

UTILIZAÇÃO DE ALTERNATIVAS EM PLANOS DE PROCESSOS PARA BALANCEAMENTO DA PRODUÇÃO

Mario Henrique de Mello

Universidade Federal de Santa Catarina, Dep. de Engenharia Mecânica, GRIMA/GRUCON,
Caixa Postal 476, 88040-900, Florianópolis, SC, e-mail: mariohmello@pop.com.br

João Carlos Espíndola Ferreira

Universidade Federal de Santa Catarina, Dep. de Engenharia Mecânica, GRIMA/GRUCON
Caixa Postal 476, 88040-900, Florianópolis, SC, e-mail: jcarlos@emc.ufsc.br

Resumo. *O uso de alternativas em planos de processo aparece mais freqüentemente na literatura como uma opção para aumentar a flexibilidade e/ou a produtividade dos sistemas produtivos, pois permite a execução de uma ordem de produção mesmo sob condições adversas, como a quebra de máquinas, falta de ferramentas, sobrecarga dos recursos, etc. Isso pode ser realizado porque recursos alternativos (p. ex. máquinas, ferramentas, dispositivos, etc.) já foram previstos com antecedência no momento de elaboração do plano de processo. Neste trabalho propõe-se o uso de alternativas para balanceamento da produção. Nesse caso, são consideradas máquinas alternativas no plano de processo de uma peça, com o intuito de se obter uma distribuição mais equitativa da carga de trabalho. Assim a seleção de uma máquina alternativa é realizada mesmo que nenhuma interrupção da produção tenha ocorrido. Dessa forma, o critério que leva à seleção de uma máquina alternativa é o estoque em processo (WIP – Work In Process) alocado na máquina inicialmente selecionada. Para evidenciar os benefícios da utilização de alternativas nessas circunstâncias, foi desenvolvido um modelo para simulação em computador de um sistema de manufatura fictício. Os resultados obtidos mostram que o uso de alternativas pode reduzir significativamente o estoque em processo mantendo-se os mesmos níveis de produtividade.*

Palavras-chave: planejamento de processos, plano de processo com alternativas, balanceamento da produção, simulação de sistemas, gestão da produção.

1. INTRODUÇÃO

O uso de alternativas em planos de processo aparece mais freqüentemente na literatura como uma opção para aumentar a flexibilidade e/ou a produtividade dos sistemas produtivos. Pois permite a execução de uma ordem de produção mesmo sob condições adversas, como a quebra de máquinas, falta de ferramentas, sobrecarga dos recursos, etc. Isso pode ser realizado porque recursos alternativos (p. ex. máquinas, ferramentas, dispositivos, etc.) já foram previstos com antecedência no momento de elaboração do plano de processo. Por exemplo, a operação de furação numa determinada peça pode ser executada tanto por uma furadeira de coluna como por uma fresadora vertical. Embora a furadeira seja uma escolha adequada, numa situação inesperada, como a quebra da furadeira, o uso da fresadora poderia ser vantajoso. Mas isso não é considerado num plano de processo tradicional, sendo que somente o plano de processo com alternativas permite esta flexibilidade. Outro benefício consiste na sua utilização como estratégia para balanceamento da produção, como se propõe neste trabalho. Neste caso, as alternativas são utilizadas visando uma distribuição mais equitativa da carga de trabalho entre os recursos produtivos. Comparando-se esta estratégia com a estratégia na qual os recursos alternativos são selecionados somente na impossibilidade de se executar um plano de processos, isso significa que um recurso alternativo

pode ser selecionado para executar uma operação mesmo quando nenhum imprevisto impede que o recurso originalmente selecionado possa executá-la. Nessa circunstância o que leva à seleção de um recurso alternativo é o estoque alocado numa determinada máquina, ou seja, a quantidade de lotes aguardando para serem fabricados. Por exemplo, se um lote foi selecionado para ser executado numa determinada máquina, mas por algum motivo o estoque alocado nesta máquina for maior que o estoque alocado numa máquina alternativa, será selecionada a máquina alternativa para fabricação do lote. Com isso é possível reduzir o estoque em processo nos recursos gargalos, e possivelmente obter ganhos de produtividade. Assim sendo, o intuito deste estudo é constatar se de fato esses benefícios podem ser obtidos, e identificar alguns fatores que influenciam nesses resultados. A metodologia utilizada para isso consiste na modelagem e simulação de um sistema de manufatura, e a aplicação de técnicas de projetos de experimentos na realização da simulação.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Normalmente os planos de processo não consideram recursos alternativos, como aponta Colosimo et al. ⁽¹⁾, embora na literatura a utilização de alternativas em planos de processo pode ser encontrada já há algum tempo. Assim, ao selecionar determinada máquina para executar uma operação sobre a peça, o processista (indivíduo responsável pela elaboração do plano de processo) seleciona apenas um tipo de máquina, mesmo que em alguns casos possa existir mais de uma. Por exemplo, para se realizar um furo sobre uma peça, pode-se usar tanto uma furadeira como uma fresadora. Embora, a princípio, por razões econômicas (custo da máquina, treinamento de operadores, etc.) o uso da furadeira seja mais vantajoso, numa situação cuja furadeira não esteja disponível por alguma razão, a fresadora poderia ser utilizada se ela estivesse disponível para realizar a operação. Essa situação só é levada em consideração num plano de processos com alternativas, o qual possibilita que recursos alternativos sejam previamente preparados para realizar uma operação. Assim podem ser consideradas alternativas de máquinas, ferramentas, seqüências de processamento, dispositivos de fixação, etc.

Ainda não existe um consenso acerca dos resultados obtidos com a adoção de alternativas em relação à produtividade, flexibilidade, custos e prazo de entrega. Segundo Larsen e Alting⁽²⁾ é possível combinar as etapas de planejamento do processo e da produção, como uma extensão dos conceitos de engenharia simultânea. Segundo eles, quando uma informação da operação baseada no plano de processo é aplicada junto com o planejamento da produção, tem-se muito mais liberdade na seleção de rotas alternativas. Segundo esses autores, o efeito da utilização de rotas alternativas é o aumento da produtividade. No caso de recursos desbalanceados, ou seja, aqueles cuja taxa de produção não é equilibrada, o ganho em produtividade pode chegar a 36%. Já para Ferreira e Wysk⁽³⁾, a utilização de planos de processo com alternativas pode propiciar ganhos de produtividade de até 20% sob certas condições, quando comparado com planos de processo tradicionais.

Uma outra consideração importante refere-se à quantidade de alternativas utilizadas. Segundo Usher⁽⁴⁾, a utilização de uma pequena quantidade de boas alternativas é melhor que uma grande variedade de alternativas de baixo desempenho, além de reduzir a complexidade da programação. Vale considerar ainda uma restrição ao uso de alternativas apresentada por Caprihan e Wadhwa⁽⁵⁾, que analisaram a influência de alternativas em sistemas flexíveis de manufatura (*Flexible Manufacturing Systems - FMS*), onde o aumento em flexibilidade das rotas nem sempre é benéfico, quando para a escolha de tais rotas inclui-se uma penalidade associada ao tempo de operação. Isto porque segundo eles é óbvio que um aumento de rotas flexíveis sem uma penalidade poderia não ter um efeito adverso sobre a performance da fábrica, entretanto o caso com uma penalidade é mais representativo da situação prática. Em suma, a principal vantagem do uso de alternativas é o fato de evitar atrasos e aborrecimentos em razão da necessidade de refazer o plano de processos numa situação inesperada, como a quebra de uma máquina ou a indisponibilidade de uma ferramenta. Isto porque numa situação dessas o risco de não se obter um plano de processos satisfatório é muito alto, devido à ausência de estudos preliminares sobre a capacidade da nova máquina a ser selecionada, e também devido à possibilidade do plano ser realizado por pessoal não qualificado para a função

ou mesmo considerando que o próprio processista refaça o plano, e neste caso ele estará sujeito a trabalhar sob pressão, em razão da necessidade de cumprimento dos prazos de entrega.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho consiste no emprego da simulação de sistemas aliada ao projeto de experimentos. Segundo Freitas⁽⁶⁾, o uso de projeto de experimentos em conjunto com simulação permite obter maior confiabilidade nos resultados provenientes de simulação, pois possibilita avaliar a influência dos fatores num intervalo maior ao simulado.

3.1. Planejamento do Experimento

O projeto de experimento consiste tanto na definição dos fatores de controle e variáveis de resposta, quanto nas técnicas empregadas para análise dos resultados. Segundo Montgomery⁽⁷⁾, isto permite validar os resultados obtidos para intervalos bem maiores do que aqueles cujo experimento foi realizado. Cada experimento é realizado variando-se o nível de alguns fatores de controle, enquanto o nível de outros é mantido constante. Os fatores selecionados estão relacionados à complexidade da peça (*features* diferentes e quantidade de *features*), ao processo (tamanho do lote e tipo de plano) e ao tempo de simulação (quantidade de lotes). Neste trabalho definem-se *features* como sendo formas geométricas às quais estão associadas informações úteis para sua fabricação, tais como dimensões, ferramentas, máquinas, etc. As variáveis de resposta selecionadas foram a produtividade (peças/hora) e estoque médio em processamento (peças). O cálculo da produtividade é realizado considerando a quantidade total de peças produzidas (“totalpeças”) num intervalo de tempo simulado (“tempototal”), de acordo com a Equação (1).

$$produtividade = \frac{totalpeças}{tempototal} \quad (1)$$

Já o estoque médio em processo é calculado com base na expressão apresentada por Law e Kelton⁽⁸⁾, a qual relaciona o somatório do tempo total de espera (“tempoespera”), considerando a quantidade de peças na fila (“qdelote”) no intervalo de tempo simulado (“tempototal”), como se observa na Equação (2).

$$estoqueprocesso = \frac{\sum tempoespera * qdelote}{tempototal} \quad (2)$$

Os níveis considerados para cada um desses fatores, bem como sua descrição, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Fatores de controle considerados no experimento, e seus respectivos níveis

Fator	Descrição	Nível	Valor
Quantidade de Lotes	Quantidade de lotes simulados em cada replicação. Está relacionado com o tempo de simulação.	1 – Baixo	20 lotes
		2 - Médio	100 lotes
Tamanho do Lote	Quantidade de peças contida em cada lote.	1 – Baixo	1 a 50 peças
		2 – Alto	100 a 1000 peças
<i>Features</i> Diferentes	Quantidade de <i>features</i> diferentes em cada peça.	1 – Baixo	1 a 2 <i>features</i> por peça
		2 – Alto	3 a 5 <i>features</i> por peça
Quantidade de <i>Features</i>	Quantidade de duplicações de uma mesma <i>feature</i> em cada peça.	1 – Baixo	1 a 5 <i>features</i>
		2 – Alto	10 a 20 <i>features</i>
Tipo de Plano	Plano de processos considerado pode ou não apresentar alternativas de máquina.	1 – Baixo	Plano sem alternativas
		2 – Alto	Plano com alternativas

Quando todas as combinações possíveis do nível de todos os fatores são consideradas, como neste trabalho, o experimento é definido como fatorial completo (Montgomery⁽⁷⁾). Neste caso foram definidos dois níveis para todos os fatores, baixo e alto, logo o total de experimentos realizados foi de $2^5 = 32$ experimentos. Como em cada experimento foram realizadas 5 replicações, tem-se $32 \times 5 = 160$ experimentos. Isso possibilitou obter diferentes respostas para um mesmo nível dos fatores, cuja influência de cada fator nas respostas pôde ser analisada separadamente, bem como a influência de um fator sobre o outro, ou seja, a interação entre os fatores.

3.2. Modelo de Simulação

Um processo de simulação envolve a criação de um modelo a partir do qual é possível extrair informações sobre o comportamento do sistema sob várias condições, de acordo com Banks et al.⁽⁹⁾ No caso da simulação computacional, um modelo em computador é desenvolvido para simulação do sistema considerado. Neste trabalho realizou-se a modelagem utilizando o software Arena®, o qual utiliza a linguagem de simulação SIMAN V. Dividiu-se a tarefa de simulação em duas etapas: geração do lote de peças e simulação do sistema. A primeira refere-se à geração das *features* utilizadas em cada peça, geração da quantidade do lote, geração da seqüência de usinagem e determinação das condições de corte. Essas informações foram armazenadas numa planilha no software Microsoft® Excel para em seguida, na segunda etapa, serem utilizadas como dados de entrada para simulação do sistema de manufatura. Um programa foi desenvolvido utilizando a linguagem Visual Basic® para gerar aleatoriamente as *features*, a quantidade do lote e a seqüência de usinagem de acordo com os níveis definidos para os fatores: *features* diferentes, quantidade de *features* e tamanho do lote. Os resultados obtidos, bem como os respectivos níveis de cada fator, foram armazenados numa outra planilha de resultados para posterior análise. Algumas das etapas mais importantes são descritas mais detalhadamente nos itens a seguir.

3.2.1. Geração das Peças

As peças foram geradas aleatoriamente pelo programa em Visual Basic®, baseadas no conceito de *features*, ou seja, cada peça poderia ser constituída de até vinte *features* diferentes, divididas em quatro classes: furo, rebaixo, canal e cavidade. As *features* eram aleatoriamente alocadas em cada peça de acordo com o nível dos fatores: *features* diferentes e quantidade de *features*. Estes fatores definiram a quantidade de *features* diferentes em cada peça e a quantidade de duplicações de uma mesma *feature* em cada peça, respectivamente. Algumas das peças geradas utilizando este procedimento são mostradas na Figura 1. Em seguida, as peças obtidas foram agrupadas em lotes cuja quantidade era definida pelo nível do fator quantidade do lote.

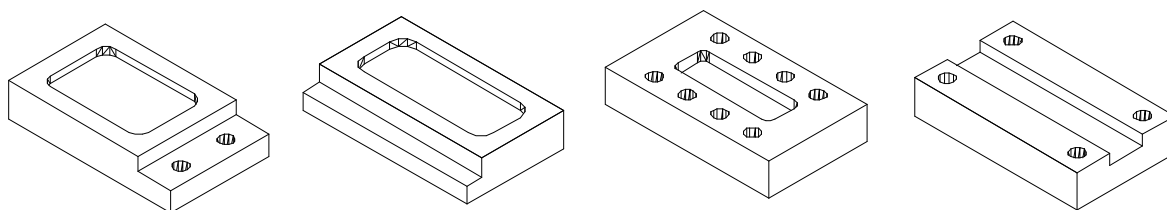


Figura 1. Exemplo de peças geradas

3.2.2. Planejamento do Processo

As ferramentas para a usinagem de cada *feature* foram obtidas a partir de um catálogo do fabricante Titex⁽¹⁰⁾, juntamente com seus respectivos parâmetros de usinagem (avanço, velocidade de corte e profundidade de corte). Isto possibilitou a obtenção dos tempos de usinagem para cada peça por meio das expressões reunidas no trabalho de Ferreira e Wysk⁽¹¹⁾. Outra tarefa realizada foi o cadastramento das máquinas para a usinagem de cada *feature*, bem como das máquinas alternativas. A seqüência de usinagem para cada *feature* foi definida aleatoriamente por um programa em Visual Basic®.

Na usinagem de um lote, a seqüência de fabricação poderia ser realizada utilizando um plano de processos tradicional ou um plano com alternativas, segundo o nível definido para o fator tipo de plano. Ao selecionar o plano com alternativas, havia uma máquina adicional (alternativa) no plano de processos, que poderia ser eventualmente selecionada para cada operação. A seleção de uma máquina alternativa era realizada somente caso a quantidade de lotes aguardando para ser processados na máquina inicialmente selecionada fosse maior que a quantidade de lotes aguardando a execução na máquina alternativa.

Vale destacar que o tempo de usinagem de uma *feature* numa máquina alternativa foi penalizado em 20%, ou seja, quando uma máquina alternativa era selecionada considera-se um tempo adicional de usinagem 20% superior ao tempo de usinagem da máquina originalmente selecionada. Isso foi realizado considerando a hipótese de que não existiam dois recursos equivalentes disponíveis para executar uma mesma operação, como sugerem Ferreira e Wysk⁽³⁾ e Caprihan e Wadhwa⁽⁵⁾.

3.2.3. O Sistema de Manufatura Considerado

O sistema de manufatura considerado para modelagem e realização dos experimentos de simulação é constituído de três máquinas, sendo uma fresadora convencional, uma furadeira convencional e um centro de usinagem CNC.

Quanto à mão de obra utilizada, foi alocado um operador para a fresadora e outro para operar tanto o centro de usinagem como a furadeira. Um operador foi alocado exclusivamente para a fresadora porque esta máquina está sujeita a uma carga de trabalho maior que as outras duas, já que a maior parte das *features* utilizava como a primeira opção de máquina a fresadora, como se pode verificar na Tabela 2.

Tabela 2. Dados relacionados às *features* consideradas

<i>Feature</i>	Tempo (min.)	1ª Opção Máquina	2ª Opção Máquina	Tipo de <i>Feature</i>	Ferramentas	
1	0,3	Furadeira	Fresadora	Furo	Broca 1	
2	0,4	Furadeira	Fresadora	Furo	Broca 2	
3	0,5	Furadeira	Fresadora	Furo	Broca 3	
4	0,6	Furadeira	Fresadora	Furo	Broca 4	
5	0,7	Furadeira	Fresadora	Furo	Broca 5	
6	2,6	Fresadora	Centro Usinagem	Rebaixo	Fresa 1	
7	3,1	Fresadora	Centro Usinagem	Rebaixo	Fresa 2	
8	3,2	Fresadora	Centro Usinagem	Rebaixo	Fresa 3	
9	3,1	Fresadora	Centro Usinagem	Rebaixo	Fresa 4	
10	2,9	Fresadora	Centro Usinagem	Rebaixo	Fresa 5	
11	1,0	Fresadora	Centro Usinagem	Canal	Fresa 6	
12	1,1	Fresadora	Centro Usinagem	Canal	Fresa 7	
13	1,2	Fresadora	Centro Usinagem	Canal	Fresa 8	
14	1,2	Fresadora	Centro Usinagem	Canal	Fresa 9	
15	1,4	Fresadora	Centro Usinagem	Canal	Fresa 10	
16	2,3	Centro Usinagem	Fresadora	Cavidade	Fresa 10	Fresa 13
17	2,2	Centro Usinagem	Fresadora	Cavidade	Fresa 11	Fresa 14
18	2,9	Centro Usinagem	Fresadora	Cavidade	Fresa 12	Fresa 15
19	2,8	Centro Usinagem	Fresadora	Cavidade	Fresa 7	Fresa 16
20	3,4	Centro Usinagem	Fresadora	Cavidade	Fresa 8	Fresa 17

3.2.4. Outras Considerações

Na determinação dos tempos para vários processos foram consideradas distribuições de probabilidade, onde a seleção de cada distribuição foi baseada nas sugestões apresentadas por Freitas⁽⁶⁾, Law e Kelton⁽⁸⁾, Banks et al.⁽⁹⁾ e Kelton et al.⁽¹²⁾. Assim, para a determinação do tempo de chegada dos lotes optou-se por uma distribuição uniforme, variando entre 50% e 80% do tempo de

usinagem do lote anterior. Já o tempo de processamento de um lote corresponde à soma dos tempos de transporte, *set-up* e usinagem, sendo que o tempo de transporte seguia uma distribuição uniforme de 3 a 10 minutos. O tempo de *set-up* foi fixado em 10 minutos para a furadeira e 20 minutos para a fresadora e o centro de usinagem. O tempo entre falhas de máquina seguiu uma distribuição de Poisson com média de 1000h, com um tempo necessário para restabelecer o funcionamento variando entre 1 a 2h de acordo com uma distribuição uniforme. No caso da furadeira foi considerada possibilidade de falha nas ferramentas, com o tempo de ocorrência de uma falha seguindo uma distribuição de Poisson com média de 40 lotes, e um tempo de 10 a 30 minutos para reafiação das brocas, conforme uma distribuição uniforme. Todas as filas de lotes aguardando para ser processados seguiram o critério do primeiro que entra é o primeiro que sai (FIFO – *First In First Out*).

Outra questão importante a ser destacada refere-se à validação do modelo de simulação, a qual foi realizada variando-se o nível de alguns fatores de controle e verificando se as respostas eram compatíveis. Por exemplo, na situação em que o nível dos fatores relacionados à complexidade da peça (*features* diferentes e quantidade de *features*) aumenta, e os demais fatores permanecem num nível baixo, um resultado esperado seria uma redução da produtividade, em razão da fabricação da peça levar mais tempo. Este resultado foi obtido, como será apresentado no próximo item.

4. RESULTADOS

4.1. Resultados da Simulação

Finalizada a simulação no Arena® considerando a variação de todos os fatores, obteve-se uma planilha de resultados com os níveis para cada fator e suas respectivas variáveis de respostas. A Tabela 3 apresenta alguns dos resultados dessa planilha, onde são mostrados os níveis para cada fator e o resultado obtido para suas respectivas variáveis de resposta.

Tabela 3. Alguns resultados da simulação considerando diversos níveis dos fatores

Fatores de Controle					Variáveis de Resposta	
Quantidade de Lotes	Tamanho do Lote	Features Diferentes	Quantidade de Features	Tipo de Plano	Produtividade (lotes/h)	Estoque em Processo (lotes)
baixo	baixo	baixo	baixo	baixo	9,143	56,030
baixo	baixo	baixo	baixo	alto	10,238	46,024
baixo	baixo	baixo	alto	baixo	1,947	42,976
baixo	baixo	baixo	alto	alto	2,205	21,881
baixo	baixo	baixo	baixo	baixo	3,784	51,622
baixo	baixo	baixo	baixo	alto	4,145	25,788

Foram também gerados os gráficos de efeito, mostrados nas Figuras 2 e 3, obtidos através do software Minitab®, os quais relacionam a média dos efeitos principais das variáveis de resposta com o nível dos fatores. Assim, quando a reta do gráfico apresenta uma inclinação crescente, isto significa que o fator influencia positivamente no resultado. Logo quanto maior o nível do fator, maior a contribuição deste no aumento do efeito na variável de resposta. Por outro lado, a inclinação negativa produz efeito contrário. Quando a inclinação da reta é nula, significa que o efeito sobre a variável de resposta é nulo.

4.2. Discussão dos Resultados

Com base nos resultados obtidos no item anterior, foi possível analisar a influência dos fatores sobre as variáveis de respostas.

Alguns resultados foram úteis apenas do ponto de vista de validação do modelo de simulação, pelo fato de já serem esperados. Com relação a esse aspecto pode-se incluir a redução da produtividade em decorrência do aumento dos fatores relacionados à complexidade da peça

(*features* diferentes e quantidade de *features*) e o aumento do estoque em processo em virtude do aumento do fator tamanho do lote.

Ainda considerando os gráficos de efeito, verifica-se que o fator quantidade de lotes produz uma influência positiva tanto na produtividade quanto no estoque em processo. Isso é ocasionado por este fator permitir submeter o sistema de manufatura a duas situações distintas, de acordo com o seu nível. A primeira, quando o nível do fator é baixo, a taxa de chegada de lotes é menor ou igual à taxa de saída. Isso ocorre porque o sistema ainda se encontra num regime de maior variação do tempo de chegada, ou seja, num regime transiente. Com isso, existe a possibilidade de uma máquina ficar ociosa durante um curto intervalo de tempo. Ao passo que, na situação mais próxima do regime permanente (nível alto para o fator), a taxa de chegada de lotes é ligeiramente maior que a de saída, com isso a possibilidade de uma máquina ficar ociosa é menor. Dessa forma, para o nível baixo, no qual a taxa de chegadas é baixa, tem-se uma produtividade e estoque em processo menor que para o nível alto do fator, para o qual a taxa de chegadas é maior.

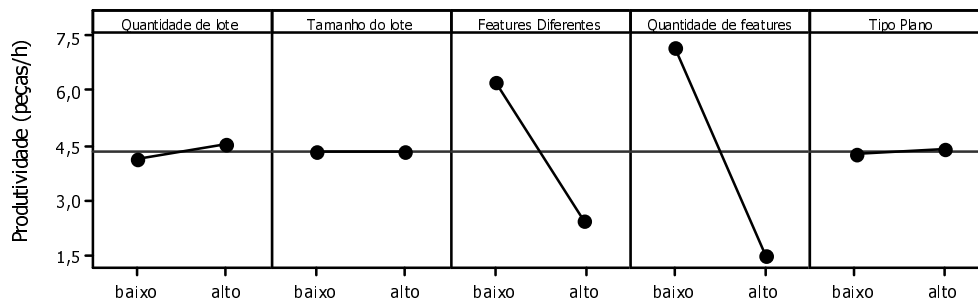


Figura 2. Gráfico de efeito dos fatores sobre a produtividade

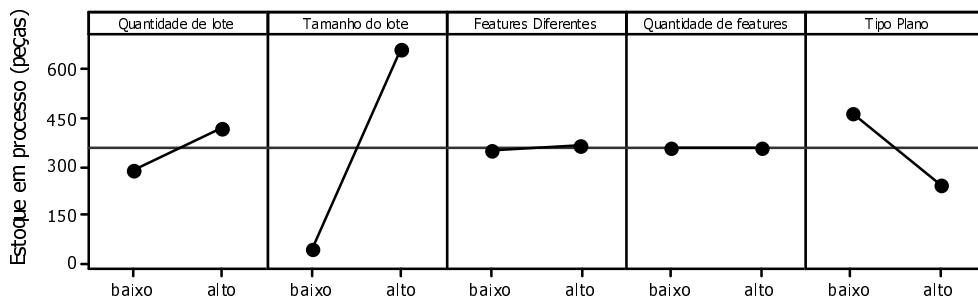


Figura 3. Gráfico de efeito dos fatores sobre o estoque em processo

Quanto ao fator tamanho do lote, não foi verificada nenhuma influência sobre a produtividade. Isso ocorreu em razão do tempo de *set-up* considerado ser baixo quando comparado aos tempos de fabricação das peças. Porém ao analisar-se o estoque em processo, verifica que o mesmo influencia positivamente, o que já era esperado.

Outros dois fatores referem-se à complexidade da peça: *features* diferentes e quantidade de *features*. O nível alto para qualquer um destes fatores significa um aumento na dificuldade para a usinagem da peça, e assim em ambos o nível alto corresponde a uma redução da produtividade. Isto ocorre porque o tempo dedicado a produzir uma peça mais complexa é maior, reduzindo-se assim a produtividade. A maior surpresa com relação aos fatores ligados à complexidade da peça é o fato do mesmo não produzir alterações significativas no estoque em processo, o que indica que alterações no tipo de peça (*mix*) não conduzem a variações consideráveis no estoque em processo.

Com relação ao fator tipo de plano, objetivo maior desse estudo, não ocorreram diferenças significativas na produtividade quando o nível desse fator é alterado, que são: nível baixo (plano sem alternativas) e nível alto (plano com alternativas). Já o estoque em processo sofre uma redução significativa quando são consideradas alternativas no plano, o que já era esperado. Assim um importante resultado é o fato de que mesmo considerando para o plano com alternativas uma penalidade de 20% sobre o tempo de usinagem, quando uma máquina alternativa é selecionada, a produtividade foi mantida e o estoque em processo reduzido.

Uma confirmação dos resultados obtidos nos gráficos foi realizada considerando a análise de variância (ANOVA), o que possibilita também uma comparação quantitativa do efeito dos fatores sobre as variáveis de resposta. Isto foi realizado comparando-se a variância devido ao efeito do fator com a variância devido ao erro ocasionado pela variabilidade do sistema, como propõe Montgomery⁽⁷⁾. O intervalo de confiança para os valores obtidos foi definido em 95%, ou seja, supõe-se que o erro ocasionado pelo sistema não ultrapasse 5%. Assim, verifica-se que: (i) na Tabela 4 a produtividade é afetada somente pelos fatores relacionados à complexidade da peça (quantidade de *features* e *features* diferentes); (ii) na Tabela 5 o estoque em processo é afetado pelos fatores tamanho do lote e tipo de plano (os fatores relacionados à complexidade da peça não influenciam no estoque em processo).

Tabela 4. Análise de variância para os fatores em relação à produtividade

Fator	F	P	Efeito significativo*
Quantidade de <i>features</i>	44,78	0,000	Sim
<i>Features</i> diferentes	11,24	0,002	Sim
Quantidade de lotes	0,09	0,760	Não
Tipo de Plano	0,01	0,917	Não
Tamanho do lote	0,00	0,994	Não

*Considerando um nível de significância de 5%.

Tabela 5. Análise de variância para os fatores em relação ao estoque em processo

Fator	F	P	Efeito significativo*
Tamanho do lote	55,68	0,000	Sim
Tipo de plano	6,56	0,014	Sim
Quantidade de lotes	0,84	0,365	Não
<i>Features</i> diferentes	0,01	0,908	Não
Quantidade <i>features</i>	0,00	0,997	Não

*Considerando um nível de significância de 5%.

Outro dado a ser considerado é a visualização do sistema de manufatura através de animação, permitindo-se observar o comportamento das filas ao longo da simulação. Assim, verificou-se que a fresadora acumulava a maior quantidade de lotes no processo em razão de ser utilizada como primeira opção para a usinagem da maioria das *features*. Com isso a carga de trabalho para esse recurso foi maior que para os demais, o que fez dele o recurso gargalo. Ao utilizar-se um plano de processos convencional, sem alternativas, era comum se observar o acúmulo de lotes aguardando para serem processados na fresadora, como evidencia a Figura 4. No entanto, quando um plano com alternativas era utilizado para fabricar os mesmos lotes, o estoque era distribuído para os outros recursos, conforme a alternativa selecionada, de modo que o estoque total era reduzido. Isto é, os recursos que antes ficavam eventualmente ociosos agora estavam quase sempre ocupados, como apresenta a Figura 5.

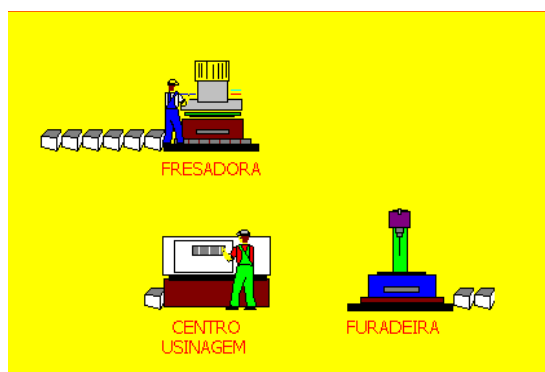


Figura 4. Animação do sistema sem o uso de alternativas no plano de processo

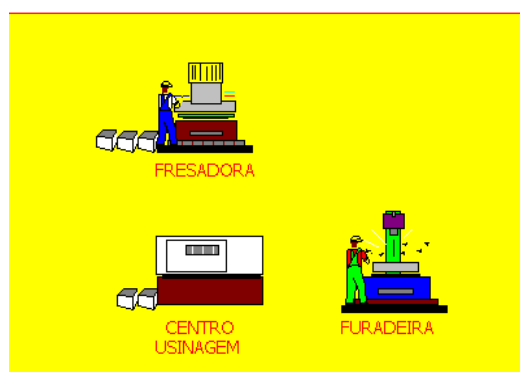


Figura 5. Animação do sistema com o uso de alternativas no plano de processo

Quanto à interação entre os fatores, foi verificada uma interação entre os fatores *features* repetidas e quantidade de *features*, em relação à produtividade. Verificou-se que o aumento no nível do fator quantidade de *features* produz um efeito negativo menor sobre a produtividade, quanto o nível do fator *features* repetidas está no nível alto. Isso ocorre em razão de uma maior quantidade de *features* repetidas possibilitar a realização de um menor número de *set-ups*, portanto uma conduz a uma improdutividade menor. Essa mesma interação também foi evidenciada considerando como variável de resposta o estoque em processo.

Com relação ao estoque em processo, outras interações relacionam os seguintes fatores: quantidade de lote e os demais fatores (quantidade de *features*, *features* repetidas, tamanho do lote, tipo de plano), e tamanho de lote e tipo de plano. As interações com a quantidade de lotes e os fatores quantidade de *features* e *features* repetidas, são justificadas em pelo fato da combinação ocasionada pelo aumento no nível do fator quantidade de lote, com o aumento no nível dos fatores *features* repetidas ou quantidade de *features*, incorrer em uma maior sobrecarga do sistema. Isto significa, aumentar a taxa de chegada de peças e, ao mesmo tempo, a complexidade dessas peças. Outra combinação negativa ao estoque em processo é o aumento no nível do fator quantidade de lotes combinado com o aumento no nível do fator tamanho do lote. O que leva ao aumento da taxa de chegada de lotes e o aumento do tamanho desses lotes. Já a interação entre a quantidade de lotes e o tipo de plano, mostra que o efeito o uso de alternativas propicia maiores reduções no estoque, quanto maior for a quantidade e lotes, ou seja, quanto maior a sobrecarga no sistema maior o benefício em utilizar alternativas. Outra interação com relação ao fator tipo de plano ocorre com o fator tamanho do lote. Assim quanto maior o tamanho do lote, maior o benefício em relação à redução de estoques com a utilização de alternativas.

6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi apresentado um estudo envolvendo simulação e projeto de experimento visando comprovar os benefícios acerca da utilização de alternativas em planos de processo para balanceamento da produção. Como foi verificado, o uso de alternativas de máquinas propicia uma divisão mais equitativa da carga de trabalho, resultando numa redução do estoque em processo de 47% em média. Isso foi obtido sem que a produtividade fosse comprometida, ainda que considerando uma redução de 20% na eficiência da usinagem na seleção de uma alternativa em relação à máquina inicialmente selecionada. Outra consideração é que nem mesmo a existência de recursos gargalos no sistema (no caso a fresadora) impediu que esse resultado fosse alcançado. Ademais, a influência do gargalo foi minimizada pela mudança no fluxo dos lotes, como se verificou na animação. Na prática, os recursos definidos como gargalos mudam a todo o momento, sobretudo em função do tipo de peça produzido (mix), dificultando sua identificação e principalmente sua eliminação. Mas acredita-se que o uso de alternativas pode ser vantajoso mesmo no cenário onde os recursos gargalos mudam, pelo fato do uso de alternativas não estar restrito a apenas uma determinada máquina. Desta forma, recomenda-se o uso de alternativas, mas com a restrição de que não sejam selecionados recursos alternativos de baixa eficiência, no máximo até 20% inferior à eficiência do recurso selecionado com primeira opção. Caso contrário haverá um comprometimento da produtividade, como já destacou Usher⁽⁴⁾, ainda que outros ganhos possam ser obtidos em flexibilidade e estoque em processo,.

Embora tenham sido consideradas condições que tornam o modelo relativamente complexo, como quebra de máquinas, falha nas ferramentas, tempo de *set-up*, tempo de transporte e distribuições de probabilidade, não foram consideradas outras situações, como retrabalho, falta de matérias-primas, falta do operador, etc. Os autores acreditam que nestas situações o desempenho do plano com alternativas pode ser ainda melhor. Pretende-se no futuro considerar alternativas num ambiente de manufatura cujos recursos gargalos mudam a todo o momento e diferentes níveis de sobrecarga nesses recursos.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

8. REFERÊNCIAS

1. COLOSIMO, B.M., SEMERARO Q., TOLIO T. **Rule based system for non linear process plan generation**, Studies in Informatics and Control, v 9, n 2, p. 133-143, june 2000.
2. LARSEN, N. E., ALTING, L. **Dynamic Planning Enriches Concurrent Process and Production Planning**, Int. Journal of Production an Research, v 30, n 8, p. 1861-1876, 1992.
3. FERREIRA, J. C. e WYSK, R. A. **An Investigation of the Influence of Alternative Process Plans on Equipment Control**, Journal of Manufacturing Systems, v. 19. n 6, p. 393-406, 2001.
4. USHER, John M. **Evaluating the impact of alternative plans on manufacturing performance**, Computer & Industrial Engineering, 2003.
5. CAPRIHAN, Rahul. WADHWA, Subhash. **Impact of roating flexibility on the performance of an FMS – a simulation study**, Int. Journal of Flexible Manufacturing Systems, v. 9, p. 273-298, 1997.
6. FREITAS Fº, Paulo, **Introdução a Modelagem e Simulação de Sistemas**. Ed. Visual Books, 2001, 322p.
7. MONTGOMERY, D.C., 1997, **Design and Analysis of experiments**. 4 ed. John Wiley & Sons.
8. LAW, Averill M., KELTON, W. David, **Simulation Modeling and Analysis**. 3 ed. McGraw-Hill, 2000, 760p.
9. BANKS, Jerry, CARSON, John S., NELSON, Barry L., **Discrete-Event System Simulation**. 2 ed. Prentice Hall, 1999, 548p..
10. TITEX. **Catálogo de ferramentas**, 1998.
11. FERREIRA, J. C. e Wysk, R. A. **On the Efficiency of Alternatives in Process Plans**, Journal of de Brazilian Society Mechanical Sciences, v. 23, n. 3, p. 303-319, 2001.
12. KELTON, David, W., SADOWSKI, Randall P., SADOWSKI, Deborah A. **Simulation with Arena**. 2 ed. McGraw-Hill, 2002, 760p..

USE OF ALTERNATIVES IN PROCESS PLANS FOR PRODUCTION BALANCING

Código do trabalho: 161041340

Abstract. *The use of alternatives in process plans appears more frequently in the literature as an option to increase the flexibility of the production systems, because it allows the execution of a production order even under adverse conditions, such as machine breakage, tool failure, overload of the resources, etc. That can be accomplished because alternative resources (p. ex. machines, tools, devices, etc.) were already foreseen when elaborating the process plan. This work aims at showing that the use of alternatives improves production balancing. In that case, alternative machines are considered in the process plan of a part, with the intention of obtaining a more balanced distribution of the work load. The selection of an alternate machine is accomplished even if there is no interruption in production. In that way, the criterion that considers the selection of an alternate machine is the work in process (WIP) allocated to the machine initially selected. In order to show the benefits of the use of alternatives in those circumstances, a computer simulation model was developed of a fictitious manufacturing system. The obtained results show that the use of alternatives can reduce the work in process significantly without reducing productivity.*

Keywords. *process planning, alternatives, production balancing, systems simulation, production management.*