

# **UM ESTUDO SOBRE O USO DE ALTERNATIVAS EM PLANOS DE PROCESSO UTILIZANDO TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO E PROJETO DE EXPERIMENTOS**

**Mario Henrique de Mello**

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Dep. de Engenharia Mecânica - GRIMA/GRUCON, Cx. Postal 476, 88040-900, Florianópolis, SC.

E-mail: mariohmello@bol.com.br

**João Carlos Espíndola Ferreira**

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Dep. de Engenharia Mecânica - GRIMA/GRUCON, Cx. Postal 476, 88040-900, Florianópolis, SC.

E-mail: jcarlos@emc.ufsc.br

**Resumo.** *A gestão da produção em muitas empresas ainda é considerada um empecilho para atingir metas mais ousadas. Pois ao invés do impulsionar e gerenciar programas de melhoria, boa parte de seu tempo é dedicado para solucionar problemas decorrentes de falhas no planejamento do processo. Por exemplo, a quebra de uma máquina ou falha nas ferramentas que seriam utilizadas na fabricação de uma determinada peça poderia resultar na impossibilidade de se efetuar o plano de processos. Nesse caso, o processista provavelmente teria que refazer o plano de acordo com as novas circunstâncias. Porém, em função da exigência quanto aos prazos de entrega, essa atividade é realizada sob pressão, isto quando não é realizada pelos próprios operadores ou encarregados de produção. Em ambos os casos, são grandes as chances de erros, podendo gerar novos atrasos e aborrecimento do cliente. Por isso, a presença de alternativas pré-planejadas em planos de processos pode ser vantajosa nesses casos, e prover maior flexibilidade ao sistema de manufatura. Assim, neste trabalho é proposta uma metodologia envolvendo técnicas de simulação e projeto de experimentos, para averiguar se a presença de alternativas resulta em ganhos de produtividade. Os resultados apontam ganhos de produtividade em alguns casos.*

**Palavras-chave:** *plano de processos com alternativas, simulação de processos, projeto de experimentos, gestão da produção.*

## **1. INTRODUÇÃO**

A melhoria de desempenho nos processos de fabricação através do uso de novos procedimentos é um fator chave no contexto atual da produção como fator estratégico nas empresas. Como define Slack et al (2002), “a produção olha para o longo prazo, ela prevê as prováveis mudanças no mercado e na oferta de insumos e desenvolve capacidades que serão exigidas para competir nas condições futuras de mercado”. No entanto, a atividade de gestão da produção em muitas empresas ainda se resume a resolver os problemas que surgem no dia-a-dia. Muitos destes problemas se originaram de falhas no planejamento do processo. Isto porque a maior parte das atividades não podem, em razão da complexidade que isso representaria, ser previstas com exatidão no momento da elaboração de um plano de processos. Por exemplo, como a engenharia de processos poderia prever:

- a quebra de uma máquina?
- a indisponibilidade ou falha de uma ferramenta?
- a indisponibilidade de um elemento de fixação?
- a sobrecarga de uma máquina?

Embora os planos de processo, usualmente, não façam isso, todas essas ocorrências, eventualmente, fazem parte da fabricação da peça cujo plano se refere. Por isso, em algum momento o surgimento de um desses fatos pode vir a se tornar um problema. Nesse caso, a situação ideal seria o processista (indivíduo encarregado da tarefa de elaboração do plano de processos) refazer o plano de acordo com as novas circunstâncias. Porém, em função da exigência quanto aos prazos de entrega, essa atividade é realizada sob pressão, é muitas vezes realizada pelos próprios operadores ou encarregados de produção. Em ambos os casos, são grandes as chances de erros, podendo gerar novos atrasos e aborrecimento do cliente. Além do mais, a eficiência do processo pode ser comprometida, visto que o intuito da intervenção no plano é adequá-lo a uma outra máquina ou ferramenta, e não buscar sua máxima eficiência.

Por isso, a utilização de planos de processos com alternativas pré-planejadas pode vir a se tornar vantajoso nesses casos, pois estas alternativas conferem uma maior flexibilidade ao sistema de manufatura, permitindo que determinada peça possa ser produzida utilizando os recursos disponíveis naquele momento. Isto porque um plano de processo com alternativas pré-planejadas permite a escolha de mais de uma opção de sequência de processamento, e assim, no caso da ocorrência de uma interrupção no chão de fábrica, não ocorrerá atrasos ou a utilização inadequada dos recursos produtivos, pois na impossibilidade de utilizar-se uma máquina ou ferramenta, outra já foi prevista visando garantir os requisitos de qualidade da peça. Ademais, os planos com alternativas permitem planejar a produção visando o aproveitamento de ferramentas já montadas, pois oferece mais de uma opção de ferramental. Assim, podem prover ganhos significativos através da redução do número de *set-ups*<sup>1</sup>.

Por outro lado, um plano de processo tradicional (linear ou fixo) oferece apenas uma sequência de processamento para fabricação de uma peça, e dessa forma, freqüentemente, interrupções ocasionadas por diversos motivos no chão de fábrica levam a atrasos ou utilização inadequada dos recursos de produção. Os atrasos resultam da necessidade de elaborar um novo plano visando contornar o motivo da interrupção, enquanto a utilização inadequada dos recursos pode ocorrer devido ao planejamento não ser realizado pelo processista ou realizado sob pressão, conduzindo a erros.

Trabalhos anteriores já foram realizados visando analisar a presença de alternativas em planos de processos, porém considerou-se um cenário diferente do proposto neste artigo. Na proposta apresentada por Ferreira e Wysk (2001a), eles avaliaram a eficiência de alternativas em planos de processo utilizando simulação e projeto de experimentos, sendo que seus resultados foram restringidos a um sistema de manufatura composto por uma máquina em condições ideais, isto é, ausência de quebras ou sobrecargas de máquina ou falha nas ferramentas (quebra ou desgaste). Os pesquisadores utilizaram ainda um modelo para o cálculo da produtividade baseado num tempo fixo de produção, enquanto a quantidade de peças era variável. Esse procedimento não garante as mesmas condições para todos os testes, uma vez que a quantidade de peças utilizadas em cada teste não é a mesma.

Xirouchakis et al (1997) avaliaram a influência da sequência de processamento em relação ao custo de usinagem de uma peça. Nesse estudo o objetivo era evidenciar qual era a sequência de usinagem num plano de processo com alternativas que conduzia ao menor custo. Já Kruth e Detand (1992) apresentaram uma aplicação de planos de processos com alternativas num sistema CAPP (Planejamento do Processo Assistido por Computador). Esses autores concluíram que planos de processo com alternativas aumentam a flexibilidade de programação e controle do chão de fábrica. Além disso, eles comentam que planos de processo com alternativas são interessantes não somente

---

<sup>1</sup> Tempo utilizado para realizar a preparação do sistema para fabricação de um novo lote de peças.

para o chão de fábrica tradicional, como também para células flexíveis de manufatura e células flexíveis de montagem, constituindo uma alternativa à troca de ferramentas.

Uma abordagem considerando os benefícios da tecnologia de grupo é realizada por Rajamani et al (1990), onde famílias de peças e grupos de máquinas são formadas simultaneamente. Segundo aqueles autores, rotas alternativas em planos de processo podem resultar numa eficiente utilização dos recursos. Larsen e Alting (1992) mostram uma visão conjunta de planejamento do processo e da produção, como uma extensão dos conceitos de engenharia simultânea. O efeito da utilização de rotas alternativas segundo esses autores é o aumento da produtividade.

No cenário analisado neste artigo, é realizada a simulação de um sistema de manufatura composto por um centro de usinagem capaz de realizar todas as operações nas peças consideradas, como sugerem Ferreira e Wysk (2001a). Entretanto, este sistema de manufatura não opera em condições ideais pois uma eventual falha nas ferramentas pode ocorrer (reafiação ou troca). Além do mais, o modelo para o cálculo da produtividade é realizado considerando um tempo variável para a fabricação de cinco lotes de peças. Uma descrição do modelo utilizado e os resultados obtidos são apresentados nos próximos itens.

## 2. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

### 2.1. Simulação de Processos

Para simular o uso de alternativas em planos de processo, foi desenvolvido um software protótipo, o qual realiza a simulação de um sistema de manufatura em computador. Este software permite analisar o efeito de diferentes níveis dos fatores de controle sobre a produtividade. A análise da influência desses fatores é realizada utilizando as técnicas de projeto de experimentos. Tais técnicas são úteis para se verificar se determinado fator influencia, ou não, a resposta de um sistema. Na definição de Montgomery (1997), “um experimento consiste em um teste, ou série de testes, no qual proposições são realizadas através da escolha de fatores de um processo ou sistema, que permitem observar e identificar as razões da alteração dos resultados”.

Os fatores de controle são variáveis do processo cujo valor é possível controlar. Neste trabalho, foram considerados os mesmos fatores de controle apresentados por Ferreira e Wysk (2001a), os quais estão relacionados à formação da peça (número de *features*<sup>2</sup> por peça, a variedade de *features*, quantidade de *features* duplas), formação do lote (quantidade do lote e seqüência do lote) e ao sistema de manufatura (capacidade do carrossel e tipo de plano de processo). Os fatores apresentados, bem como seus respectivos níveis são mostrados na Tab. (1).

Tabela 1. Fatores de controle e níveis considerados na simulação.

Fatores	Níveis	Fatores	Níveis	Fatores	Níveis
Variedade de peças	Baixo	Número de <i>features</i> duplicadas	Baixo	Capacidade do carrossel	Baixo
	Médio		Médio		Alto
	Alto		Alto	Tipo de plano de processo	Baixo
Número de <i>features</i> por peça	Baixo	Quantidade do lote	Baixo		Alto
	Médio		Médio	Seqüência do lote	Baixo
	Alto		Alto		Alto

O projeto de experimentos aqui realizado inclui os seguintes objetivos:

- determinar quais os fatores de controle que mais influenciam a produtividade;
- determinar a influência do tipo de plano de processo sobre a produtividade;
- determinar quais os níveis dos fatores de controle que conduzem ao maior aumento, ou redução, da produtividade com o uso de alternativas em plano de processo.

<sup>2</sup> Uma *feature* consiste numa forma geométrica a qual estão associadas informações que são úteis para sua fabricação, tais como dimensões, rugosidade, tolerâncias, etc.

É importante ressaltar que o projeto de experimentos não se limita somente à análise, envolve também a organização e condução de um experimento. Além disso, a aplicação de técnicas de projeto de experimentos aliada ao emprego de métodos de simulação permite obter maior confiabilidade nos resultados da simulação. Segundo Freitas Filho (2001), “resultados de modelos de simulação desprovidos de análises com base estatística têm pouca validade científica e podem facilmente induzir a erros”.

## 2.2. Planejamento Experimental

A simulação foi realizada considerando três replicações para cada fator, cada replicação foi realizada mantendo-se o nível de alguns fatores enquanto o nível de outros se altera. Todas as possíveis combinações dos fatores foram consideradas, assim o experimento caracteriza-se como um projeto fatorial completo. “Nesse tipo de projeto os efeitos de um fator são estimados em vários níveis dos outros fatores, permitindo conclusões válidas acima do intervalo das condições experimentais” (Montgomery, 1997). Esse tipo de experimento é necessário quando interações entre os fatores devem ser mostradas a fim de evitar conclusões diversas (Montgomery, 1997).

Assim, tem-se 4 fatores com 3 níveis cada um e 3 fatores com 2 níveis cada um, isso resulta num total de  $3^4 + 2^3 = 648$  experimentos. Como são consideradas 3 replicações para cada fator, tem-se  $3 \times 648 = 1944$  experimentos. Os processos envolvidos na simulação são mostrados na Fig. (1), e descritos mais detalhadamente nos itens seguintes.

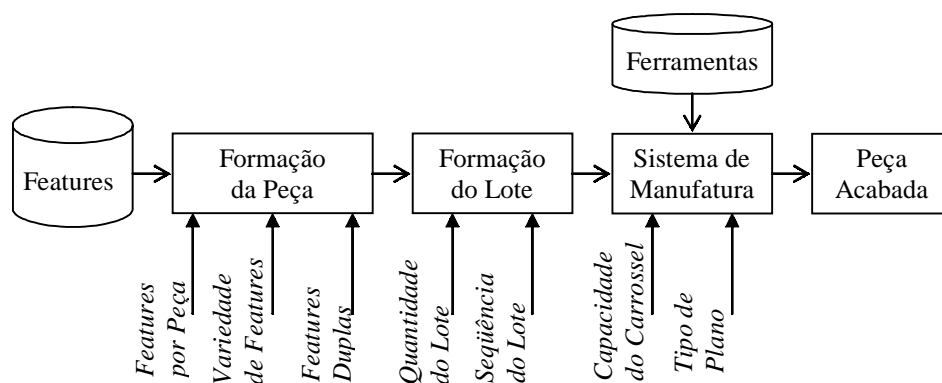


Figura 1. Processos envolvidos na simulação do processo de manufatura

### 2.2.1. Formação da peça

Nessa etapa são formadas peças prismáticas compostas por quatro tipos de *features*: furo, rebaixo, canal e cavidade retangular, como mostra a Fig. (2). Ao todo, foram consideradas 45 *features* diferentes, cujas dimensões estão definidas na Tab. (2).

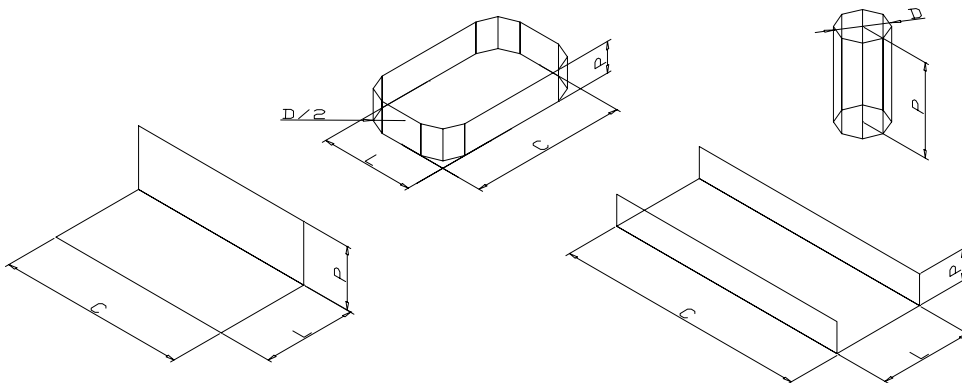
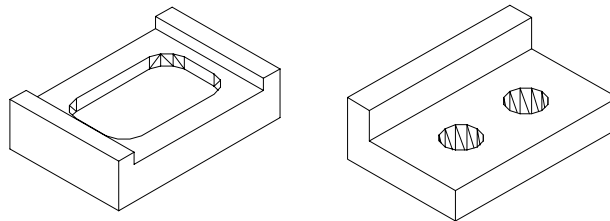


Figura 2. *Features* utilizadas na formação das peças

Tabela 2. Dimensões da *features* utilizadas na simulação

Furo			Rebaixo				Canal				Cavidade				
cod.	D (mm)	P (mm)	cod.	C (mm)	L (mm)	P (mm)	cod.	C (mm)	L (mm)	P (mm)	cod.	C (mm)	L (mm)	P (mm)	D (mm)
1	11	8	16	80	8	4	26	95	8	6	36	65	25	6	5
2	12	13	17	85	11	5	27	85	13	6	37	55	27	8	10
3	13	17	18	90	12	6	28	80	16	7	38	60	30	6	8
4	14	18	19	100	14	4	29	90	20	8	39	60	32	4	8
5	15	21	20	95	16	5	30	80	21	8	40	70	35	4	10
6	16	22	21	70	18	5	31	75	25	4	41	75	40	8	12
7	17	25	22	80	23	7	32	100	30	7	42	50	40	5	12
8	18	25	23	70	24	6	33	90	32	8	43	80	50	7	12
9	19	26	24	90	25	6	34	100	35	5	44	80	55	5	12
10	20	27	25	100	30	5	35	95	38	6	45	50	60	6	10
11	21	28													
12	22	28													
13	23	28													
14	24	30													
15	25	31													

A formação de cada peça só é possível após a definição de três fatores: número de *features* por peça, variedade de *features* e quantidade de *features* duplicadas, pois são eles que irão influenciar a complexidade da peça a ser formada. Assim, por exemplo, considerando o nível dos três fatores como baixo (para o caso de baixa complexidade), algumas peças possíveis são mostradas na Fig. 3. Maiores detalhes sobre o processo de formação das peças podem ser encontrados em Ferreira e Wysk (2001a).

Figura 3. Exemplos de peças compostas por dois tipos de *features*

### ***Variedade de features***

Consiste na quantidade de *features* diferentes numa mesma seqüência de fabricação. Cada seqüência de fabricação é constituída por cinco lotes diferentes de peças. São considerados três níveis para esse fator: baixo, médio e alto. Por exemplo, no caso de alta variedade de peças, todas as *features* presentes na próxima peça a ser usinada deverão ser diferentes da atual.

### ***Número de features por peça***

Corresponde ao número de *features* diferentes em cada peça. São definidos três níveis para esse fator: baixo, médio e alto; por exemplo, no caso um elevado número de *features* por peça, todas as *features* que constituem a peça devem ser diferentes.

### ***Número de features duplicadas***

Esse fator considera a quantidade de *features* iguais em cada peça, sendo que são definidos três níveis: baixo, médio e alto. Por exemplo, um alto número de *features* duplicadas corresponde à existência de uma mesma *feature* várias vezes na mesma peça.

### 2.2.2. Formação do lote

Para cada uma das cinco peças geradas, são formados cinco lotes de peças, cujas quantidades e a sequência são definidas por dois fatores: quantidade do lote e sequência do lote, respectivamente.

#### *Quantidade do lote*

Refere-se à quantidade de peças em cada lote. Foram selecionados três níveis para esse fator: baixo, médio e alto. Por exemplo, um lote com quantidade de peças com um nível alto significa a existência de lotes com até 500 peças.

#### *Sequência do lote*

A sequência do lote refere-se à ordem que as peças serão fabricadas. Esse fator foi dividido em 2 níveis: aleatório e fixo. A sequência aleatória gera uma sequência diferente de peças para cada replicação realizada, já a fixa gera apenas uma sequência que será usada em todas as replicações.

### 2.2.3. Sistema de manufatura

O sistema de manufatura realiza a usinagem dos lotes de peças de acordo com a sequência e quantidades definidas pelas duas etapas anteriores. Assim o sistema de manufatura gera os dados necessários para o cálculo da produtividade, como será visto mais adiante. A fabricação dos lotes pode ser influenciada por dois fatores: capacidade do carrossel ou tipo de plano, respectivamente.

#### *Capacidade do carrossel*

Considerou-se dois níveis para esse fator: baixo e alto. O nível baixo corresponde a um carrossel com capacidade de armazenar até 12 ferramentas, enquanto o nível alto corresponde a um carrossel com capacidade de armazenamento de 24 ferramentas.

#### *Plano de processo*

Corresponde ao tipo de plano, linear ou com alternativas, utilizado para fabricação da peça. Esse fator possui dois níveis: baixo e alto. O nível baixo caracteriza um plano linear, ou seja, que dispõe de apenas uma alternativa, enquanto o nível alto consiste num plano alternativo, o qual contém duas alternativas. As alternativas consideradas constituem alternativas de ferramenta, assim, num plano com duas alternativas, caso alguma das ferramentas necessárias para a usinagem do lote não esteja disponível no magazine da máquina, uma outra ferramenta previamente selecionada pode ser selecionada caso esteja disponível.

### 2.3. Simulação do sistema de manufatura

Na simulação do sistema de manufatura considerou-se máquina, dispositivo de fixação e ferramenta. A máquina consiste de um centro de usinagem CNC capaz de fabricar todas as *features* selecionadas, cuja quantidade de ferramentas que podem ser armazenadas no magazine varia em função do fator capacidade do carrossel. O dispositivo de fixação considerado permite fixar qualquer uma das peças sem a necessidade de substituí-lo. Quanto às ferramentas de corte, optou-se pela utilização de ferramentas de aço rápido (brocas, alargadores e fresas de topo) e insertos de metal duro (fresas de mandrilar e fresas de topo). As ferramentas podem ser estocadas no magazine da máquina ou num armazém local. As condições de corte, usadas para o cálculo dos tempos de usinagem, foram obtidas através de catálogo (Metcut, 1980). O material para a fabricação das peças consiste de barras de seção retangular de aço SAE 4140 com dureza de 230 HB. O cálculo do tempo de usinagem para cada *feature* foi realizado de acordo as equações propostas por Ferreira e Wysk (2001b). Os resultados obtidos do cálculo dos tempos de usinagem para a primeira e segunda alternativa são mostrados na Fig. (4).

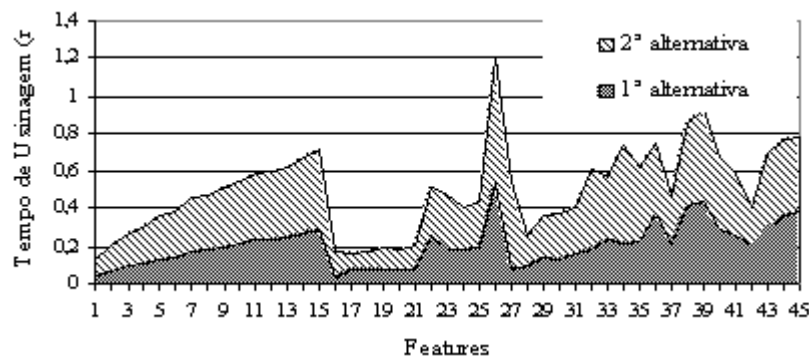


Figura 4 - Tempos de usinagem para a 1ª e 2ª alternativa

Para cada *feature* foi definida uma estratégia para o uso de ferramentas alternativas. Por exemplo, para a usinagem de um canal, na indisponibilidade de uma fresa com diâmetro igual a largura do canal, pode-se selecionar uma fresa de diâmetro menor. Entretanto a eficiência da usinagem será reduzida, visto que uma fresa menor irá necessitar de uma quantidade maior de passes, e, em alguns casos, uma velocidade de corte e/ou avanço menores. Assim os tempos de usinagem da segunda alternativa sofreram um acréscimo de tempo de 60% em média. As estratégias de manufatura para a primeira e segunda alternativa em cada *feature* utilizadas neste trabalho foram adaptadas do trabalho de Ferreira e Wysk (2001a).

O processo de simulação se inicia com a formação das peças, dada pela definição do nível dos fatores: número de *features* por peça, variedade de *features* e números de *features* duplas. Em seguida são formados os lotes para cada peça através da definição do nível dos fatores: quantidade do lote e sequência do lote. Os cinco lotes gerados chegam simultaneamente ao sistema de manufatura, onde são processados de acordo com a sua sequência de chegada, ou seja, o primeiro lote a entrar é o primeiro a sair (PEPS). O processamento de cada lote é realizado como se não houvesse o próximo, ou seja, nenhuma informação sobre o próximo lote é utilizada para carregamento das ferramentas no magazine. Logo, a configuração inicial do magazine de ferramentas usada em todas as replicações é a mesma, e foi gerada aleatoriamente.

Antes do processamento dos lotes são definidos os níveis dos fatores: capacidade do carrossel e tipo de plano. No processamento de cada lote, primeiro o software verifica se a estação de trabalho esta disponível, se a estação estiver ocupada, o lote deverá aguardar o termino da operação. No caso da disponibilidade da estação, o software seleciona a primeira peça da sequência, e verifica quais as *features* da peça. Se a ferramenta para a usinagem dessa *feature* não estiver no magazine, o software verifica se o plano tem alternativas, se sim, ele verifica se a ferramenta alternativa está disponível no magazine, do contrário efetua-se a troca da ferramenta. O tempo de usinagem para cada *feature* é calculado de acordo com o tipo de *feature*: furo, rebaixo, canal ou cavidade.

A vida da ferramenta foi previamente definida em horas de utilização, baseada no valor médio dos parâmetros de corte para cada *feature*. Quando uma operação está para ser executada um valor para a durabilidade da ferramenta (em horas) é gerado aleatoriamente baseado numa distribuição exponencial com média igual a vida. Assim após a usinagem de cada *feature*, o valor da durabilidade da ferramenta é reduzido no valor correspondente ao tempo de utilização. O tempo de utilização de uma ferramenta é incrementado cada vez que essa ferramenta é solicitada para usinagem de uma *feature*. Uma falha na ferramenta pode ocorrer quando o tempo de utilização para a ferramenta selecionada for maior que a durabilidade gerada. Quando uma ferramenta falha, não é utilizada uma ferramenta alternativa pois o tempo de troca do inserto, ou da própria ferramenta, é menor que o tempo gasto para informar ao comando da máquina a nova ferramenta ativa, caso haja outra. Por isso é mais vantajoso trocar o inserto que usar uma ferramenta alternativa. O tempo de transporte foi desprezado, pois foi assumido que todos os recursos produtivos estão próximos. Algumas das etapas descritas acima quando se considera apenas uma máquina, como neste trabalho, são mostradas na Fig. (5).

Cada *feature* é usinada até se esgotar a quantidade de *features* duplicadas. O tempo total para fabricação de cada lote é obtido pela Equação (1):

$$t_{prod} = t_{setup} + t_{prog} + q_{lote} * (t_{carr} + t_{descarr} + q_{features} * (t_{usi} + t_{falha})) \quad (1)$$

Onde:

$t_{prod}$ : tempo total de produção do lote;

$t_{set-up} = 10$  min.: tempo de set-up das ferramentas, ou seja, tempo para troca das ferramentas que não estão no magazine;

$t_{prog} = 1$  min.: tempo de alteração do programa CNC da peça para incluir uma outra ferramenta, caso ela venha a ser utilizada;

$t_{carr} = 1$  min.: tempo de carregamento das peças;

$t_{descarr} = 1$  min.: tempo de descarregamento das peças;

$q_{features}$ : quantidade de *features* duplicadas definidas pelo nível do fator nº de *features* duplicadas;

$t_{usi}$ : tempo de usinagem de cada feature, varia em função da complexidade da peça e da quantidade do lote;

$t_{falha} = 1$  min.: tempo de necessário para substituir uma ferramenta ou inserto no caso de falha.

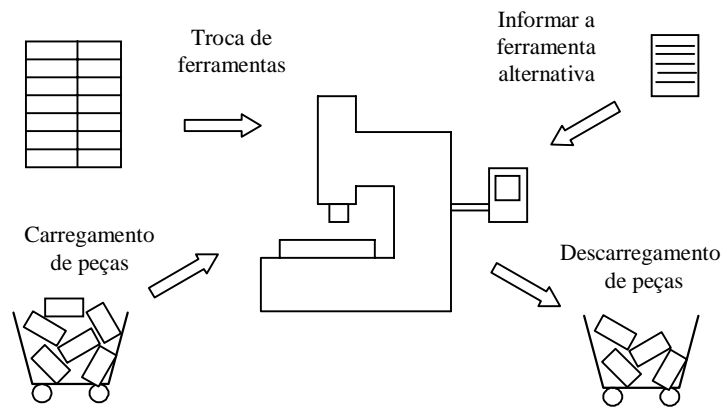


Figura 5 – Atividades relacionadas ao sistema de manufatura

Após o processamento de todos os lotes da sequência é calculada a produtividade utilizando-se a seguinte Equação (2).

$$produtiv = n_{peças} / t_{prod} \quad (2)$$

Onde:

$n_{peças}$ : é igual a soma do numero de peças de todos os lotes;

$t_{prod}$ : consiste no tempo total de produção de todos os lotes, calculado em (1).

Para definição desse modelo de simulação, foram incorporados modelos propostos nos trabalhos de Naylor et al.(1966), Freitas Filho (2001) e Ferreira e Wysk (2001a).

### 3. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Alguns resultados obtidos na simulação são mostrados na Tab. (3). Para os fatores com três níveis os números 1, 2 e 3 estão relacionados aos níveis baixo, médio e alto respectivamente. Já para os fatores com dois níveis os números 1 e 2 estão relacionados aos níveis baixo e alto respectivamente.



#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A influência de cada fator na produtividade pode ser obtida através da análise dos efeitos principais, mostrados na Fig. (6).

Os fatores número de *features* por peça, variedade de *features* e quantidade de *features* têm uma influência negativa na produtividade, ou seja, quanto maiores seus níveis, menor a produtividade. Isto é coerente com o que ocorre na prática, pois quanto maior a complexidade de uma peça e maior a variedade de lotes que o sistema processa, menor a produtividade esperada. Já o fator quantidade do lote, influencia positivamente a produtividade, isto é, quanto maior o nível desse fator maior a produtividade. Isso também é coerente com o que se encontra na prática, pois quanto maior o tamanho dos lotes processados por um sistema de manufatura, menor será o tempo consumido em *set-up* de ferramentas quando comparado com um sistema de manufatura que processa lotes menores.

Tabela 3. Alguns dos resultados obtidos na simulação

Fatores							Respostas	
Nº de Feat./pç	Varied. Feat.	Qde. Feat	Qde. Lote	Seq. Lote	Capac. carr.	Tipo Plan.	Falhas Ferram.	Produtiv. (pçs/h)
1	1	1	1	1	1	1	0	8,125
1	1	1	1	1	1	2	0	8,62
1	1	1	1	1	2	1	0	8,13
1	1	1	1	1	2	2	0	9,07
1	1	1	1	2	1	1	0	8,571
1	1	1	1	2	1	2	0	8,619
1	1	1	1	2	2	1	0	8,571
1	1	1	1	2	2	2	0	9,070

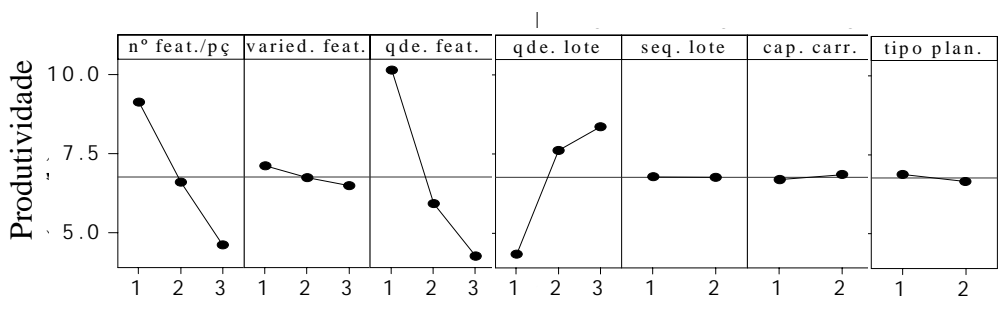


Figura 6. Efeito dos fatores na produtividade

Quanto ao fator seqüência do lote, verifica-se que não houve influência na produtividade quando o nível desse fator é variado. Isso pode ter ocorrido pelo fato de ambos os níveis das seqüências terem sido geradas aleatoriamente, assim sendo, são idênticas.

Verificou-se também um aumento na produtividade quando o fator capacidade do carrossel está situado num nível mais alto, ou seja, quando sistema de manufatura utiliza um carrossel com capacidade para armazenar 24 ferramentas ao invés de 12. Isto também condiz com a realidade industrial, uma vez que ao se utilizar um magazine de ferramentas com maior capacidade, a quantidade de trocas de ferramentas é reduzida.

Finalmente, quanto ao fator tipo de plano verificou-se uma pequena redução da produtividade quando o nível desse fator aumenta, isto é, quando se utiliza alternativas no plano de processos. Logo na condição onde todas as possibilidades simuladas estão presentes, ou seja, os outros fatores são testados em todos os níveis, sua utilização não se mostrou vantajosa. Por isso, é necessário averiguar para quais condições de manufatura a utilização do plano de processos com alternativas é vantajosa. Calculando-se o acréscimo de produtividade do plano de processos com alternativas em relação ao plano de processos sem alternativas, e classificando os resultados em ordem decrescente verificou-se que o plano de processos com alternativas pode ser vantajoso para alguns níveis dos outros fatores, como mostra a Tab. (4). Outra análise semelhante, considerando o incremento de produtividade do plano sem alternativas

com relação ao plano com alternativas também foi realizada, visando obter as condições nas quais o plano de processos com alternativas pode ser desvantajoso, é apresentada na Tab. (5).

Vale lembrar que o uso de alternativas não se mostrou vantajoso em alguns casos porque neste trabalho foi admitida uma penalidade quando uma alternativa é utilizada, ou seja, optou-se por uma estratégia de manufatura menos eficiente quando uma alternativa é utilizada. Assim, os tempos de usinagem para a segunda alternativa aumentaram em média 60%, como foi mostrado na Fig. (4). E ainda foi considerada uma durabilidade menor para algumas ferramentas da segunda alternativa em relação a primeira, o que aumenta a quantidade de falha nas ferramentas e, conseqüentemente, sua necessidade de troca. Ainda assim em alguns casos o ganho em produtividade com o uso de alternativas chegou a 18%, já que a utilização de alternativas reduz a necessidade de *set-ups*.

Tabela 4. Ganho do plano com alternativa em relação ao plano sem alternativa

nº feat./ peça	varied. feat.	qde. feat.	qde. lote	ganho (%)
médio	médio	baixo	baixo	18,01
médio	alto	baixo	baixo	12,19
alto	alto	baixo	baixo	11,34
baixo	alto	baixo	baixo	9,77
alto	médio	baixo	baixo	7,83
médio	baixo	baixo	baixo	7,35
médio	médio	médio	baixo	6,81
médio	alto	médio	baixo	5,44

Tabela 5. Ganho de produtividade sem alternativa com relação ao alternativo

nº feat./ peça	varied. feat.	qde. feat.	qde. lote	ganho (%)
baixo	médio	alto	alto	19,23
baixo	médio	médio	m	14,35
baixo	alto	alto	alto	12,85
alto	alto	alto	médio	12,71
alto	médio	alto	médio	12,35
médio	médio	alto	médio	11,74
alto	médio	médio	alto	10,91
alto	alto	médio	médio	10,84

Para se verificar o fator que mais influencia na produtividade, realizou-se um teste F, que relaciona a variância devido ao efeito do fator com a variância do erro. O nível de significância representa a probabilidade de aceitar uma hipótese falsa. Os resultados obtidos nesse teste estão apresentados no Tab. (6). Assim, percebe-se que o fator que mais influencia a produtividade é a quantidade de *features* duplas. Isso se deve ao fato de que uma maior quantidade de *features* duplas implica num menor tempo de *set-up*, visto que aumenta a quantidade de *features* usinadas utilizando uma mesma ferramenta.

Tabela 6. Valores obtidos na análise de variância (ANOVA)

Fator	F	Nível de significância (%)	Efeito é significativo?
Nº <i>features</i> por peça	101,243	0,0	Sim
Variedade de <i>features</i>	1,485	22,7	Sim
Quantidade de <i>features</i> duplas	240,772	0,0	Sim
Quantidade do lote	88,395	0,0	Sim
Seqüência do lote	0,000	99,1	Não
Capacidade do carrossel	0,265	60,7	Não
Tipo de plano	0,565	45,3	Sim

\*considerado um nível de significância de 5%.

Vale lembrar que na análise dos efeitos principais os efeitos de vários fatores estão sobrepostos. Assim, mesmo que um tipo de plano venha a beneficiar a produtividade, a influência do nível de um outro fator, como a quantidade do lote, pode beneficiar mais um tipo de plano que o outro. Logo uma investigação do efeito da interação entre os demais fatores no tipo de plano é necessária, como mostra a Fig. (7). Onde uma pequena interação é verificada em alguns casos, entretanto insuficiente para gerar um efeito significativo. Portanto pode-se concluir que os resultados anteriores são válidos, ou seja, a interação entre os fatores não prejudicou a análise.

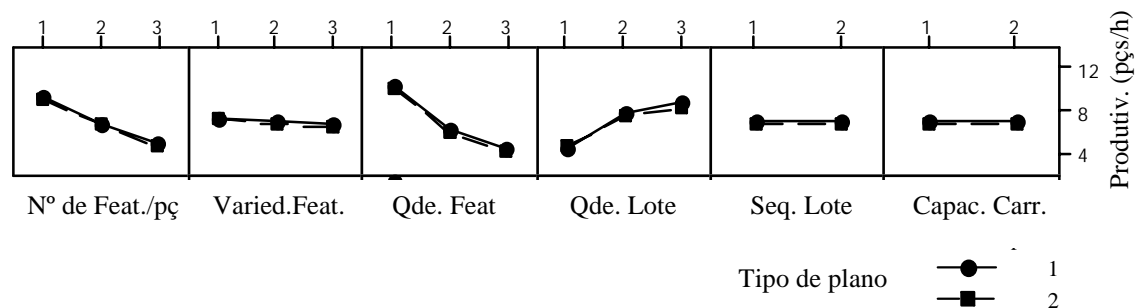


Figura 7. Interação do tipo de plano com outros fatores

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A metodologia para simular planos de processos se baseia em Ferreira e Wysk (2001a), que investigaram a influência de alternativas em planos de processos sob condições ideais (ausência de quebras de máquinas ou falha nas ferramentas). Porém no estudo aqui realizado, foram incorporados alguns aspectos visando refinar o modelo de simulação proposto por aqueles autores. Assim, considerou-se a possibilidade de falha nas ferramentas e um modelo para o cálculo da produtividade baseado num tempo variável de fabricação e quantidade fixa de peças. Assim, foi possível identificar as condições de manufatura (variedade de peças, tamanho do lote, entre outras) para as quais obtém-se os maiores ganhos em produtividade com a utilização de alternativas.

Resultados semelhantes aos obtidos neste trabalho também foram obtidos por Ferreira e Wysk (2001a) para os fatores considerados, a exceção do tipo de plano. Enquanto neste estudo o uso de alternativas quando o nível de todos os outros fatores varia não provê benefícios, no trabalho daqueles autores verificou-se um incremento na produtividade. Isso pode ter ocorrido em razão daqueles autores não considerarem a possibilidade de falha nas ferramentas, pois uma durabilidade menor é considerada neste trabalho para algumas ferramentas quando a segunda alternativa é selecionada, incorrendo numa menor produtividade já que a quantidade de trocas de ferramentas aumenta.

Como se verificou na análise dos resultados, a utilização alternativas pode conduzir em alguns casos a um aumento na produtividade, como também a perdas. Entretanto é necessário fazer uma ressalva quanto às perdas evidenciadas, pois, talvez, esteja sendo considerada uma penalidade excessiva no tempo de usinagem quando uma alternativa é selecionada. Isto não significa dizer que esses tempos devam ser iguais, pois não convém manter em estoque duas ferramentas idênticas, mas que diferenças menores entre os tempos de usinagem da primeira e da segunda alternativa podem reduzir significativamente essas perdas.

Os resultados conduzem a existência de um ponto de equilíbrio na utilização de alternativas em função da quantidade do lote e variedade de peças, para o qual o uso de alternativas deixa de ser benéfico. Quando o lote é grande e a variedade é baixa, a utilização de uma ferramenta de menor eficiência não é benéfica pois o tempo de processamento é grande o suficiente para reduzir a influência do tempo de *set-up*. Entretanto para lotes pequenos e variedade grande, os tempos de processamento são menores e portanto o tempo de *set-up* influencia bastante a produtividade.

Além do mais, neste estudo foi considerada apenas uma máquina, e as alternativas em planos de processo refere-se somente à seleção de ferramentas. Outros tipos de alternativas poderiam ser consideradas, como a seleção de diferentes máquinas, dispositivos de fixação, ou rotas de processamento, o que poderia trazer ganhos de produtividade bem maiores que aqueles evidenciados. Por isso, os autores pretendem no futuro realizar uma nova investigação do uso de alternativas considerando uma quantidade maior de máquinas.

## 6. REFERÊNCIAS

- Ferreira, J. C. e Wysk, R. A, 2001a, "On the Efficiency of Alternatives in Process Plans", Journal of de Brazilian Society Mechanical Sciences, Vol. 23, Nº 3, pp. 303-319.
- Ferreira, J. C. e Wysk, R. A, 2001b, "An Investigation of the Influence of Alternative Process Plans on Equipment Control", Journal of Manufacturing Systems, Vol. 19, Nº 6, pp. 393-406.
- Freitas Filho, P., 2001, "Introdução a Modelagem e Simulação de Sistemas", Ed. Visual Books.
- Kruth, J. P. e Detand, J., 1992, "A CAPP System for Non Linear Process Planning", Annals of the CIRP, Vol. 41, Nº 1, pp. 489-492.
- Larsen, N. E. e Alting, L., 1992, "Dynamic Planning Enriches Concurrent Process and Production Planning", Int. Journal of Productioun an Research, 30 (8), pp. 1861-1876.
- Metcut Research Associates, 1980, "Machining Data Handbook", Vol. 1, 3th ed.
- Montgomery, D.C., 1997, "Design and Analysis of experimets", 4th ed., John Wiley & Sons.
- Naylor, T.H., et al, 1966, "Computer Simulation Techniques", John Wiley & Sons.
- Rajamani, D., Singh, N., and Aneja, Y. P., 1990, "Integrated Design of Cellular Manufacturing Systems in the Presence of Alternative Process Plan", Int. Journal of Productioun an Research, Vol. 28, Nº 8, pp.1541-1554.
- Slack, N., Chambers, S., Johnston, R., 2002, "Administração da Produção", 2ª ed., Editora Atlas.
- Xirouchakis, P., Kiritsis, D. e Persson, J. -G., 1998, "A Petrinet Technique for Process Planning Cost Estimation", Annals of the CIRP, Vol. 47, Nº 1, pp. 427-430.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

### **A STUDY ON THE USE OF ALTERNATIVES IN PROCESS PLANS USING SIMULATION TECHNIQUES AND DESIGN OF EXPERIMENTS**

**Mario Henrique de Mello**

Federal University of Santa Catarina - UFSC

Dep. de Engineering Mechanics - GRIMA/GRUCON, Po. Box 476, 88040-900, Florianópolis, SC.

E-mail: mariohmello@bol.com.br

**João Carlos Espíndola Ferreira**

Federal University of Santa Catarina – UFSC

Dep. de Engineering Mechanics - GRIMA/GRUCON, Po. Box 476, 88040-900, Florianópolis, SC.

E-mail: jcarlos@emc.ufsc.br

**Abstract.** *Production management is still a difficult activity in many companies as it is considered to reach more daring goals. Instead of pushing and managing improvement programs, a significant portion of time is dedicated to solve current process planning problems. For instance, the breakdown of a machine or tool that would be used in the execution of operations on a certain part could result in the impossibility of executing the process plan. In that case, the process planner would probably have to redo the plan considering the new circumstances. However, due to the demand for the delivery periods, that activity is accomplished under pressure, and frequently it is done by the companies' own operators or production person in charge. In both cases, there is a significant chance for mistakes, which could lead to new delays and the customer's boredom. Therefore, the presence of alternatives in process plans can be advantageous in those cases, providing greater flexibility to the manufacturing system. Thus, in this work a methodology involving the use of simulation techniques and design of experiments is proposed to investigate whether the presence of alternatives in process plans results in increased productivity. The results point to productivity earnings with the use of alternatives in some cases.*

**Keywords.** *process plan with alternatives, simulation of processes, experiment project, administration of the production.*