a argumentação é idêntica, mudando o ponto limite para  $N\text{-FUROS} = 600$ .

As figuras 12 e 13 correspondem à interação do processo de inspeção com o braço mecânico. Note-se que a diferença entre o melhor e o pior caso diminui com o aumento da área das placas a inspecionar. No melhor caso  $D(N\text{-I})_{mc} = D(I/BM)_{mc}$  para placas com  $\text{ÁREA} \approx 14 \text{ cm}^2$ . A partir deste ponto o processo crítico é o de inspeção devido ao crescimento de  $Z(I\text{-OPR})$ . No pior

caso o ponto é deslocado para  $\text{ÁREA} \approx 26 \text{ cm}^2$ . A região sombreada entre as curvas representa a região de desempenho resultante da interação entre os dois sistemas.

Supomos a produção de um lote de  $N$  paletes dos quais  $0.5N$  são paletes de furação e  $0.5N$  são paletes de inspeção. O lote contém placas com  $N\text{-FUROS} = 400$  e  $\text{ÁREA} = 100 \text{ cm}^2$ . O processo de furação apresentará um índice de subutilização de equipamentos entre 0.02 e 0.24 (melhor e pior caso respectivamente, Fig. 11). A diferença é devida a um programa de controle que posicione o braço mecânico de forma a tornar nulo o tempo de deslocamento quando de uma operação de carga/descarga. O desempenho do processo de furação é dado pelo braço mecânico (fig. 11). No processo de inspeção interagindo com o braço mecânico a limitação é imposta pela inspeção (fig. 12); o braço mecânico apresentará um índice

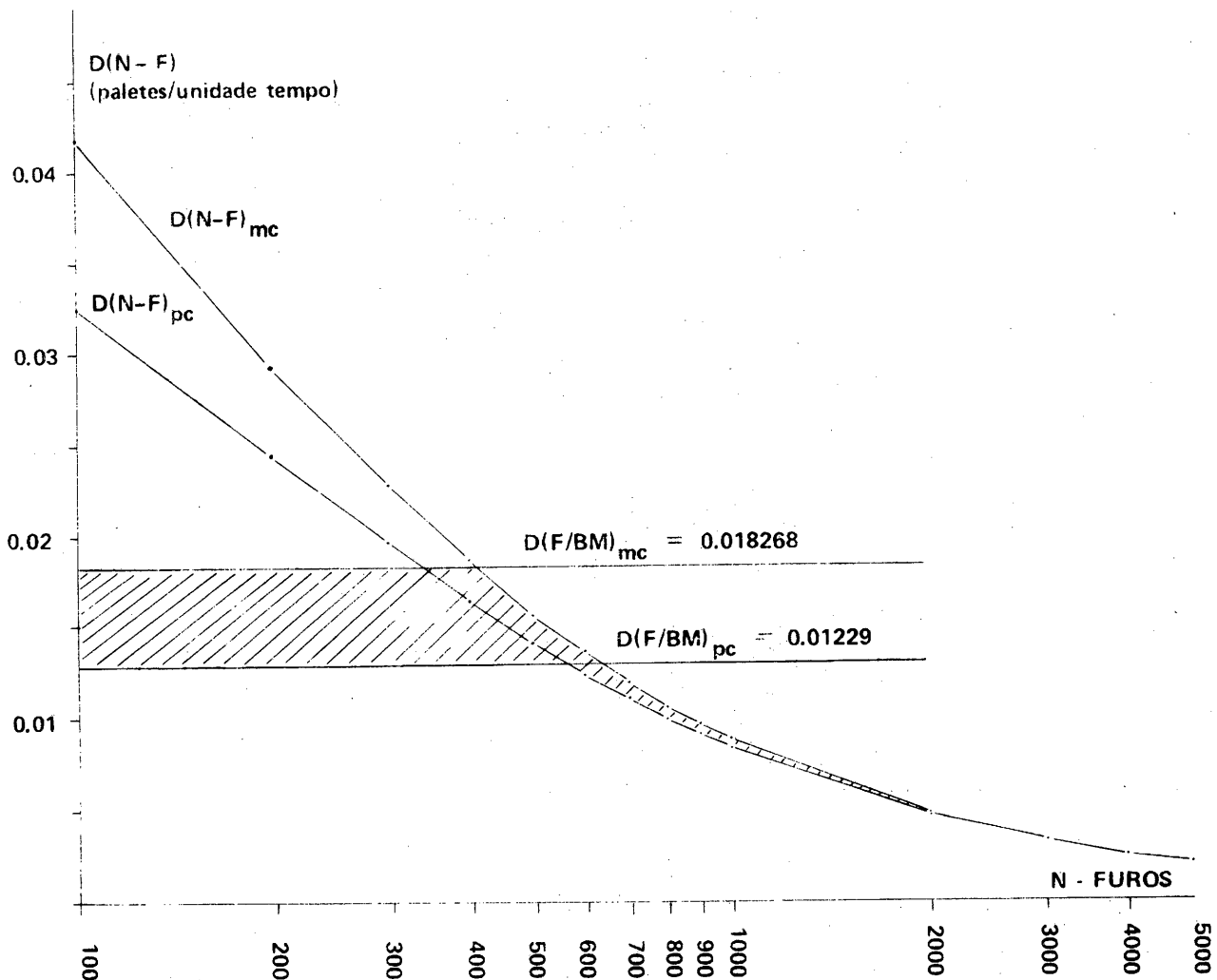


Figura 10.  $D(N\text{-F})$  vs.  $N^\circ$  furos;  $D(F/BM)$  vs.  $N^\circ$  furos.

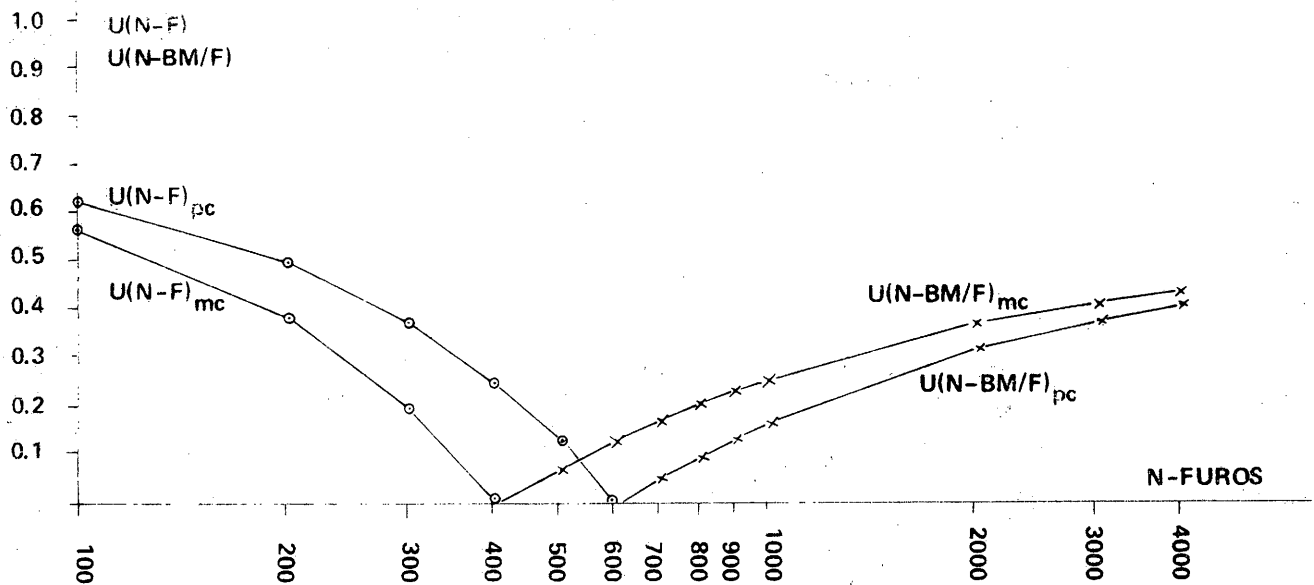


Figura 11.  $U(N-F)$  e  $U(N-BM/F)$  vs. N-FUROS

de subutilização entre 0.38 (melhor caso) e 0.34 (pior caso). Note-se que  $U(BM)_{mc} > U(BM)_{pc}$  é coerente: no melhor caso supõe-se o braço mecânico "bem posicionado" e um índice de subutilização relativamente grande significa a possibilidade de usar um braço mais lento ou a possibilidade de aumentar o número de estações atendidas.

#### 4. CONCLUSÃO

Descreveu-se o processo de modelagem e análise de uma célula de manufatura. Num primeiro passo os aspectos estruturais (arranjos físico dos componentes) e comportamentais (seqüencialização, sincronização e paralelismo dos processos de manufatura) foram capturados em um modelo baseado em redes de Petri temporizadas. Num segundo passo desenvolveram-se as equações que descrevem o fluxo de marcas na rede, obedecendo às restrições impostas na fase de modelagem. Os resultados foram interpretados em termos do desempenho e índices de subutilização.

O desempenho do sistema foi apresentado como um par relacionado aos dois processos de manufatura envolvidos. O cálculo foi efetuado para o melhor e pior caso do sistema. A diferença entre os casos é decorrente do posicionamento do braço mecânico quando da recepção de um sinal (originado do controle da célula) para executar uma tarefa de movimentação de paletes.

O melhor e pior caso analisados correspondem ao máximo e mínimo teórico para um programa de controle de célula que desfrute o possível paralelismo dos processos de manufatura. Em outras palavras, é possível obter valores de desempenho menores que os dados pelo pior caso usando um programa de controle estritamente seqüencial. É óbvio que programas seqüenciais distintos terão desempenho diferentes.

O modelo desenvolvido (rede mais equações de fluxo) é aplicável a qualquer sistema de manufatura restrito a dois processos não seqüenciais compartilhando um elemento de manipulação de paletes. A generalização é derivada da captura dos padrões de alocação, utilização e liberação de recursos pela rede. As alterações decorrentes de mudanças de layout na célula, do número de estações ou das características do elemento de manipulação refletem-se apenas no cálculo dos tempos associados à rede e à marcação inicial dos lugares  $F\_DISP$  e  $I\_DISP$ . A generalização para mais de um elemento de transporte não é imediata: o modelo pode sofrer alterações em função do padrão de alocação dos elementos (intercambiáveis, um elemento alocado ao processo de furação e o outro ao de inspeção, um alocado à função de carga e outro de descarga, etc.).



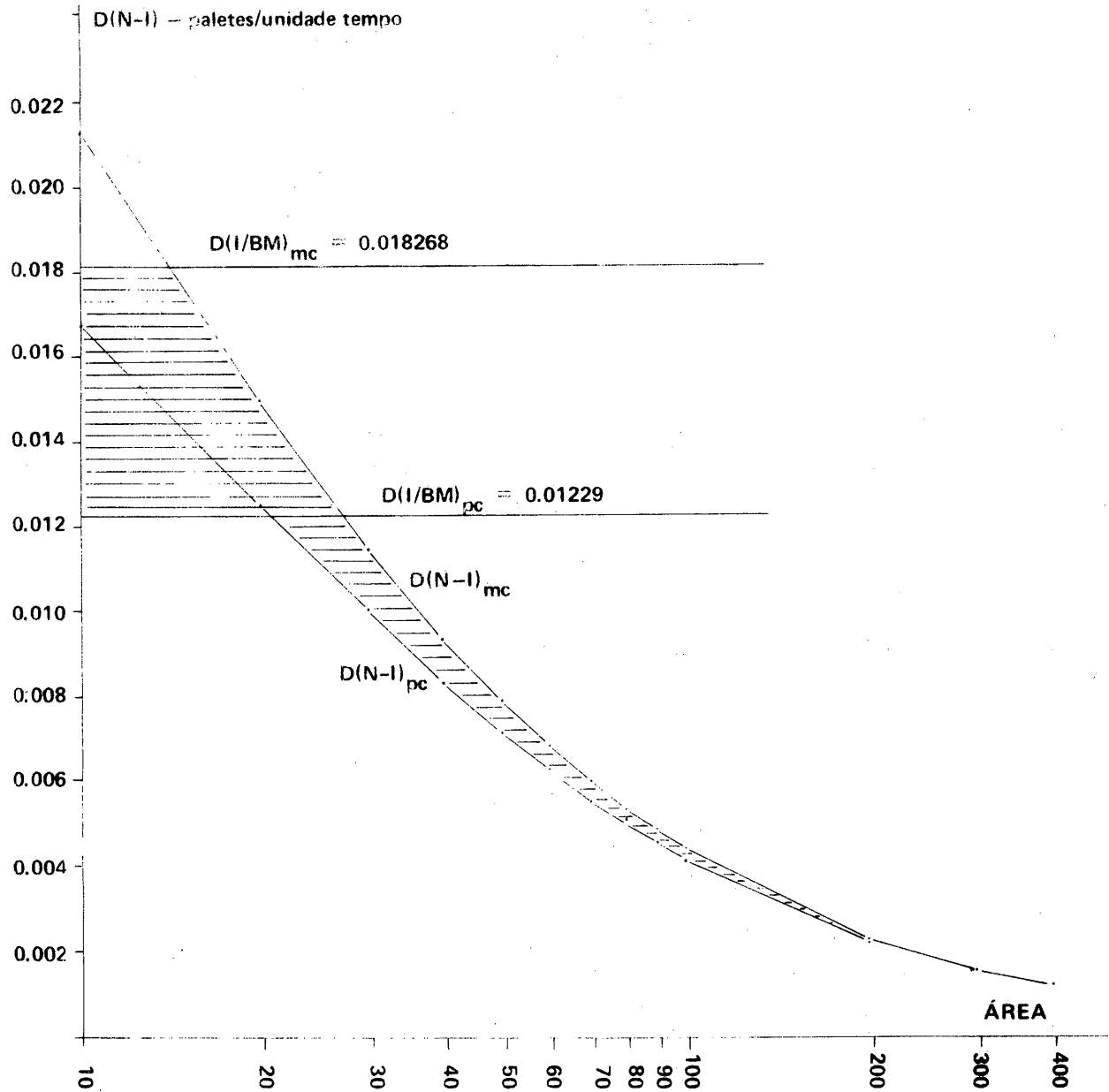


Figura 12.  $D(N-I)$  vs.  $\text{ÁREA}$  ;  $D(I/BM)$  vs.  $\text{ÁREA}$

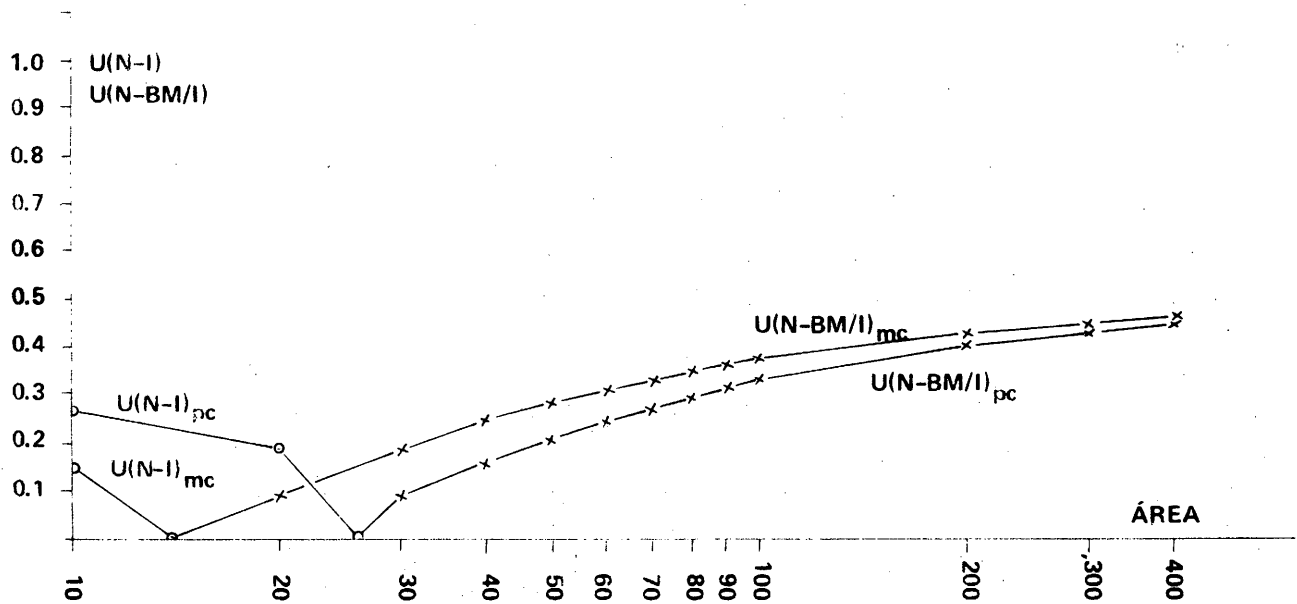


Figura 13.  $U(N-I)$  e  $U(N-BM/I)$  vs.  $\text{ÁREA}$ .

## 5. REFERÊNCIAS

- PETERSON, J. L. (1981), Petri et theory and the modeling of systems. Englewood Cliffs, Prentice-Hall.
- REISIG, W. (1985), Petri nets: an introduction. Springer Verlag, Berlin.
- RICHTER, G. (1985), Clocks and their use for time modeling. In: SERNADAS, A. et alli (eds). Information Systems, Theoretical and Formal Aspects. North-Holland, Amsterdam, pp. 49-66.
- TAZZA, M. (1985), Ein Netztheoretisches Modell zur quantitativen Analyse von Systemen. Berichte de GMD, Nº 149, R. Oldenbourg Verlag, Muenchen.
- TAZZA, M. (1988), Análise quantitativa de sistemas. III EBAI, Curitiba, jan.