AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ALTERNATIVAS EM PLANOS DE PROCESSO UTILIZANDO SIMULAÇÃO E PROJETO DE EXPERIMENTOS

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ALTERNATIVAS EM PLANOS DE PROCESSO UTILIZANDO SIMULAÇÃO E PROJETO DE EXPERIMENTOS

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARIO HENRIQUE DE MELLO

Florianópolis, fevereiro de 2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ALTERNATIVAS EM PLANOS DE PROCESSO UTILIZANDO SIMULAÇÃO E PROJETO DE EXPERIMENTOS

MARIO HENRIQUE DE MELLO

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

Sendo aprovada em sua forma final.

João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.
Orientador

José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr.
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Abelardo Alves de Queiroz, Ph.D.
UFSC

Marcelo Teixeira dos Santos, Dr.
SOCIESC

Paulo José de Freitas Filho, Dr.
UFSC

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto do esforço de várias pessoas que participaram, acreditaram e contribuíram com minha formação profissional ao longo dos últimos dez anos, por isso faço questão de prestar-lhes meu singelo agradecimento.

Aos professores da Escola Técnica Industrial, de Ribeirão Preto-SP, *Hugo, Waldir, Fernando, Cromâncio* e *Pedro*, que ajudaram me nos primeiros passos da minha vida profissional. Aos professores da inesquecível EFEI, de Itajubá-MG, agora UNIFEI: *Augusto, Tiago, Zé Célio, Gonzaga, Fredmark, Zé Hamilton* e *Cadu,* que participaram ativamente da minha formação como engenheiro e incentivaram minha vocação para a docência. Ao meu amigo *Luiz*, por ter incentivado minha vinda à UFSC e me recebido em sua casa, a qual se tornou minha morada durante esses últimos dois anos. Aos companheiros da república, em Floripa, *Cão, Paulinho, Marcião, Segião, Newton* e *Pitt Bull,* pela amizade que construímos. À equipe do GRIMA, *Darlan, Gabriel, Mario, João Paulo, Rodrigo e Ernesto,* pela companhia. Ao *Mikos* e *Reaes*, do CEFET-PR, pela troca de experiências nos nossos bate-papos. À *Adriana* e *Izabel*, pelos nossos animados cafés e bate-papos. Aos companheiros(as) da pós, *Ivo, Paty, Marcião, Feijaum, Carrafa, Feca, Fabrício, Maurício* e *Giacomi*, pelos inesquecíveis momentos de descontração. Ao *Fabão* e *Paulão*, meus "amigos de fé-irmãos-camaradas", pelas trilhas, festas, sambas, churrascos e esquentas, parceiros de todas as horas e para o resto da vida. Ao s*êo Beto (in memorian), dona Sandra* e ao pessoal do restaurante Bom Garfo, por ter tornado nossas refeições no período da noite verdadeiros jantares. A *Gorete*, do POSMEC, e a *dona Vanda*, do RU, pela perene simpatia no atendimento prestado. Ao *Prof. Rabelo*, pela ajuda no inicio dos trabalhos de simulação. Ao *Prof. Paulo Freitas*, referência obrigatória em simulação, por ter cedido a licença para realização dos experimentos no Arena® e pelo apoio. Aos membros da banca, *Prof. Teixeira* e *Prof. Abelardo*, pela atenção e contribuições prestadas a este trabalho. Ao *Prof. João Carlos*, pesquisador de primeira linha e orientador nato, pela generosidade com a qual presenteou-me com este tema e pela sua costumeira paciência, meu agradecimento e reconhecimento. À Capes, pelo apoio financeiro para realização deste trabalho, e a todos aqueles que não citei por falha da minha memória, peço desculpas e agradeço por ter contribuído para a realização deste sonho. Agradeço a minha família pelo incentivo, ainda que a minha dedicação ao mestrado tenha furtado vários momentos de convívio. Finalmente, agradeço principalmente a Deus por estar presente em minha vida em todos os momentos, especialmente nestes últimos dois anos.

DEDICATÓRIA

À minha família, com muito amor e carinho.

Pelo incentivo e contínuo apoio.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS vii
ÍNDICE DE TABELAS ix
RESUMO x
ABSTRACT xi

1. INTRODUÇÃO 1
1.1 A conjuntura econômica 1
1.2 Os desafios do setor industrial 3
1.3 Formulação do problema 4
1.4 Objetivos da dissertação 5
1.5 Estrutura da dissertação 6

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 8
2.1 Sistemas de manufatura 8
2.1.1 Definição de sistemas de manufatura 8
2.1.2 Tipos de sistemas de manufatura 9
2.1.3 Arranjo na manufatura 11
2.1.4 Tecnologia de processo 13
2.2 Planejamento de processos 14
2.2.1 Atividades do planejamento de processos 14
2.2.2 Geração do plano de processos 15
2.3 Planejamento de processos com alternativas 16
2.3.1 Considerações sobre o uso de alternativas 16
2.3.2 Exemplo da aplicação de alternativas 17
2.3.3 Alternativas em sistemas de manufatura 21
2.3.4 Alternativas na programação e sequenciamento da produção 24
2.3.5 Geração automática de planos de processo com alternativas 25
2.3.6 Outras abordagens no uso de alternativas 27
2.3.7 Comparação com outros trabalhos da literatura 27
2.4 Avaliação de desempenho de sistemas de manufatura 30
2.5 Simulação de sistemas 31
2.5.1 Introdução à simulação de sistemas 31
2.5.2 Modelagem de sistemas 35
2.5.3 Simulação de sistemas de manufatura 37
2.5.4 Modelagem e simulação no aplicativo Arena® 38
2.6 Projeto de experimentos 42
2.6.1 Características básicas 42
2.6.2 Projeto fatorial completo 43

3. METODOLOGIA 49
3.1 Planejamento do experimento 49
3.1.1 *Features* consideradas 51
3.1.2 Fatores de controle 52
3.1.3 Variáveis de resposta 56
3.2 Modelo de simulação 57
3.2.1 Geração dos lotes 58
3.2.2 Planejamento do processo 58
3.2.3 Ordens de fabricação 59
3.2.4 Modelagem do sistema de manufatura 59
3.3 Simulação do sistema de manufatura 63
3.4 Hipóteses adotadas 64

4. IMPLEMENTAÇÃO 65
4.1 Seleção das ferramentas de desenvolvimento 65
4.2 Geração da ordem de produção 66
4.2.1 Etapas para geração da ordem de produção 66
4.2.3 Procedimento para geração de ordens 70
4.3 Simulação do sistema de manufatura 73
4.3.1 Determinação da lógica do sistema 73
4.3.2 Atribuição dos dados ao modelo 76
4.3.3 Execução da simulação 77

5. RESULTADOS 79
5.1 Resultados da simulação 79
5.2 Análise dos resultados 92
5.2.1 Efeito dos fatores em relação à produtividade 93
5.2.2 Efeito dos fatores em relação ao estoque em processo 94
5.2.3 Efeito dos fatores em relação à taxa de utilização 97

6. CONCLUSÕES 99
6.1 Considerações gerais 99
6.2 Desempenho de alternativas na produtividade 100
6.3 Desempenho de alternativas no estoque em processo 100
6.4 Desempenho de alternativas na utilização dos recursos 101
6.5 Recomendações referentes à utilização de alternativas 102
6.6 Recomendações para a realização de estudos futuros 103

REFERÊNCIAS 106
APÊNDICE 110
Apêndice I – Tabela com alguns resultados da simulação 110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Variação da produção industrial de 1970 a 1998 (MRE, 2003) 1
Figura 1.2 - Ciclo virtuoso de desenvolvimento tecnológico 3
Figura 2.1 - Resumo das características do tipo de produção 9
Figura 2.2 - Tipos de processo em operações de manufatura em relação às características 10
Figura 2.3 - Tipos de arranjos (REHG, 1994, p.27) 11
Figura 2.4 - Características de volume e variedade das tecnologias 13
Figura 2.5 - Atividades do planejamento do processo 14
Figura 2.6 - Peça a ser produzida (SCHAFER, 1981 apud REHG, 1994, p.167) 17
Figura 2.7 - Caminhos para estudar um sistema (LAW e KELTON, 2000, p.4, tradução nossa) 32
Figura 2.8 - Ambiente de construção de modelos no Arena® 39
Figura 2.9 - Módulos utilizados para implementar a lógica do sistema 40
Figura 2.10 - Janela do módulo *Create* 40
Figura 2.11 - Janela do módulo *Process* 41
Figura 2.12 - Comportamento das entidades durante a execução do modelo 41
Figura 2.13 - Relação de variáveis que influenciam um sistema 42
Figura 2.14 - Combinações de teste de um experimento fatorial 3x2x2 43
Figura 2.15 - Gráfico de efeito na variável de resposta em função do nível dos fatores A, B e C 44
Figura 2.16 - Gráfico de interação na variável de resposta em função do nível dos fatores A e B 44
Figura 2.17 - Projeto fatorial 2^3 (MONTGOMERY, 1997, p.302) 46
Figura 3.1 - Peças formadas em diferentes níveis do fator *features* por peça 53
Figura 3.2 - Peças formadas em diferentes níveis do fator *features* duplicadas 53
Figura 3.3 - Estrutura do modelo de simulação 57
Figura 3.4 - Sistema de manufatura balanceado 61
Figura 3.5 - Sistema de manufatura desbalanceado 61
Figura 3.6 - Fatores de controle e variáveis envolvidos na simulação 63
Figura 4.1 - Planilha de edição de *features* 67
Figura 4.2 - Planilha para o cadastro de ferramentas 67
Figura 4.3 - Planilha para o cadastramento de máquinas 68
Figura 4.4 - Planilha de seleção de máquinas com o cálculo do tempo usinagem 68
Figura 4.5 - Janela para aquisição dos dados do experimento 69
Figura 4.6 - Planilha com a ordem de produção gerada 70
Figura 4.7 - Fluxograma de geração de ordens de produção 71
Figura 4.8 - Peça gerada de acordo com os atributos da ordem de produção 72
Figura 4.9 - Fluxograma do modelo de simulação 74
Figura 4.10 – Janelas de aquisição de dados variáveis 77
Figura 4.11 - Planilha de resultados da simulação 78
Figura 5.1- Efeitos na produtividade do sistema balanceado (penalidade de 20%) 80
Figura 5.2 - Efeitos no estoque em processo do sistema balanceado (penalidade de 20%) 80
Figura 5.3 - Efeitos na utilização dos recursos do sistema balanceado (penalidade de 20%) 80

Figura 5.4 - Efeitos na produtividade do sistema balanceado (penalidade de 40%)..... 80
Figura 5.5 - Efeitos no estoque em processo do sistema balanceado (penalidade de 40%)..... 81
Figura 5.6 - Efeitos na utilização dos recursos do sistema balanceado (penalidade de 40%) 81
Figura 5.7 - Efeitos na produtividade do sistema desbalanceado (penalidade de 20%)..... 81
Figura 5.8 - Efeitos no estoque em processo do sistema desbalanceado (penalidade de 20%)..... 81
Figura 5.9 - Efeitos na utilização dos recursos do sistema desbalanceado (penalidade de 20%)..... 81
Figura 5.10 - Efeitos na produtividade do sistema desbalanceado (penalidade de 40%)..... 81
Figura 5.11 - Efeitos no estoque em processo do sistema desbalanceado (penalidade de 40%)..... 82
Figura 5.12 - Efeitos na utilização dos recursos do sistema desbalanceado (penalidade de 40%)..... 82
Figura 5.13 - Interação na produtividade do sistema balanceado (penalidade de 20%)..... 82
Figura 5.14 - Interação no estoque em processo do sistema balanceado (penalidade de 20%)..... 83
Figura 5.15 - Interação na utilização dos recursos do sistema balanceado (penalidade de 20%) 83
Figura 5.16 - Interação na produtividade do sistema balanceado (penalidade de 40%)..... 84
Figura 5.17 - Interação no estoque em processo do sistema balanceado (penalidade de 40%)..... 84
Figura 5.18 - Interação na utilização dos recursos do sistema balanceado (penalidade de 40%) 85
Figura 5.19 - Interação na produtividade do sistema desbalanceado (penalidade de 20%)..... 85
Figura 5.20 - Interação no estoque em processo do sistema desbalanceado (penalidade de 20%)... 86
Figura 5.21 - Interação na utilização dos recursos do sistema desbalanceado (penalidade de 20%). 86
Figura 5.22 - Interação na produtividade do sistema desbalanceado (penalidade de 40%)..... 87
Figura 5.23 - Interação no estoque em processo do sistema desbalanceado (penalidade de 40%)... 87
Figura 5.24 - Interação na utilização dos recursos do sistema desbalanceado (penalidade de 40%). 88

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Relação entre os tipos de processo e os tipos de arranjo 12
Tabela 2.2 - Diferentes concepções de planos de processo obtidas para uma peça 18
Tabela 2.3 - Tempos de usinagem admitidos para peça nas diferentes concepções 19
Tabela 2.4 - Valores do tempo de chegada e preparação (em minutos) gerados pelo Arena 42
Tabela 2.5 - Diferentes notações usadas em projeto de experimentos 46
Tabela 2.6 - ANOVA para o projeto fatorial 2^3 47
Tabela 2.7 - ANOVA generalizada para o experimento 2^k 48
Tabela 3.1 - Dimensões da *features* utilizadas na formação das peças 51
Tabela 3.2 - Fatores de controle utilizados no experimento 52
Tabela 3.3 - Dados relacionados às *features* consideradas 59
Tabela 3.4 - *Features* usinadas em cada tipo de máquina no sistema balanceado 60
Tabela 3.5 - *Features* usinadas em cada tipo de máquina no sistema desbalanceado 60
Tabela 3.6 - Exemplo da combinação de níveis dos fatores de controle utilizados no experimento ... 64
Tabela 5.1 – Alguns resultados da simulação do sistema balanceado 79
Tabela 5.2 - ANOVA na produtividade do sistema balanceado (penalidade de 20%) 88
Tabela 5.3 - ANOVA no estoque em processo do sistema balanceado (penalidade de 20%) 89
Tabela 5.4 - ANOVA na utilização do sistema balanceado (penalidade de 20%) 89
Tabela 5.5 - ANOVA na produtividade do sistema balanceado (penalidade de 40%) 89
Tabela 5.6 - ANOVA no estoque em processo do sistema balanceado (penalidade de 40%) 90
Tabela 5.7 - ANOVA na utilização do sistema balanceado (penalidade de 40%) 90
Tabela 5.8 - ANOVA na produtividade do sistema desbalanceado (penalidade de 20%) 90
Tabela 5.9 - ANOVA no estoque em processo do sistema desbalanceado (penalidade de 20%) 91
Tabela 5.10 - ANOVA na utilização do sistema desbalanceado (penalidade de 20%) 91
Tabela 5.11 - ANOVA na produtividade do sistema desbalanceado (penalidade de 40%) 91
Tabela 5.12 - ANOVA no estoque em processo do sistema desbalanceado (penalidade de 40%) 92
Tabela 5.13 - ANOVA na utilização do sistema desbalanceado com penalidade de 40% 92

RESUMO

O planejamento de processos consiste numa das atividades de maior detalhamento na fase de projeto. Isto porque, uma vez definido o produto e seus componentes (projeto do produto), há a necessidade de definir como os mesmos serão fabricados (projeto do processo). Entretanto, normalmente a elaboração de planos de processo não considera recursos alternativos, embora na literatura a utilização de alternativas em planos de processo já está disponível há algum tempo. Assim, ao selecionar uma determinada máquina para executar uma operação sobre a peça, o processista seleciona apenas um tipo de máquina, mesmo que em alguns casos possa existir mais de uma. Por exemplo, na operação de furação 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 em que a furadeira não estiver disponível por alguma razão, a fresadora poderia ser utilizada se tivesse sido selecionada e estivesse disponível para realizar a operação. Mas essa situação só é levada em consideração em um plano de processos com alternativas, pois, nesse caso, recursos alternativos são previamente selecionados para realizar uma operação. Nesse contexto, a adoção de alternativas em planos de processos pode ser uma opção para se obter mais rapidez e flexibilidade nos sistemas de manufatura, pois uma máquina alternativa já foi previamente selecionada no plano de processos. Para evidenciar os benefícios da utilização de alternativas nessas circunstâncias, foi desenvolvido um modelo para simulação em computador de um sistema de manufatura fictício. Nesse modelo, é avaliado o desempenho do uso de máquinas alternativas com relação à produtividade, estoque em processo e taxa de utilização das máquinas. Além do mais, foi analisado o efeito de fatores envolvendo a formação da peça (*features* por peça e *features* duplicadas), ao processo (quantidade do lote, quebra de máquina e tipo de plano) e ao ambiente do sistema de manufatura (lotes simulados e tempo de chegada). Os resultados obtidos mostram que o uso de máquinas alternativas pode aumentar a produtividade em alguns casos, e, principalmente, reduzir o estoque em processo e elevar a taxa de utilização das máquinas. O efeito do uso de alternativas se mostrou mais benéfico, sobretudo, no sistema de manufatura onde havia a presença de recursos gargalos. Assim, mesmo ao custo de uma eficiência menor, já que foi imposta uma penalidade no uso de uma máquina alternativa, a utilização de alternativas é sempre recomendável nesses sistemas.

Palavras-chave: Plano de processos com alternativas; Planejamento do processo; Simulação de sistemas; Projeto de experimentos.

ABSTRACT

Processes planning is one of the largest detailing activities in the project phase. This happens because of necessity to define how the product will be manufactured (process project), once the product and their components (product project) are defined. However, usually the elaboration of process plan does not consider alternative resources, although in the literature the use of alternatives in process plans is already available. So, by selecting a certain machine to execute an operation on a part, the process planner just selects a machine type, even if in some cases can exist more than one. For instance, in the drilling operation on a part, it can be used a drill or a milling. Although, at first, for economical reasons (cost of the machine, training of operators, etc.) the use of the milling is more advantageous, in a situation where the drill is not available for some reason, the drilling could be used if it had been selected and it was available to accomplish the operation. But that situation is only taken into account in a processes plan with alternatives, because alternative resources are previously selected to accomplish an operation. In that context, the adoption of alternatives in processes plans can be an option to obtain more speed and flexibility in the manufacturing systems, because an alternate machine was already selected previously in the processes plan. To evidence the use of alternatives benefits in those circumstances, a model was developed for simulation in computer of a fictitious manufacturing system. In this model, the use performance of alternative machines is evaluated regarding the productivity, work in process and machine's use rate. Besides, the effect of factors was analyzed involving the formation of the parts (features for parts and duplicated features), to the process (quantity of the batch machine break and process plan type) and manufacturing system (simulated batches and arrival time). The obtained results show that the use of alternate machines can increase the productivity in some cases, reduce the work in process and increase machine utilization. The use's effect of alternatives was shown more beneficial, above all, in the manufacturing system where there was the presence of bottlenecks resources. Thus even at the cost of a smaller efficiency, since a penalty was imposed in the use of an alternate machine, the use of alternatives is always advisable in those systems.

Keywords: Process plan with alternatives; Process planning; Systems simulation; Design of experiments.

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados alguns aspectos visando a compreensão do contexto econômico e tecnológico no qual este trabalho está inserido. Partindo-se da questão econômica, pano de fundo para as transformações na indústria, desenvolvem-se os conceitos para formulação e entendimento do problema abordado neste estudo.

1.1 A conjuntura econômica

O desenvolvimento do setor industrial no Brasil tem sido marcado pela alternância de períodos de desenvolvimento e estagnação desde sua a consolidação, com a chegada das primeiras indústrias automobilísticas na década de 60 durante o governo do presidente Juscelino Kubitschek (JK). Esse comportamento se tornou mais evidente sobretudo nas três últimas décadas, após o expressivo crescimento econômico obtido na década de 70 no período que ficou conhecido como o "milagre brasileiro". Isso pode ser evidenciado em alguns indicadores econômicos, como o nível da produção mostrado na Fig. 1.1.

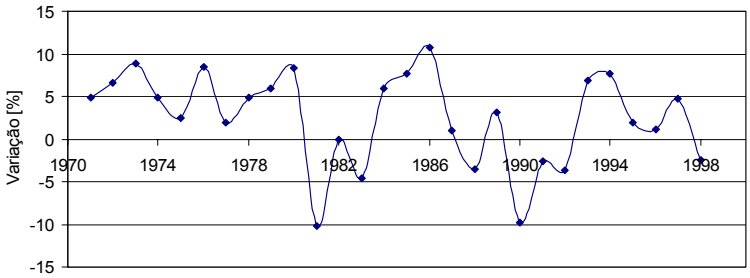


Figura 1.1 - Variação da produção industrial de 1970 a 1998 (MRE, 2003)

Embora o crescimento obtido na década de 70 tenha impulsionado vários outros setores da economia, ainda assim o seu ritmo não se manteve para que esse crescimento fosse sustentado. Pois, se por um lado, as crises subseqüentes impediram sua expansão, a falta de uma política de financiamento consistente, associada a programas de desenvolvimento tecnológico e capacitação de pessoal, não permitiram que a indústria as suportasse, elevando os índices de falências e desemprego.

Agora, novamente o país volta a discutir medidas de crescimento econômico, embora os empresários se queixem da carga tributária e, sobretudo, da taxa básica de juros (taxa Selic). Pois essa taxa é utilizada como um referencial para as demais taxas de juros, tendo em vista que a mesma corresponde à taxa paga pelo governo ao mercado financeiro para obtenção de empréstimos sob a forma de títulos da dívida pública. Assim, quanto maior essa taxa, torna-se mais atraente emprestar dinheiro ao governo, pois as empresas dificilmente conseguirão atingir uma rentabilidade compatível. A conseqüência disso é uma série de efeitos negativos sobre a economia, como a redução dos investimentos produtivos, o aumento do desemprego e redução do consumo.

O governo, por meio do Banco Central (BC), tem sido pressionado pelos empresários a abaixar a taxa de juros, no entanto essa taxa ainda continua alta para os padrões mundiais. Outra medida também cobrada é o aumento da oferta de crédito, por intermédio do Banco de Desenvolvimento Social (BNDES), principalmente para as micro e pequenas empresas. Contudo, mesmo que implementadas, essas medidas têm eficácia duvidosa, já que de nada adianta produzir sem a existência de mercado. E para conquistar novos mercados, ou mesmo para manter os atuais, é preciso atingir, cada vez mais, elevados padrões de qualidade, flexibilidade e produtividade, tendo em vista os efeitos da globalização que permite as empresas de qualquer lugar do mundo lançar seus produtos em mercados até então pouco explorados.

Para se ter uma dimensão do problema a ser enfrentado, basta observar que o Brasil detém hoje aproximadamente apenas 1% do mercado mundial (FUNCEX, 2004), uma parcela bem menor que os 1,5% que o país tinha no início dos anos 80 e inferior à sua importância no cenário econômico mundial (FERRARI, 2004). Por isso, para o país crescer não basta criar as condições econômicas, é preciso também criar condições tecnológicas, ainda que aquelas sejam necessárias.

Essa carência de tecnologia própria se reflete na matriz das exportações brasileira, dominada por produtos de baixa tecnologia[1] e baixo valor agregado. “Entre 60% e 65% das exportações brasileiras são de mercadorias básicas (commodities), produtos vendidos em grandes quantidades, sem qualidade diferenciada.” (PAULINO, 2002, p.85).

O principal problema associado à venda desses produtos é que seu preço oscila muito, dependendo do ritmo de produção e consumo internacionais. Além do fato de não gerar postos de trabalho no Brasil. Isso porque ao exportar produtos agrícolas e matérias primas, os empregos gerados em função da necessidade de processamento desses produtos também ficam no exterior. Isso explica, em parte, os níveis elevados de desemprego em nosso país que, embora o mesmo tem reduzido nos últimos meses, em abril de 2004 ele atingiu 13,1% da População Economicamente Ativa (PEA) (GRABOIS, 2004).

Um estudo do IEDI (2003, p.8) mostrou que “a participação da exportação de manufaturados está estagnada”, no entanto o próprio o IEDI (2003) reconhece que houve uma significativa evolução da exportação de produtos com maior conteúdo tecnológico, mas ainda está distante da média mundial.

Assim, reconhecendo os desafios desse cenário, o maior objetivo deste trabalho é auxiliar nosso país na criação das condições tecnológicas que permitam as empresas atingirem maior competitividade, e, conseqüentemente, contribuir para que o país volte a crescer e gerar empregos.

---

[1] À exceção da exportação de aviões pela Embraer (Empresa Brasileira de Aeronáutica), cuja contribuição no total das exportações brasileiras é significativa.

1.2 Os desafios do setor industrial

Os desafios do setor industrial no mundo todo são praticamente os mesmos: melhorar a qualidade dos produtos, reduzir os custos, aumentar a produtividade, aumentar a flexibilidade, reduzir os desperdícios, agregar mais valor aos produtos, aumentar os níveis de satisfação dos seus clientes (internos e externos), etc. Mas os desafios do setor industrial brasileiro são ainda maiores, já que o Brasil teve uma industrialização tardia, se comparado a outros paises mais industrializados como Inglaterra, França, Estados Unidos, Alemanha e Japão. Embora, nem por isso, o Brasil possa ser considerado uma economia sem importância, já que o produto interno bruto (PIB) brasileiro está entre os 15 maiores do mundo (AMCHAMRIO, 2004).

No caso brasileiro, além das questões ligadas à falta de recursos financeiros, outras questões relacionadas à educação e ao desenvolvimento tecnológico têm um peso ainda maior. A falta de acesso à educação conduz a uma baixa capacitação da mão de obra industrial, enquanto o insipiente desenvolvimento tecnológico está ligado ao atraso tecnológico nas indústrias. Isso se verifica nos problemas que as indústrias enfrentam, tais como: baixa produtividade, elevado nível de desperdícios de toda natureza (refugo, estoques, retrabalho, materiais de consumo, etc). Mas é fácil falar dessas questões sem considerar os investimentos necessários para solucioná-la, portanto a questão é como desenvolver tecnologia com a escassez de recursos financeiros?

As soluções mais bem sucedidas obtidas nesse sentido têm por base a educação voltada ao desenvolvimento tecnológico. Isso pode ser dito porque a educação tecnológica permite iniciar um ciclo virtuoso de desenvolvimento tecnológico, como ilustra a Fig. 1.2, já que propicia maiores taxas de retorno sobre o investimento que qualquer outra área, como preconiza Campos (1992).

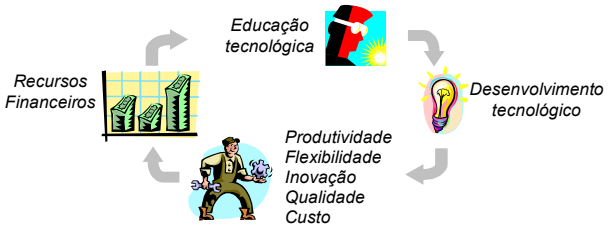


Figura 1.2 - Ciclo virtuoso de desenvolvimento tecnológico

O desenvolvimento tecnológico dá o apoio às mudanças, visando o aumento da qualidade, flexibilidade, produtividade, inovação e redução de custos. Esses requisitos possibilitam que as empresas conquistem seu espaço numa economia globalizada e, conseqüentemente, gerar riqueza. Uma prova disso é a Coréia do Sul, que no início da década de 60 possuía um PIB bem inferior ao do Brasil, ao passo que hoje o PIB daquele país supera o brasileiro em 26 vezes (AZEVEDO, 2003). Isso foi obtido graças, em grande parte, ao direcionamento dos recursos disponíveis para programas de educação tecnológica e tecnologia, o que permitiu que as empresas daquele país se tornassem capazes de competir numa economia globalizada.

1.3 Formulação do problema

Como foi visto, o desenvolvimento econômico está intimamente ligado ao desenvolvimento do setor industrial, o qual, por sua vez está relacionado ao aumento da competitividade. Isso significa atender, senão a todos, pelo menos a maior parte dos requisitos do mercado em termos de produtividade, flexibilidade, custos, qualidade, inovação, entre outros. Muitas vezes não é possível atender a esses requisitos devido à ocorrência de problemas relacionados à baixa utilização dos recursos, estoques elevados má utilização dos recursos disponíveis (mão de obra, ferramentas, materiais, máquinas, etc.), imprevistos na produção (p. ex. a indisponibilidade de um recurso), etc. Alguns desses problemas estão relacionados à falhas no processo de produção, pois a maior parte das atividades não pode ser previstas com exatidão em razão da complexidade que isso representaria. Por exemplo, como seria possível prever a ocorrência de fatos como:

- a quebra de uma máquina?
- a sobrecarga de uma máquina?
- a indisponibilidade de uma ferramenta?
- a impossibilidade de utilizar os parâmetros especificados?

Todos esses imprevistos fazem parte do dia-a-dia das indústrias, e podem eventualmente acontecer durante a execução de uma ordem de produção. Isto pode vir a se tornar um problema, em razão da necessidade de redefinir os recursos associados à execução daquela ordem de produção. Assim, é necessário que o plano de processos seja refeito, pois nele estão contidas as informações sobre os recursos necessários para a fabricação de um componente, bem como os parâmetros de fabricação. Segundo Weintraub et al. (1999), estudos evidenciam que 20 a 30% dos planos de processo não são válidos, portanto necessitam ser refeitos. Nesse caso, a situação ideal seria que o processista (indivíduo encarregado da tarefa de elaboração do plano de processos) refizesse o plano de acordo com as novas circunstâncias. Porém, em função da exigência quanto aos prazos de entrega, essa atividade é realizada pelos próprios operadores ou encarregados de produção, ou então pelo próprio processista sob pressão. 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 permite a seleção de um recurso alternativo previamente definido. Ademais, pode prover também uma maior flexibilidade ao sistema de manufatura, permitindo que determinada peça possa ser produzida utilizando os recursos disponíveis naquele momento. Mas a utilização alternativas em planos de processo ainda não é adotada pela maior parte dos processistas. Acredita-se que isso ocorre devido ao

desconhecimento dessa estratégia por aqueles profissionais, e à falta de estudos aprofundados que esclareçam questões pertinentes à sua aplicação, tais como:

- quais os possíveis ganhos?
- quão menor pode ser a eficiência do recurso a ser utilizado como alternativa, quando comparado ao recurso originalmente selecionado?
- quais os sistemas de manufatura são preferíveis para implementação utilização de alternativas?
- quais os tipos de peças que justificam a adoção dessa abordagem?
- o uso de alternativas na produção de lotes pequenos pode também ser benéfico?
- quantas alternativas são necessárias?

Assim, o problema abordado neste trabalho é propor uma resposta a essas questões sendo que, para isto, foi realizado um experimento, combinando técnicas de simulação e projeto de experimentos. Dessa forma, o efeito de vários fatores (*features*[2] duplicadas, *features* por peça, quantidade do lote, penalidade, quebra de máquina, tipo de plano, tempo de chegada e lotes simulados) é analisado com relação às medidas de desempenho consideradas (produtividade, taxa de utilização e estoque em processo).

1.4 Objetivos da dissertação

No que se refere ao domínio da melhoria de processos de fabricação, o objetivo deste trabalho consiste em avaliar os resultados do uso de alternativas em planos de processo, com relação à produtividade, estoque em processo e utilização dos recursos. Essa avaliação foi realizada comparando os resultados obtidos utilizando-se planos de processo sem alternativas e planos de processo com alternativas pré-planejadas. Para isso, foi desenvolvido um modelo para simulação em computador de um sistema de manufatura fictício, onde os planos de processo foram avaliados.

Outros objetivos considerados são:

- comprovar alguns resultados apresentados na literatura sobre o uso de alternativas (redução de estoques, aumento da produtividade e aumento da taxa de utilização dos recursos) considerando condições de manufatura mais realísticas em relação àqueles trabalhos (possibilidade de falha em máquinas ou ferramentas, existência de sobrecarga nos recursos, distribuições de probabilidade para os tempos de chegada, existência de tempos de troca de ferramentas e tempos de transporte de peças);

---

[2] Neste trabalho define-se *features* como sendo formas geométricas, tais como furos, rebaixos, canais, etc., as quais estão associadas informações úteis para sua fabricação (p. ex. máquinas, ferramentas, etc.).

- disponibilizar, por meio deste trabalho, uma fonte de referência sobre o uso de alternativas como uma possível estratégia para elaboração de planos de processos, e com isso, incentivar uma maior aplicação de alternativas em planos de processos nas indústrias;
- dar suporte ao processista na tomada de decisão acerca da utilização de alternativas em planos de processo, fornecendo informações pertinentes à influência dos fatores considerados sobre as variáveis de resposta;
- evidenciar o uso de simulação e projeto de experimentos como uma possível metodologia para o estudo de estratégias de manufatura no nível operacional;
- motivar estudos futuros sobre o uso de alternativas, considerando a possibilidade de validação das recomendações deste trabalho em empresas.

1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação esta organizada da seguinte forma: no capítulo 2 realizou-se uma revisão bibliográfica contendo alguns aspectos envolvendo o uso de alternativas em planos de processo, tais como aplicações, desempenho e limitações. Isso será realizado baseado nos trabalhos disponíveis na literatura, embora, como será visto, em nenhum desses trabalhos foi encontrado um modelo de simulação que incorporasse, ao mesmo tempo, os aspectos considerados neste trabalho. Nesse capítulo também serão apresentados alguns conceitos básicos sobre sistemas de manufatura, e sobre a abordagem para realizar sua modelagem visando a avaliação de desempenho. Além disso, algumas considerações sobre a simulação de sistemas e projeto de experimentos são apresentadas.

No capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada neste trabalho, a qual consiste no emprego da simulação de sistemas aliada a técnicas de projeto de experimentos. No início do capítulo é dada uma visão geral do experimento de simulação realizado, destacando as *features* consideradas, a identificação dos fatores e variáveis de resposta. Em seguida é apresentado o modelo de simulação, o qual foi desenvolvido de maneira a possibilitar a variação de cada um dos fatores considerados e seus respectivos níveis. Assim, são apresentados detalhes do modelo relacionados à geração dos lotes, ao planejamento do processo, às ordens de fabricação e ao sistema de manufatura. No último item desse capítulo é discutido o processo realizado para gerar a combinação de fatores utilizados na realização da simulação propriamente dita e obtenção dos resultados.

O capítulo 4 aborda aspectos referentes à implementação e ao experimento de simulação realizado, o qual está dividido em duas etapas: geração das ordens de fabricação e simulação do sistema de manufatura. As ordens de fabricação são geradas em uma planilha, enquanto a simulação do sistema de manufatura envolve a execução do modelo, cujos dados provêm da planilha gerada na etapa anterior, e os resultados são gravados em uma outra planilha. Tanto a lógica de funcionamento como o procedimento operacional são

descritos para as duas etapas. Porém, antes disso, é justificada a seleção das ferramentas de desenvolvimento utilizadas.

Os resultados obtidos na simulação, bem como as análises desses resultados serão apresentadas no capítulo 5. Inicialmente são apresentados os gráficos dos principais efeitos nas variáveis de resposta, cuja análise visa evidenciar os efeitos mais relevantes. Em seguida são mostrados os gráficos de interação entre dois fatores, com o intuito de analisar as interações existentes e sua magnitude. Por último, efetua-se a análise de variância (ANOVA) para possibilitar a confirmação das análises realizadas a partir dos gráficos de efeito e interação, e a constatação de outras interações significativas. Enfim, algumas das análises apresentadas visam apenas constatar efeitos já conhecidos, entretanto tais constatações são importantes para confirmar a validade do modelo utilizado na realização das simulações.

Por fim, as conclusões e recomendações no uso de alternativas em planos de processo são apresentadas no capítulo 6. No início desse capítulo são realizadas algumas conclusões gerais, relativas à análise dos resultados apresentada no capítulo anterior. Essas conclusões são detalhadas para cada um dos critérios de desempenho considerados, nos itens 6.2, 6.3 e 6.4. Depois disso, é apresentada uma síntese das conclusões de cada critério de desempenho, o que levou à elaboração das recomendações acerca da utilização de alternativas. Essas recomendações podem ser admitidas como diretrizes na implantação de alternativas. O capítulo encerra considerando as possibilidades para realização de trabalhos futuros, tendo em vista as limitações do estudo.

CAPÍTULO 2
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados alguns aspectos envolvendo o uso de alternativas em planos de processo, tais como aplicação, desempenho e limitação. Isso foi realizado baseado nos trabalhos disponíveis na literatura, embora, como será visto, em nenhum desses trabalhos foi encontrado um modelo de simulação que incorporasse, ao mesmo tempo, todos os aspectos considerados neste trabalho. Dentre estes aspectos incluem-se os seguintes: a possibilidade de falha nas máquinas e ferramentas, distribuições de probabilidade para os tempos de chegada de ordens, existência de tempos de troca de ferramentas, geometria das peças, entre outros. Antes disso, porém, são apresentados alguns conceitos básicos sobre sistemas de manufatura, e sobre a abordagem para realizar sua modelagem visando a avaliação de desempenho. Algumas considerações sobre a simulação de sistemas e projeto de experimentos também foram realizadas.

2.1 Sistemas de manufatura

2.1.1 Definição de sistemas de manufatura

Um sistema de manufatura tem como principal objetivo transformar matérias primas em produtos acabados, e tal afirmação é encontrada em algumas das referências utilizadas neste trabalho como Chang et al. (1998), Niebel et al. (1989), Slack et al. (2002), Rehg (1994), entre outros. Ou numa definição mais elaborada, pode-se considerar o arranjo dos recursos e o processo de fabricação como “[...] um arranjo de tarefas e processos corretamente organizados, para transformar um determinado grupo de materiais brutos e produtos semi-acabados em um conjunto de produtos acabados" (ALTIOK, 1996, p.1, tradução nossa).

Assim, algumas funções desempenhadas pelo sistema de manufatura estão relacionadas à aquisição de matérias primas, produção e distribuição de produtos sendo que o nível de responsabilidade da função produção varia, podendo englobar outras funções como as de projeto do produto, planejamento e controle da produção, além das funções de marketing, contabilidade e finanças (CHANG ET AL., 1998; ALTIOK, 1996; entre outros). Essa abrangência ocorre porque, segundo Slack et al. (2002, p.31), “[...] o nome das funções, as fronteiras e as responsabilidades variam entre organizações – complicação que é particularmente verdadeira para a função produção”. Além disso, a crescente utilização de computadores nas indústrias tem favorecido essa integração, facilitando a obtenção de informações e aumentando a rapidez na tomada de decisões.

2.1.2 Tipos de sistemas de manufatura

Outra questão a ser considerada é a existência de diferentes tipos de sistemas de manufatura. Segundo Slack et al. (2002), é possível distingui-los através de quatro critérios: volume, variedade, variação e contato com o consumidor. Na Fig. 2.1 é apresentado um resumo das características de cada um em função do nível desses critérios.

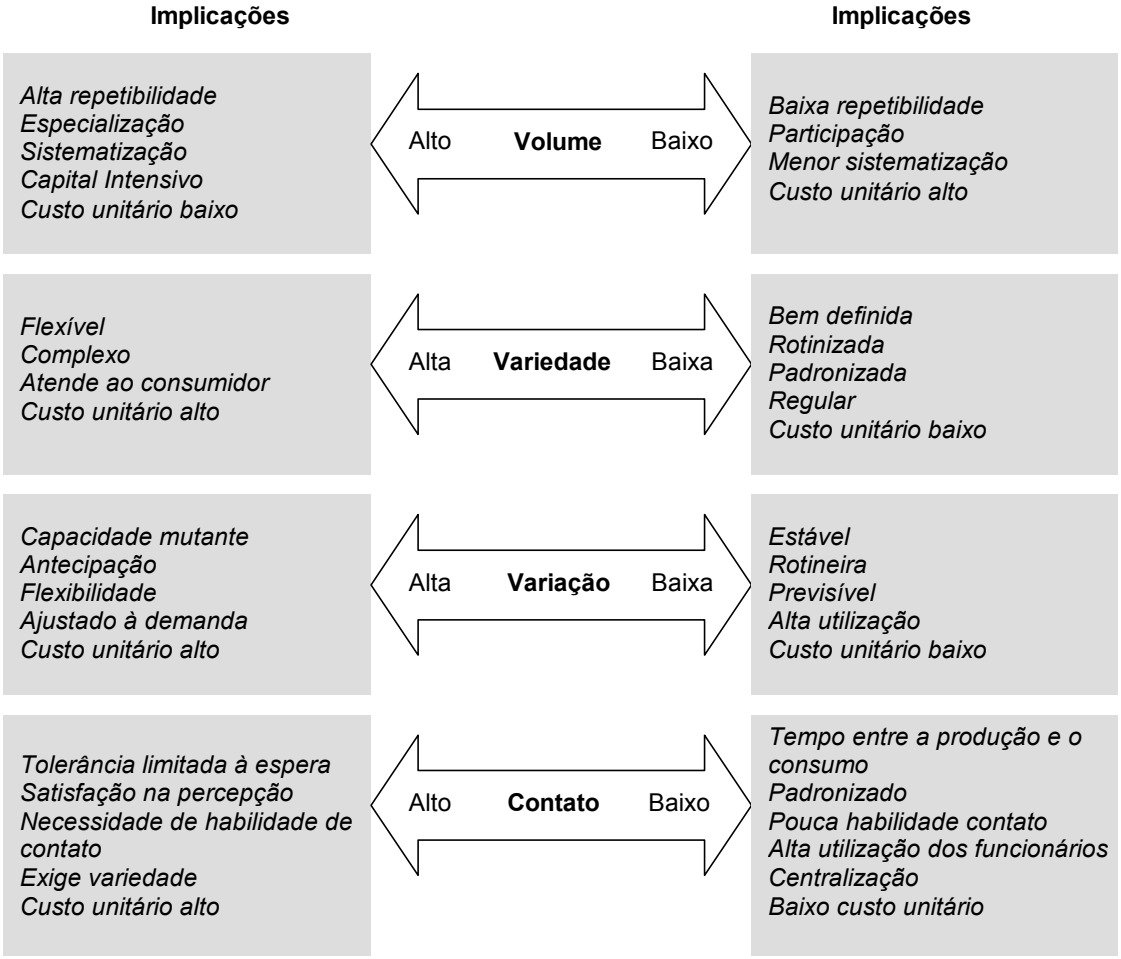


Figura 2.1 - Resumo das características do tipo de produção
(Adaptado de SLACK et al., 2002, p.52)

Uma vez que o volume representa a quantidade de produtos que o sistema é capaz de produzir, supondo que dois sistemas sejam similares com relação aos custos fixos de produção, aquele que produzir a maior quantidade irá obter de um menor custo unitário para seus produtos. É possível aumentar o volume, principalmente, por meio da especialização e sistematização na execução das tarefas.

Já a variedade está relacionada ao grau de flexibilidade que pode ser obtida em relação aos tipos de produtos. Se houver uma grande padronização no sistema, haverá pouco espaço para que diferentes tipos de produtos sejam fabricados. Entretanto, a ausência de padronização tem implicações negativas sobre o volume produzido, o que leva a uma dicotomia entre o volume e a variedade, ou seja, o aumento do volume está relacionado a uma redução da variedade em razão da necessidade de redução do custo unitário.

Isso ajuda a explicar o conceito de variação, o qual está ligado à capacidade do sistema em se adaptar às variações de demanda, ou seja, em mudar sua capacidade de produção. A preocupação com este critério é justificada pelo fato dos sistemas produtivos estarem sujeitos à flutuação na demanda, por isso é desejável flexibilidade com relação ao volume de produção.

O último critério mede o grau de contato com o consumidor, e está relacionado tanto à natureza da operação, como a decisão de manter os consumidores mais próximos ou mais afastados da operação. Assim, quanto mais próximos dos consumidos, mais os sistemas produtivos terão de considerar o baixo grau de tolerância à espera pelos consumidores. Além do fato da qualidade do produto ser julgada não somente pela adequação ao uso, mas também pelo atendimento recebido.

Dessa forma, com base em dois critérios (volume e variedade) tanto Rehg (1994) como Slack et al.(2002) classificam todas as operações de manufatura em cinco grupos: projeto, processo, lotes, massa e contínuo, como pode ser verificado na Fig. 2.2.

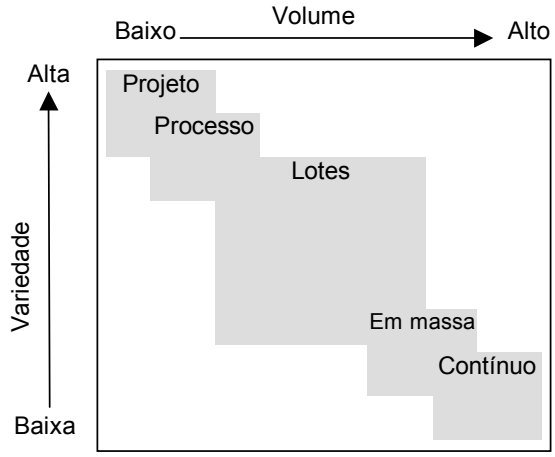


Figura 2.2 - Tipos de processo em operações de manufatura em relação às características de volume e variedade (Adaptado de SLACK et al., 2002, p.129)

No grupo projeto (*project*) estão produtos complexos, com muitas peças e, muitas vezes, um de cada tipo, isto é, bastante customizados. Exemplos desse tipo de operação envolvem características como alta variedade e baixo volume, como a construção de aeronaves, refinarias, plataformas de petróleo, etc.

Já o grupo de processo (*jobbing*) também lida com alta variedade e baixos volumes. Entretanto os recursos não estão alocados a cada produto, como no grupo projeto, pois no grupo processo o volume é ligeiramente maior. Assim, os recursos processam vários produtos diferentes que necessitam do mesmo tipo de operação, como por exemplo a fabricação de peças de reposição.

Outro grupo semelhante a esse é o grupo lotes, porém o volume produzido é maior e a variedade um pouco menor. Por isso a produção é realizada em lotes que se repetem de tempos em tempos, como a produção de subconjuntos para a indústria automotiva.

No contexto cuja variedade é menor ainda e o volume é alto, tem-se a produção em massa. Nesse tipo de produção as variações do produto não afetam o processo, pois as operações são repetitivas, isto é, a variedade de operações é baixa. Isso possibilita a utilização de equipamentos especializados que produzem um volume elevado, tal como a montagem de automóveis, televisores, etc.

Se o volume de produtos aumentar ainda mais, de modo que o fluxo de produtos seja ininterrupto e numa variedade reduzida, tem-se a produção contínua. Nesse grupo estão relacionados produtos papel, aço, derivados de petróleo, têxteis, etc.

Cada tipo de produção envolve o uso de diferentes tipos de arranjos dos recursos e tecnologias de processo, e ambos serão abordados a seguir.

2.1.3 Arranjo na manufatura

"O arranjo físico é uma das características mais evidentes de uma operação produtiva porque determina sua 'forma' e aparência." (SLACK et al., 2002, p.200). Uma vez definido o arranjo, o fluxo de todas as matérias primas, produtos e materiais será definido em função dele.

Rehg (1994), distingue três tipos básicos de arranjo: posicional, funcional e em linha. Num arranjo posicional os recursos se movem até o produto, isso ocorre pelo fato dos produtos serem de grandes dimensões ou muito delicados para serem movimentados (SLACK et al., 2002), como navios, aviões e prédios (Fig. 2.3a).

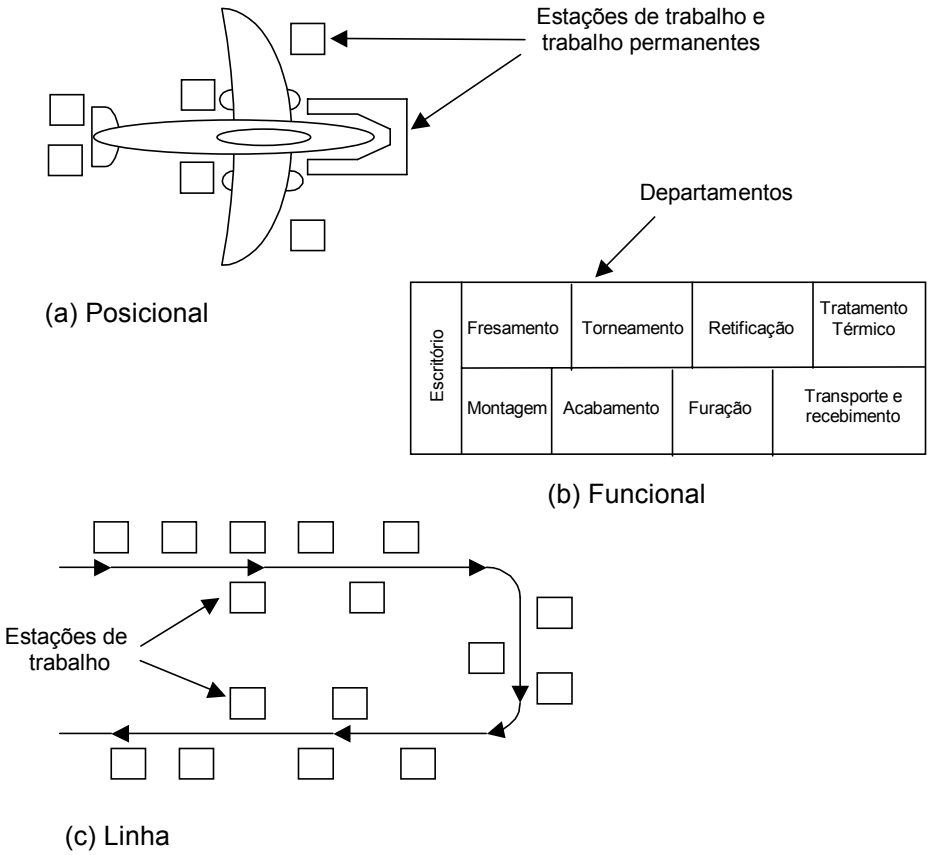


Figura 2.3 - Tipos de arranjos (REHG, 1994, p.27)

Em contraste, no arranjo funcional (*job shop*) os recursos são organizados de acordo com sua função, e os produtos se movimentam através deles. Assim, os recursos de um mesmo tipo são agrupados num mesmo local, e um exemplo típico do uso deste tipo de arranjo é numa ferramentaria, como mostra a Fig. 2.3b.

Já no arranjo em linha ou fluxo (*flow shop*), os recursos estão distribuídos de modo que facilite a produção de um determinado tipo de produto, como por exemplo a linha de montagem de um automóvel ou de um refrigerador (Fig. 2.3c).

Existe ainda um tipo intermediário, que visa obter, ao mesmo tempo, os benefícios dos arranjos em linha e funcional, o qual é chamado de arranjo celular. Neste tipo de arranjo os componentes são agrupados em famílias, e isso é realizado com base nas operações necessárias para a sua produção. Assim, aqueles componentes que possuem características comuns são agrupados numa mesma família e, portanto, são fabricados numa mesma célula. Já que cada célula reúne um grupo de recursos necessários para se executar as operações exigidas por uma determinada família, cada família está associada a uma ou mais células. Logo, este tipo de arranjo é comumente empregado em sistemas que possibilitam agrupar os produtos em famílias, e a metodologia aplicada para isso é conhecida como tecnologia de grupo (*Group Technology – GT*).

A escolha do tipo de arranjo não é realizada isoladamente, está relacionada com o tipo de processo, como mostra a Tabela 2.1. Os processos do grupo projeto e contínuo têm à disposição apenas um tipo de arranjo, enquanto cada um dos demais grupos (isto é, processo, lotes e massa), têm dois.

Tabela 2.1 - Relação entre os tipos de processo e os tipos de arranjo (SLACK et al., 2002, p.203)

Tipo de processo	**Tipo de arranjo**
Projeto	Arranjo posicional
Processo	Arranjo funcional
Lotes	Arranjo celular
Massa	Arranjo em linha
Continuo	

Outros tipos de arranjos podem ser obtidos unindo dois ou mais tipos de arranjos dando origem aos chamados arranjos mistos (SLACK et al., 2002). Neste tipo de arranjo, tipos puros de alguns arranjos são utilizados em diferentes etapas da operação. Por exemplo, uma mesma fábrica pode utilizar o arranjo posicional na montagem de um equipamento, mas a fabricação dos componentes utiliza o arranjo celular, enquanto na embalagem se utiliza um arranjo funcional.

2.1.4 Tecnologia de processo

Além dos tipos de arranjos mostrados, existem outros tipos que surgiram com o desenvolvimento de tecnologias de manufatura, as quais permitiram que as máquinas realizassem uma grande variedade de operações (ALTIOK, 1996). Assim surgiram as linhas flexíveis (*transfer)*, como um caso especial do arranjo em linha, no qual um sistema totalmente automatizado (com robôs, dispositivos de movimentação computadorizados, máquinas automatizadas específicas para um determinado tipo de produto, etc.) é dedicado para alto volume de produção de poucos tipos de produtos. Por outro lado, um caso especial de arranjo funcional com um elevado nível de automação deu origem ao sistema flexível de manufatura (*Flexible Manufacturing Systems - FMS*). Nestes sistemas, o que se pretende é obter um elevado nível de automação com alta flexibilidade, ou seja, implementar automação com flexibilidade em relação ao volume e os tipos de produtos.

As tecnologias de processo podem envolver ou não o uso de recursos sofisticados, ou seja, a tecnologia de processo não se resume exclusivamente aos recursos mais modernos presentes no sistema de manufatura, mas a todos os recursos envolvidos. Para Slack et al (2002), tecnologia de processo consiste na utilização de máquinas, equipamentos e dispositivos que buscam ajudar a produção a agregar valor e atingir seus objetivos.

Num sistema de manufatura, a tecnologia de processo compreende máquinas ferramentas, robôs, veículos de transporte, ferramentas, dispositivos de movimentação, etc., sendo que o uso de uma determinada tecnologia está relacionada ao tipo de sistema de produção. Isso pode ser mais bem compreendido por meio da Fig 2.4, a qual relaciona as tecnologias de produção com uma determinada combinação do volume e variedade. Da mesma forma, o grau de flexibilidade da tecnologia também pode ser definido baseado nessa combinação.

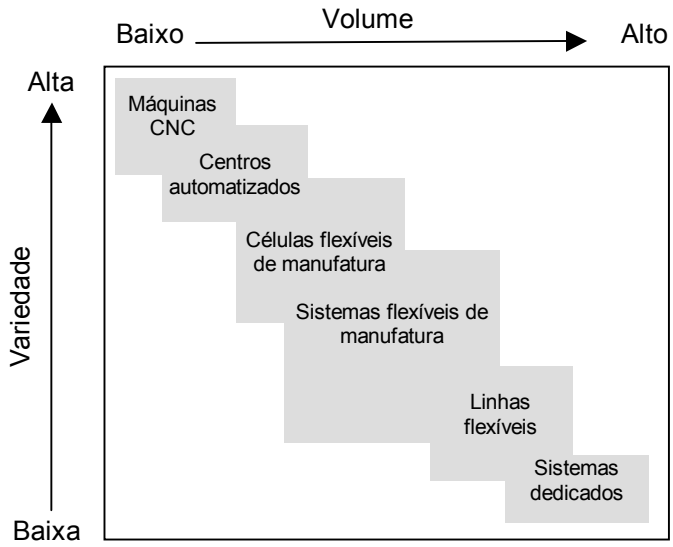


Figura 2.4 - Características de volume e variedade das tecnologias de manufatura (Adaptado de SLACK et al., 2002, p.248)

Mas apenas a definição do produto (projeto do produto) e do sistema de manufatura (arranjo produtivo e da tecnologia de processo) não permite que um componente seja produzido, é preciso definir as condições de operacionais do processo. Assim é necessário estabelecer a o elo entre o projeto do produto e a manufatura, isto é, a ponte crítica entre projeto e manufatura, denominada planejamento de processos (CHANG et al., 1998).

2.2 Planejamento de processos

2.2.1 Atividades do planejamento de processos

O planejamento de processos consiste numa das atividades de maior detalhamento na fase de projeto. Isto porque, uma vez definido o produto e seus componentes (projeto do produto), há a necessidade de definir como os mesmos serão fabricados (projeto do processo). Na definição de Chang et al (1998, p.515, tradução nossa) "[...] o planejamento do processo é a função dentro da manufatura que possibilita estabelecer quais os processos e parâmetros deverão ser usados". Isso é realizado a partir de especificações fornecidas pela engenharia de projeto, e baseado nas restrições do sistema de manufatura disponível para produzir a peça. Algumas das etapas para se realizar esse trabalho são mostradas na Fig. 2.5, e evidentemente algumas delas poderão diferir de uma empresa para outra em função da abrangência da função produção nos diferentes sistemas.

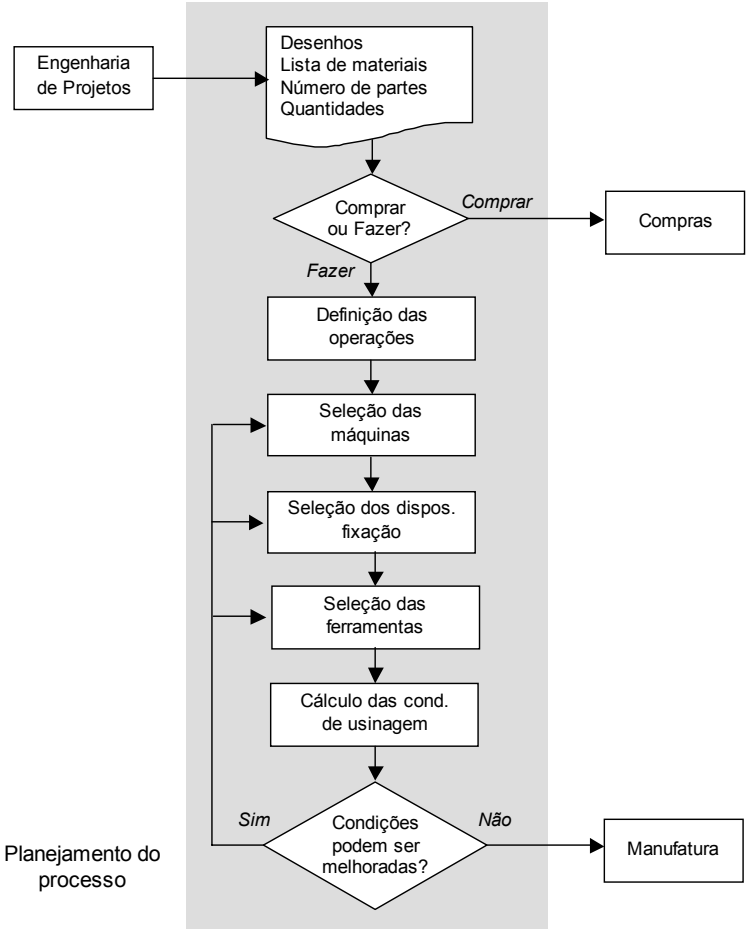


Figura 2.5 - Atividades do planejamento do processo
(Adaptado de FERREIRA, 1996 e REHG, 1994)

Basicamente, a função do planejamento de processos é traduzir os requisitos do projeto em um roteiro que permita a produção do componente, a esse roteiro dá-se o nome de plano de processo. Assim o plano de processo deve conter respostas a algumas questões, tais como:

- quais máquinas serão necessárias?
- quais as operações que serão realizadas em cada máquina?
- qual a seqüência de operações?
- quais os parâmetros de fabricação?
- quais os materiais que serão utilizados?
- quais os instrumentos de controle utilizados?
- qual o tempo de fabricação?

A resposta a essas questões pode, eventualmente, conduzir à necessidade de reprojeto do produto face às limitações existentes no chão de fábrica. Por isso, algumas empresas têm associado as questões de projeto de produto e processo, ou seja, equipes de produto e processo passaram a atuar em conjunto visando reduzir os conflitos e aumentar a produtividade. Segundo Whitney (1990 apud SLACK, 2002), 70% a 80% dos custos de produção são definidos ainda na fase de projeto, evidenciando que melhorias significativas nesse sentido possibilitam uma redução de custos considerável.

Assim, a busca da eficiência no planejamento de processos pode significar um importante diferencial competitivo, principalmente no mercado atual, onde cada vez mais é o cliente que determina o preço dos produtos. Tendo em vista que um mesmo produto pode ser fabricado por diferentes empresas, empregando diferentes processos, conseqüentemente pode-se incorrer em custos diferentes dos produtos. Para Chang et al. (1998, p. 515, tradução nossa), as instruções do plano de processo "[...] ditam o custo, qualidade e taxa de produção, portanto, planejamento de processos é de extrema importância para o sistema de produção". Isso faz do planejamento de processos uma atividade chave em qualquer indústria de manufatura, embora nem sempre receba a merecida importância.

2.2.2 Geração do plano de processos

O plano de processos pode ser elaborado manualmente pelo processista ou com o auxílio de um programa computacional, e esta última abordagem é chamada de planejamento de processos auxiliado por computador (*Computer Aided Process Planning – CAPP*). Quando o processista elabora o plano de processo manualmente, ele realiza essa tarefa baseado na sua experiência, que envolve uma significativa subjetividade.

A vantagem em se realizar um plano de processo manualmente é que, baseado na sua experiência, o processista pode otimizar o plano de processos sem realizar exaustivos testes. Na verdade, boa parte dos testes já foram realizados por ele no exercício de sua

função, ou baseado em informações e conhecimentos de outras pessoas. Por outro lado, o tempo despendido na elaboração manual de um plano de processos é longo, e não existe padronização na seleção de processos (imprecisão). Além disso, o seu custo é alto, principalmente quando comparado àquele elaborado com auxílio do computador.

Por isso, de acordo com Chang et al.(1998, p. 524, tradução nossa) "[...] os recentes desenvolvimentos em planos de processo auxiliado por computador têm focado a eliminação da intervenção do processista no planejamento do processo". No entanto, aqueles autores reconhecem a existência de alguns problemas associados com a atividade de planejamento de processos, tais como:

- o acúmulo de experiência requer um significativo período de tempo;
- experiência representa somente um conhecimento aproximado, não exato;
- experiência não é diretamente aplicável a novos processos ou novos sistemas.

Em um sistema auxiliado por computador é possível aumentar a padronização nas decisões, integrar diferentes tipos de bancos de dados (ferramentas, operações e máquinas) e compartilhar informações de projeto, processo e manufatura. Isso permite obter os seguintes benefícios, conforme indica Niebel et al (1999):

- reduzir a habilidade requerida do processista;
- reduzir o tempo de planejamento do processo;
- reduzir os custos de planejamento do processo e manufatura;
- criação de planos de processo mais consistentes;
- obtenção de planos mais precisos;
- aumentar a produtividade.

Entretanto, a tarefa de desenvolvimento de um sistema CAPP é árdua, pois num plano de processos podem estar acumulados muitos anos de experiência de processistas e demais envolvidos. Mas, uma vez realizada a aquisição e codificação desse conhecimento, o mesmo passa a ser um patrimônio da empresa, e não mais apenas do processista.

2.3 Planejamento de processos com alternativas

2.3.1 Considerações sobre o uso de alternativas

Normalmente a elaboração de planos de processo não considera recursos alternativos como aponta Colosimo et al. (2000), embora na literatura a utilização de alternativas em planos de processo já está disponível há algum tempo. Assim, ao selecionar uma determinada máquina para executar uma operação sobre a peça, o processista seleciona apenas um tipo de máquina, mesmo que em alguns casos possa existir mais de uma. Por exemplo, na operação de furação sobre uma peça, pode-se usar tanto uma furadeira ou uma fresadora. Embora, a princípio, por razões econômicas (custo da máquina, treinamento de operadores, etc.) o uso da furadeira seja mais vantajoso, numa situação em que a furadeira não estiver disponível por alguma razão, a fresadora poderia ser utilizada se

tivesse sido selecionada e estivesse disponível para realizar a operação. Mas essa situação só é levada em consideração em um plano de processos com alternativas.

Num plano de processos com alternativas, recursos alternativos são previamente selecionados para realizar uma operação. Assim, podem ser consideradas alternativas de máquina, ferramenta, seqüência de processamento, dispositivos de fixação, etc. Com isso, todo o trabalho despendido na seleção de recursos alternativos tem como contrapartida a obtenção de ganhos em flexibilidade e produtividade (CAPRIHAN e WADHWA, 1997; USHER, 2003).

Mesmo nos sistemas de manufatura que empregam um elevado nível de automação em seus processos, resultando numa reduzida probabilidade de falhas, é impossível prever todas as possíveis interrupções que podem ocorrer no chão de fábrica. Assim, a quebra de uma máquina, a falha de uma ferramenta, ou a impossibilidade de se utilizar um recurso programado para realizar uma determinada operação leva a interrupções da produção. Nesses casos podem ocorrer atrasos nos prazos de entrega ou prejuízos decorrentes dos improvisos adotados visando restabelecer o processo. Isto porque, no momento de uma interrupção, as intervenções realizadas visando a readequação do plano de processos são efetuadas sob pressão ou por pessoal não qualificado para tal atividade, o que aumenta a possibilidade de erros. Sem contar que muitos dos improvisos adotados podem comprometer a qualidade dos produtos e, conseqüentemente, gerar aborrecimentos dos clientes.

Nesse contexto, a adoção de alternativas em planos de processos pode ser uma opção para se obter mais rapidez e eficiência na solução de interrupções na produção, pois uma ferramenta ou máquina alternativa já foi previamente selecionada no plano de processos. Além do mais, pode-se reduzir o número de trocas de ferramenta, uma vez que possibilita a utilização de uma ferramenta alternativa já disponível no magazine de ferramentas da máquina (FERREIRA E WYSK, 2001a e 2001b).

2.3.2 Exemplo da aplicação de alternativas

Para exemplificar o uso de alternativas, será realizada uma adaptação do plano de processo proposto por Schafer (1981 apud REHG, 1994) para a usinagem de uma peça de aço de baixo teor de carbono e rugosidade média. O desenho da peça é mostrado na Fig 2.6, onde as dimensões estão em milímetros.

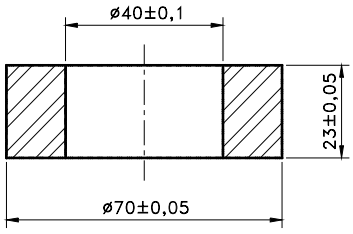


Figura 2.6 - Peça a ser produzida (SCHAFER, 1981 apud REHG, 1994, p.167)

De posse dessas informações, um processista foi incumbido de desenvolver o processo para a produção da peça em um sistema de manufatura do tipo funcional (*job shop*). Assim, o processista seleciona o material bruto disponível no estoque, define as operações necessárias para produzir a peça (as quais deverão ser executadas no chão de fábrica, supondo que não haja possibilidade de terceirização de serviços), verifica as máquinas capazes de executar essas operações e verifica se há dispositivos de fixação e ferramentas disponíveis que podem ser utilizadas na operação. Caso não houver disponibilidade de dispositivos e ferramentas, seleciona-se outros a partir de catálogos e manuais, de onde serão obtidos também os dados de usinabilidade para o cálculo das condições de corte e tempos de usinagem. Isso resulta na elaboração de quatro concepções diferentes de seqüência de operações no plano de processo, como mostra a Tabela 2.2, dentre as quais cabe ao processista selecionar a mais adequada.

Tabela 2.2 - Diferentes concepções de planos de processo obtidas para uma peça (unidades em mm) (SCHAFER, 1981apud REHG, 1994, p.167, tradução nossa)

Operação	**Concepção 1**	**Concepção 2**	**Concepção 3**	**Concepção 4**
1	Faceamento do primeiro lado.	Furação com broca helicoidal em 2 passos: 20 e 38.	Desbaste no diâm. externo com 70	Furo acabado com broca helicoidal em 2 passos: brocas de 30 e 40.
2	Furo acabado em 3 passos: brocas 10 e 38 , e mandrilamento com diâmetro 40.	Faceamento do primeiro lado.	Furação com broca helicoidal para acabamento com 40.	Desbaste no diâm. externo com 70.
3	Desbaste no diâm. externo com 70.	Corte da peça.	Faceamento do primeiro lado	Faceamento do primeiro lado
4	Corte da peça.	Faceamento do segundo lado.	Corte da peça.	Corte da peça.
5	Faceamento do segundo lado.	Desbaste no diâm. externo com 70	Faceamento do segundo lado.	Faceamento do segundo lado.
6		Furo acabado com 40 por mandrilamento.		

Em um plano de processo comum, após uma avaliação levando em conta o tempo, qualidade e/ou custo de produção, o processista seleciona apenas uma das concepções geradas. Para exemplificar essa situação, admitiu-se alguns tempos para a execução das operações consideradas, tal como mostra Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Tempos de usinagem admitidos para peça nas diferentes concepções

	Tempos de usinagem [min.]			
Operação	**Concepção 1**	**Concepção 2**	**Concepção 3**	**Concepção 4**
1	0,5	2	1	2
2	3	0,5	1,7	1
3	1	0,5	0,3	0,3
4	0,5	0,5	0,5	0,5
5	0,3	1	0,3	0,3
6		1		
TOTAL	**5,3**	**5,5**	**4,0**	**4,1**

A principal diferença entre as diferentes concepções de seqüência de operações, além da seqüência em si, é o fato das concepções 1 e 2 admitirem o uso da operação de madrilamento enquanto nas concepções 3 e 4 esta operação não é utilizada. A vantagem no uso do madrilamento é a obtenção de furos mais precisos, de melhor qualidade, mas como a tolerância do furo não é “apertada”, não existe uma razão para essa escolha pelo fato da mesma incorrer numa operação adicional, aumentando-se o custo. Supondo-se que o processista considere apenas o critério de menor tempo de produção ele irá escolher a concepção 3.

Nesse procedimento, comumente realizado pelos processistas para a obtenção de planos de processos, diversas concepções são geradas, porém apenas uma é selecionada. Isso resulta em desbalanceamento do sistema produtivo e mau uso do tempo do processista. O desbalanceamento é ocasionado porque, ao selecionar apenas os recursos considerados mais eficientes, supondo que cada operação seja realizada numa máquina diferente, isto resulta numa sobrecarga destes recursos, aumentando-se o estoque em processo e atrasos na produção (WEINTRAUB et al., 1999; CHANG e CHEN, 2002; SAYGIN et al.,2001, entre outros). Percebe-se que o tempo do processista é mal empregado, pois uma parte do mesmo foi desperdiçado na elaboração e análise de concepções que não foram utilizadas.

No sentido inverso, se o processista optasse por utilizar mais de uma das concepções obtidas, e gerar planos de processo com alternativas, ele poderia proporcionar maior flexibilidade ao sistema (CAPRIHAN e WADHWA, 1997; USHER, 2003; CORTI, 2004; entre outros). Por exemplo, na Tabela 2.3 percebe-se que a concepção 4 apresenta uma pequena diferença de tempo de usinagem em relação à concepção 3, e caso não fosse possível executar a primeira operação (i.e. desbaste no diâmetro externo) na concepção 3, em razão de algum problema (p. ex. falha na máquina ou no suprimento de ferramentas), a concepção 4 poderia ser utilizada. Isso porque na concepção 4 a primeira operação a ser executada (i.e. furação com broca helicoidal) é diferente da primeira operação da concepção 3, e assim haveria tempo hábil para solucionar o problema sem interromper a produção.

Isso sem contar que, além das diferentes concepções de seqüência de operações, o processista poderia ter considerado ainda diferentes tipos de ferramentas e máquinas. Isto reconhecidamente iria aumentar o seu trabalho, em razão da necessidade de combinar as diferentes alternativas de máquinas e ferramentas para se obter o melhor plano. Contudo traria resultados melhores uma vez que várias alternativas são analisadas ao mesmo tempo.

O uso de alternativas poderia trazer benefícios mesmo considerando a hipótese de que as operações, em cada uma das concepções geradas, fossem realizadas numa única máquina. Por exemplo, considere que as concepções 1 e 2 fossem realizadas em um determinado tipo de máquina, no caso um torno, enquanto as concepções 3 e 4 são executadas em um outro tipo de máquina (p. ex. um centro de usinagem). Nesse contexto, o uso de alternativas possibilita utilizar máquinas diferentes, de acordo com a concepção adotada, ao passo que o plano de processos tradicional só permitiria adotar uma concepção. Logo, se várias concepções fossem consideradas, haveria a possibilidade de fabricar a peça em uma determinada máquina de acordo com as condições do chão de fábrica num determinado momento. Isso significa que, se uma máquina considerada na concepção 3 ou 4 estivesse inapta por algum motivo, e a previsão de tempo gasto para seu restabelecimento fosse maior que a diferença entre os tempos para usinagem nas concepções 1 ou 2, a peça poderia ser produzida na máquina previamente selecionada nessas concepções.

Assim, mesmo que o tempo de usinagem nessas máquinas seja maior, como se verificou na Tabela 2.3, pode ser mais vantajoso produzir a peça de acordo com as concepções 1 ou 2, ao invés de aguardar pelo restabelecimento da máquina selecionada na concepção 3 ou 4. Isso significa que um recurso utilizado como alternativa, mesmo não sendo tão eficiente como aquele inicialmente selecionado, ainda pode trazer maiores benefícios se comparado à situação onde não existem alternativas. É por esse motivo que estudos envolvendo a análise de alternativas tem de considerar uma penalidade em relação ao tempo para um recurso alternativo, pois normalmente ele possui uma eficiência menor (CAPRIHAN e WADHWA, 1997; USHER, 2003; FERREIRA E WYSK, 2001b; entre outros).

Nesse contexto, o estudo do desempenho de alternativas em planos de processo pode definir alguns critérios relativos à aplicação, como estabelecer um limite para a diferença entre os tempos de usinagem na utilização de um recurso alternativo, a partir do qual o uso de alternativas deixe de ser benéfico para o sistema (penalidade máxima). Além disso, deve-se definir quantas alternativas devem ser consideradas (número de alternativas), e quais os benefícios obtidos em cada tipo de alternativa utilizada (tipos de alternativas: máquinas, ferramentas ou seqüência). Assim nos itens seguintes são apresentados alguns trabalhos envolvendo o uso de alternativas em vários cenários encontrados na literatura, tais como: sistemas de manufatura, geração de planos de processo por computador, tecnologia de grupo e engenharia simultânea.

2.3.3 Alternativas em sistemas de manufatura

O sistema de manufatura mais simples possível é aquele que possui uma única máquina, e Ferreira e Wysk (2001a, 2001b) avaliaram a influência de alternativas em planos de processo para esse sistema.

Dessa forma, inicialmente Ferreira e Wysk (2001a) analisaram a influência de alternativas considerando apenas uma máquina em situação ideal, isto é, sem a ocorrência de quebra de máquina ou falha nas ferramentas (afiação ou troca). A hipótese sustentada por eles é que numa situação mais complexa, como num sistema de manufatura dotado de mais máquinas e a possibilidade de ocorrência de falhas (nas máquinas ou ferramentas), a utilização de planos de processo com alternativas poderia ser mais vantajosa. No sistema considerado, eles avaliaram comportamento do tempo total de usinagem de três lotes compostos por diferentes tipos de peças, variando-se a seqüência dos lotes e a quantidade de cada lote em duas situações distintas: sem alternativas ou com alternativas de ferramentas. O intuito do uso de ferramentas alternativas consistiu em minimizar o tempo gasto em *set-ups*, sendo que a seqüência de chegada das peças não era previamente conhecida. Os resultados apontam uma pequena redução no tempo total de usinagem quando são consideradas ferramentas alternativas. A quantidade de peças consideradas por eles foi pequena, possivelmente pelo fato do procedimento utilizado para avaliar a presença de alternativas ter sido implementado sem o auxílio de um programa computacional.

Já num outro trabalho, Ferreira e Wysk (2001b) realizaram um estudo mais abrangente, ainda visando a redução da quantidade de *set-ups*. Desta vez eles avaliaram a influência do uso de alternativas de ferramenta em planos de processo através de um modelo de simulação computacional. Além do mais, eles consideraram a influência de vários fatores sobre a produtividade, tais como: seqüência do lote, quantidade do lote, variedade de peças, número de *features* repetidas, número de *features* por peça, capacidade do magazine de ferramentas e tipo de plano considerado. Os resultados ainda foram restringidos mais uma vez a um sistema de manufatura composto por apenas uma máquina em situação ideal. O cálculo da produtividade foi feito com base num tempo fixo de produção. Assim, a quantidade de peças considerada em cada circunstância analisada (sem alternativas e com alternativas) considerava um número diferente de peças. Esse procedimento não garante as mesmas condições para todos os testes, uma vez que a quantidade de peças utilizada em cada um deles não é a mesma. Mesmo assim, eles conseguiram identificar benefícios na utilização de alternativas, chegando a verificar ganhos de produtividade de até 20% sob certas condições de tamanho de lote e variedade de peças. Outra contribuição nesse trabalho, reconhecida pelos próprios autores, é que quase a totalidade dos trabalhos envolvendo o uso de alternativas não apresenta nenhum detalhe em relação à geometria da peça e operações executadas.

Outro trabalho sobre o uso de alternativas ainda considerando apenas uma máquina foi desenvolvido por Mello e Ferreira (2004). Nesse trabalho os autores buscaram aperfeiçoar o modelo de simulação proposto por Ferreira e Wysk (2001b). Por isso, consideraram um modelo de simulação baseado no tempo de chegada de uma quantidade fixa de peças, ou seja, a quantidade de peças utilizadas na simulação era sempre a mesma. Ademais, foram consideradas distribuições de probabilidade para os tempos de fabricação e a possibilidade de reafiação ou troca de ferramentas.

Nesse cenário, Mello e Ferreira (2004) verificaram que o uso de alternativas pode conduzir tanto a um aumento de produtividade, como também a perdas. Os ganhos advêm do aproveitamento de uma ferramenta que já estava disponível no magazine da máquina, enquanto as perdas podem ocorrer em razão da menor eficiência da ferramenta alternativa em relação a primeira opção de ferramenta. No modelo considerado, quando uma ferramenta alternativa é selecionada, uma penalidade é associada à durabilidade da ferramenta e ao tempo de usinagem. Assim o uso de uma ferramenta alternativa implica tanto em um maior tempo de *set-up* , em razão do aumento da quantidade de trocas de ferramenta, como a um maior tempo gasto para usinar uma peça, em razão da penalidade associada ao tempo de usinagem. Em função desses resultados eles recomendaram a utilização de alternativas somente para os casos em que não houver penalidades excessivas sobre a ferramenta alternativa a ser utilizada, pois o uso de uma ferramenta alternativa de baixa eficiência (durabilidade e tempo de usinagem) pode comprometer a produtividade.

Quanto à aplicação de alternativas em sistemas de manufatura mais complexos, verifica-se que maior parte dos trabalhos encontrados na literatura envolve o uso de FMS. Uma possível razão para isso, dentre outros motivos, é porque a flexibilidade obtida nesses sistemas é tradicionalmente inferior a esperada. Isto ocorre porque, segundo Ferreira e Wysk (2001a), o programa de controle não é flexível o suficiente para possibilitar a alteração do plano de processos em tempo real, por isso alguns problemas poderão afetar a produção. Dessa forma, de acordo com esses autores, o uso de alternativas possibilita tanto ao processista, ao operador da máquina ou ao programa de controle do sistema encontrar a melhor solução para o problema de interrupção no chão de fábrica. Outra motivação para o uso de alternativas em FMS é que o investimento realizado na aquisição desses sistemas é elevado, por isso o interesse em melhorar a sua eficiência. Visto que tal investimento poderá ser compensado utilizando estratégias mais eficientes (CHAN, 2003)

Nesse contexto Caprihan e Wadhwa (1997) apresentam uma metodologia baseada em Taguchi e simulação para analisar a influência de rotas alternativas na performance de um FMS. O objetivo dos autores é desenvolver procedimentos para auxiliar os projetistas de FMS. Eles se apóiam no ponto de vista de Stecke (1994, apud CAPRIHAN e WADHWA

,1997) de que a maioria das pesquisas até agora não têm indicado adequadamente os benefícios que podem ser obtidos usando rotas flexíveis.

Uma contribuição de Caprihan e Wadhwa (1997) foi mostrar que o uso de alternativas leva a um aumento em flexibilidade das rotas, porém nem sempre essa flexibilidade é benéfica quando as alternativas têm uma penalidade associada ao tempo de operação. Segundo eles, o aumento do número de rotas flexíveis de uma para duas aumenta o desempenho razoavelmente mesmo ao custo de uma penalidade, mas continuando a aumentar a quantidade de rotas o aumento do desempenho não é garantido em termos da redução do tempo de entrega.

Outras pesquisas, como Usher (2003), também apontam para a mesma direção. Nesse estudo o autor aponta benefícios no desempenho global do sistema de manufatura com o uso de alternativas. Ele mostra que o desempenho do sistema piora com o aumento do número de alternativas para a condição de seleção das alternativas pelo menor tempo de processamento. Segundo o autor, isso mostra que os processistas devem ser cuidadosos com relação ao tempo e recursos despendidos na geração de alternativas ou planos ótimos. Portanto, a conclusão é que um pequeno número de boas alternativas é melhor que uma grande variedade de alternativas de baixo desempenho. Além do fato de que um menor número de alternativas reduz a complexidade da programação.

Apesar dos resultados de Usher (2003) terem sido importantes o autor não considerou questões como a possibilidade de falha nos recursos e a influência do tamanho dos lotes. Além do mais, ele considerou como critérios de desempenho apenas o tamanho das filas nas máquinas e o cumprimento dos prazos de entrega, deixando de lado um critério importante como a produtividade.

Já Mahmoodi et al. (1999) pesquisaram os efeitos das regras de sequenciamento e rotas flexíveis no desempenho do FMS. Eles concluíram que o impacto da escolha dessas regras depende do nível de flexibilidade das rotas e da medida de desempenho considerada. Segundo eles, a presença de rotas flexíveis supera os efeitos da sobrecarga, quebras no sistema, configuração da fábrica e regras de sequenciamento. Além do mais, os resultados indicaram que o fator configuração da fábrica tem pouco ou nenhum impacto no desempenho do *lead time*. No estudo realizado, eles consideraram dois níveis para esse fator, configuração tradicional, onde qualquer número de *automated guided vehicles* (AGV) serve todas as estações usando os mesmos trajetos, e configuração Tandem, na qual zonas específicas são definidas para os AGV's e servem somente estações junto delas. Eles também afirmam que quando as rotas são totalmente flexíveis, a escolha da regra de sequenciamento não é crítica.

Chan (2003) realizou um trabalho semelhante ao de Mahmood et al. (1999), considerando um FMS diferente e outras hipóteses. Nesse estudo, Chan (2003) avaliou o desempenho de três estratégias diferentes de roteamento, combinando quatro tipos de

regras de envio de ordens. O autor assumiu tanto o cenário no qual a capacidade da área de armazenamento é infinita quanto finita, e considerou também a influência do efeito da mudança no mix de peças. A consideração de uma área finita foi realizada porque na prática a capacidade da área de armazenamento é limitada. Como medidas de desempenho Chan (2003) considerou o tempo para a execução de uma quantidade fixa de peças (*makespan*), a taxa de utilização dos recursos, o tempo médio de fluxo e o tempo médio de atraso nas áreas de armazenamento (*buffers*). De acordo com Chan (2003), considerando a capacidade infinita da área de estoque, as rotas com alternativas pré-planejadas, combinadas com as regras de envio de ordens de menor tempo total de processo, leva aos melhores resultados para todas as medidas de desempenho consideradas. Contudo, quando a área de armazenamento é considerada com capacidade finita, a estratégia de roteamento que utiliza alternativas dinâmicas obtém melhores resultados nas três medidas de desempenho consideradas, exceto para o atraso na área de armazenamento. O autor também verificou que a variação no mix de peças não é significante. Deve-se mencionar que nesse trabalho os tempos de *set-up* não foram considerados.

2.3.4 Alternativas na programação e sequenciamento da produção

De acordo com Lee e Kin (2001), a programação é uma função dos sistemas de manufatura que visa assegurar recursos no momento certo para as operações indicadas no plano de processo, e tradicionalmente o planejamento do processo e a programação da produção são realizados separadamente. Estes autores propõem uma integração dessas atividades com um método baseado em simulação, no qual um modelo de simulação realiza a medição do desempenho baseado na combinação de alternativas disponíveis de planos de processo, por meio de algoritmos genéticos, de modo que satisfaça os critérios de qualidade e de sequenciamento. Segundo Lee e Kin (2001), os resultados mostram que o método proposto reduz o tempo de produção e atrasos. Em razão disso, eles recomendam que o planejamento de processos e a programação da produção sejam realizados em conjunto, pois isso possibilitaria uma melhoria do desempenho e da produtividade dos sistemas de manufatura. Eles concluíram que a solução usando algoritmos genéticos é melhor que aquela na qual a combinação de planos de processos é feita aleatoriamente. Além disso, o desempenho é ainda melhor quando a medida de desempenho da função programação é a data de entrega. Porém, uma dúvida da validade dos resultados é justificada pelo fato dos autores não terem apresentado no artigo nenhuma informação sobre o sistema de manufatura utilizado na modelagem, tais como quantidade de máquinas, arranjo, existência de gargalos, etc.

Atraso na produção é um dos problemas mais comuns enfrentados pela maioria das empresas de manufatura. Esse problema se torna ainda maior quando a satisfação dos clientes está diretamente ligada ao desempenho nos prazos de entrega. Motivados por essa

preocupação, Weintraub et al. (1999) desenvolveram um algoritmo iterativo baseado em simulação determinística para a programação da produção, levando em consideração as datas de entrega (HODGSON, 1998, apud WEINTRAUB et al., 1999). Segundo eles, quando esse algoritmo considera alternativas, é possível identificar mais rapidamente o programa ótimo (ou próximo ao ótimo), pois segundo eles a ocorrência de sobrecarga nos recursos é decorrência do uso de sistemas de planejamento baseados em capacidade finita e no uso de um mesmo recurso preferido repetidamente. Por isso esses autores propõem uma metodologia para programação da produção baseada nas datas de entrega desenvolvida por Hodgson (1998 apud WEINTRAUB et al. 1999) para incluir a análise de alternativas. As alternativas são formuladas considerando diferentes máquinas para a mesma tarefa, alterando-se a seqüência e a rota de execução das tarefas.

A meta do algoritmo proposto por Weintraub et al. (1999) é selecionar as máquinas para as tarefas, de modo que as datas de entrega sejam satisfeitas, ao mesmo tempo que os custos de manufatura são minimizados. Após analisar diversos tipos de alternativas (isto é, seqüência, rotas e operações), os autores concluíram que existe uma melhoria significativa no desempenho da programação quando alternativas são consideradas. Segundo eles, “Programação com alternativas podem aumentar bastante a capacidade de satisfazer as datas de entrega sob várias condições do chão de fábrica.” (WEINTRAUB et al., 1999, p.1100, tradução nossa). Além disso, de acordo com esses autores, dependendo do tipo de alternativa considerada pode haver uma grande diferença no desempenho. Assim, Weintraub et al. (1999) enfatizam que programas com alternativas de operações (máquinas) resultam em maiores melhorias, seguidas dos programas com alternativas de rota e seqüência. Além disso, o grau de melhoria no cumprimento dos prazos de entrega com o uso de alternativas varia em função da probabilidade na formação de recursos gargalos.

Xirouchakis et al (1997) avaliaram a influência da seqüência de processamento em relação ao custo de usinagem de uma peça. Nesse estudo o objetivo era evidenciar qual a seqüência de usinagem em um plano de processo com alternativas que conduzia ao menor custo.

2.3.5 Geração automática de planos de processo com alternativas

Com relação à geração automática de planos de processo Detand e Kruth (1992) apresentaram um sistema CAPP considerando a possibilidade de geração de processos alternativos. Detand e Kruth (1992) concluíram que planos de processo com alternativas aumentam a flexibilidade de programação e controle do chão de fábrica. Eles mencionaram também que planos de processo com alternativas são interessantes não somente para o chão de fábrica tradicional, como também para células flexíveis de manufatura e células flexíveis de montagem.

Mas, segundo Colosimo et al. (2000), existe uma lacuna entre as pesquisas acadêmicas envolvendo o uso de alternativas e a prática na manufatura, pois alternativas não vêm sendo consideradas pelos processistas e pelos programas para geração de planos de processo (CAPP). Colosimo et al. (2000) destacam que as razões para não difusão de planos de processo com alternativas nas indústrias têm sido a dificuldade de gerar soluções viáveis para uma grande variedade de pecas e operações de manufatura. Para resolver isso, eles propõem um novo método para geração de alternativas viáveis para planos de processo (*alternative process plan generator – APPG*). A idéia consiste em traduzir planos lineares (sem alternativas) para não lineares (com alternativas), e assim tem-se a vantagem de iniciar por uma solução viável (obtida de um programa seqüencial). Para isso, um módulo de inteligência artificial (*artificial intelligence – AI*) utiliza o conhecimento de um especialista em planos de processos. Segundo os autores, "os resultados obtidos com o APPG são muito encorajadores, quando comparados àqueles gerados por especialistas humanos, tornando-os aceitáveis para sistemas de manufatura na prática". No entanto o artigo não são apresenta detalhes sobre a implementação do sistema, somente a arquitetura. Ademais, não são descritos os detalhes sobre o funcionamento do sistema, exceto alguns aspectos da implementação e arquitetura.

Já para Chang e Chen (2002), uma das principais dificuldades na implementação de sistemas CAPP é o fato de os mesmos não considerarem a situação dos recursos no chão de fábrica. Isso porque os sistemas CAPP assumem que o chão de fábrica permanece estático, ou seja, consideraram que os recursos são ilimitados e estão sempre disponíveis. Isso leva à seleção repetitiva de um recurso mais desejável para a usinagem de diferentes peças, sobrecarregado-o. De acordo com Chang e Chen (2002) quando os planos de processo chegam ao chão de fábrica é comum o surgimento de gargalos, tornando os planos gerados ineficientes. Além do fato dos atrasos entre a geração do plano e sua utilização raramente possibilitarem sua execução como previsto. Assim, segundo eles, esforços têm sido realizados no sentido de aproximar as funções de planejamento de processos e a programação da produção, visando a geração de planos de processo em tempo real ou considerando alternativas.

Por isso Chang e Chen (2002) propõem um método para a seleção de alternativas baseado em programação dinâmica. A programação dinâmica é um procedimento de otimização que é particularmente aplicável a problemas que requerem uma seqüência inter-relacionada de decisões (DREYFUS E LAW, 1977 apud CHANG e CHEN, 2002). Segundo eles, a principal vantagem desse método é o fato de não necessitar avaliar todas as possíveis alternativas para a usinagem de uma peça, uma vez que a seleção de uma elimina a necessidade de avaliar todas as outras. E a seleção de uma alternativa é realizada considerando a utilização dos recursos, assim o método seleciona os recursos menos utilizados. Entretanto os autores enfatizam que a estratégia proposta é válida para as

condições do chão de fábrica no momento em que a ordem foi liberada. Chang e Chen (2002) avaliaram o modelo via simulação computacional, utilizando dados de um FMS já existente numa empresa de manufatura. Eles evidenciaram que a programação dinâmica reduz significativamente a quantidade de alternativas consideradas e melhorou o balanceamento dos recursos. Porém, deve-se mencionar que neste trabalho não foram consideradas a possibilidade de falhas nas máquinas ou ferramentas, e a distribuição de probabilidade para o tempo de chegada de peças ou processamento.

2.3.6 Outras abordagens no uso de alternativas

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. Neste caso, segundo Rajamani et al. (1990) rotas alternativas em planos de processo podem resultar numa utilização eficiente dos recursos.

No mesmo sentido, Larsen e Alting (1992) mostram uma visão conjunta 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. Os efeitos da utilização de rotas alternativas segundo esses autores 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 em até 36%.

Já Corti (2004) considera os conceitos de engenharia simultânea no projeto e gestão do sistema. Segundo o autor, decisões de projeto têm influência significativa no planejamento e controle da produção, como o aumento da taxa de utilização dos recursos e redução do tempo de resposta (*lead time*). Dessa forma, considerando o uso de alternativas em planos de processo, Corti (2004) mostra a relação entre a disponibilidade de processos alternativos e o desempenho do sistema de manufatura, evidenciando que as vantagens de alternativas adicionais diminuem quando o número de alternativas aumenta. Ele menciona também que dado um certo número de processos alternativos desenvolvidos, existe uma grande diferença no desempenho dependendo de qual processo alternativo foi implementado. Por isso, ele apresenta um novo procedimento para seleção de processos alternativos para auxiliar a seleção das operações alternativas que maximizam a flexibilidade e reduzem os custos. Tal procedimento é limitado às peças fabricadas nos recursos de maior taxa de utilização. Com isso, segundo Corti (2004), é possível implementar alternativas em apenas 16% dos planos de processo, e obter ganhos de até 16% em flexibilidade.

2.3.7 Comparação com outros trabalhos da literatura

Com base nos trabalhos encontrados na literatura apresentados nos itens 2.3.3 a 2.3.6, verifica-se que os benefícios e estratégias na implementação de alternativas em planos de

processo ainda não estão bem definidos. As evidências disso são as divergências encontradas nos ganhos em relação aos critérios de desempenho avaliados, como: produtividade, estoque em processo, utilização dos recursos e prazos de entrega. Acredita-se que as possíveis razões para essa divergência de resultados provêm dos seguintes motivos:

1. Diferentes tipos de sistemas de manufatura analisados, considerando mix de peças e diferentes níveis de utilização dos recursos;
2. Carência de estudos mais aprofundados, considerando a influência de diferentes fatores, como: tamanho de lote, tempo de chegada de peças, entre outros;
3. A influência da geometria da peça raramente é considerada, à exceção de alguns poucos trabalhos;
4. Questões relativas à implementação não são consideradas na maioria dos trabalhos, e isso leva à definição de uma estratégia para seleção de alternativas de difícil implementação;
5. Vários trabalhos não levam em conta os tempos de transporte e *set-up*, e com isso pode-se estar ampliando o benefício do uso de alternativas, pois em alguns casos a seleção de uma alternativa requer um maior número de processos, e nesse caso deve-se incluir o tempo de transporte e de *set-up*;
6. Não são consideradas penalidades associadas à escolha de alternativas para a usinagem de uma peça, e dessa forma evidentemente que o uso de alternativas será sempre benéfico;
7. A possibilidade de falha nos recursos (ferramentas ou máquinas) muitas vezes não é considerada, desprezando um potencial que poderia favorecer o uso de alternativas;
8. Algumas estratégias chegam a ter pouca validade em razão da quantidade de simplificações adotadas com o uso de modelos matemáticos, desprezando o efeito de variações no tempo de chegada e fabricação das peças;
9. Modelos determinísticos são utilizados para modelar sistemas estocásticos, e uma das razões para isso é que a disponibilidade de ferramentas de simulação estocásticas é relativamente recente. Entretanto, boa parte dos sistemas de manufatura se comporta de forma estocástica, isto é, a presença de fenômenos probabilísticos relacionados à chegada de peças, quebra de máquinas, tempo de fabricação, etc., alteram o comportamento do sistema, dessa forma a credibilidade dos modelos é precária;
10. Existência de poucos estudos de comprovação dos modelos propostos nas indústrias, em razão, até mesmo, da dificuldade de implementação das soluções geradas.

Logo, tendo em vista esses aspectos, foram consideradas as seguintes soluções para cada um dos motivos apontados:

1. Serão analisados dois sistemas de manufatura semelhantes, sendo que um foi balanceado, visando minimizar a influência de recursos gargalos, enquanto o outro foi definido de modo que um dos recursos fosse sobrecarregado, e dessa forma se tornasse o recurso gargalo. A suspeita é que na existência de recursos gargalos, a presença de alternativas em sistemas de manufatura pode propiciar maiores benefícios;
2. Foram considerados fatores visando avaliar diferentes aspectos relativos à formação das peças (*features* por peça e *features* duplicadas), ao processo (quantidade do lote, penalidade, quebra de máquina e tipo de plano) e ao ambiente do sistema de manufatura (lotes simulados e tempo de chegada);
3. O modelo foi desenvolvido baseado no uso de *features*, assim as peças serão diferenciadas de acordo com as *features* que as compõem. Dessa forma, espera-se avaliar a influência dos seguintes fatores: *features* por peça e *features* duplicadas;
4. Houve uma preocupação em definir estratégias viáveis de serem implementadas no chão de fábrica, e esse foi um dos motivos que levaram à escolha da estratégia de seleção de alternativas baseada no recurso com a menor fila, o qual pode ser facilmente identificado no chão de fábrica;
5. Foram considerados tempos de transporte e *set-up*, e isso permitiu considerar tanto a economia nesses tempos caso a existência de uma alternativa possibilite executar o maior número possível de operações numa mesma máquina. Como também a situação inversa, isto é, o acréscimo nos tempos de transporte e *set-up* em decorrência da utilização de uma máquina alternativa;
6. Não só foram consideradas penalidades, como também buscou-se avaliar a sua influência nos critérios de desempenho, por isso a penalidade foi considerada como sendo um fator de controle no experimento;
7. Foram consideradas as possibilidades de falha nas máquinas e reafiação de ferramentas, e acredita-se que isso permitirá que o modelo considere os ganhos relacionados ao uso de alternativas nesse cenário. Além do mais, visando avaliar e controlar essa influência nos resultados, foi considerado um fator relacionado à quantidade de quebras de máquina;
8. O sistema de manufatura foi modelado através de uma ferramenta de simulação reconhecidamente robusta e consistente, que vem sendo aplicada na prática para a modelagem de processos industriais. Além disso, a modelagem pode ser feita sem excessivas simplificações que empobrecem o modelo, considerando-se os tempos

de chegada e fabricação das peças, o que permite obter resultados mais próximos da realidade;

9. Foram consideradas distribuições de probabilidade para os tempos de chegada e fabricação, e com isso a aleatoriedade associada ao sistema de manufatura foi incorporada ao modelo. Essa tarefa foi facilitada pelo uso de uma ferramenta de simulação que permite tais considerações. Sem contar que o tempo de chegada e a quantidade de lotes simulados foram considerados como fatores de controle, visando avaliar sua influência;
10. As soluções foram desenvolvidas para serem utilizadas no chão de fábrica, ou seja, prevendo a possível realização de estudos para comprovação em sistemas reais. Todas as estratégias adotadas neste trabalho para o uso de alternativas visam facilitar a implementação sem o uso de sofisticados sistemas de controle.

Muitas das contribuições adotadas neste trabalho provêm do modelo apresentado por Ferreira e Wysk (2001b), principalmente aquelas relacionadas à metodologia de geração de peças. Por isso, vale destacar os aspectos que mais diferenciam este trabalho daquele proposto por Ferreira e Wysk (2001b), os quais foram referenciados nos itens 1, 4, 7, 8, 9 e 10.

2.4 Avaliação de desempenho de sistemas de manufatura

Tradicionalmente, as estratégias ou decisões operacionais são avaliadas em termos de medidas de desempenho. Dessa forma, neste trabalho definiu-se critérios visando comparar a situação onde é usado um plano de processo sem alternativas com a situação onde é utilizado um plano de processo com alternativas. Isso é realizado comparando ambos os tipos de planos de acordo com cada critério. Desse modo, o uso de projeto de experimentos permite avaliar os critérios de desempenho, para cada tipo de plano de processo, com relação a diferentes níveis de cada fator considerado.

Assim, a etapa subseqüente à avaliação consiste em elaborar questões do tipo *o que aconteceria se (...)*, ou seja, visa desenvolver novas estratégias e avaliar o seu impacto sobre o sistema. Por exemplo, o que aconteceria com o desempenho se fosse adicionada mais uma máquina ou um operador ao sistema? De acordo com Altiok (1996, p.4, tradução nossa), “[...] na maioria dos casos esta análise é conduzida com a ajuda de um modelo matemático ou de simulação computacional do sistema”. Altiok (1996, p.5, tradução nossa) reconhece que “[...] os recentes desenvolvimentos em modelagem em simulação computacional criaram um tremendo potencial para geração e teste de modelos de sistemas de manufatura para estudar uma variedade de políticas operacionais e seus impactos sobre o desempenho do sistema”.

O uso de um modelo possibilita, segundo Banks et al. (1999, p.157, tradução nossa), responder questões do tipo:

> "Encontrarei a produtividade esperada? O que acontece com o tempo de resposta nos períodos de pico? O sistema é flexível a pequenas variações? Qual é o tempo a ser recuperado quando variações no sistema são causadas por sobrecargas e filas? Quais são as necessidades de pessoal? Que problemas ocorrem? Se problemas ocorrerem, qual é a sua causa e como eles surgem? Qual é a capacidade do sistema? Quais condições e carregamentos possibilitam que o sistema alcance essa capacidade?"

Nesse sentido Banks et al. (1999) ressaltam que, ao invés de esperar que a simulação forneça apenas dados numéricos de desempenho, como a produtividade sob um conjunto de condições dadas, deve-se considerar que o maior benefício da simulação é ajudar a compreender o comportamento do sistema visualizando sua operação. "O propósito de uma simulação é idéias, não números." (LAW e KELTON, 2000, p.157). Isso não significa desprezar a importância dos resultados obtidos de um processo de simulação, mas evidenciar que outros ganhos importantes também podem ser obtidos com relação à compreensão do sistema.

Alguns dos critérios de desempenho considerados pela maioria dos trabalhos encontrados na literatura (ALTIOK, 1996; LAW e KELTON, 2000, entre outros), são os seguintes: produtividade (número de unidades produzidas por unidade de tempo), nível de estoque (número de unidades compreendidas num determinado horizonte de tempo aguardando processamento ou expedição), utilização média dos recursos (percentual do tempo cujos recursos são mantidos ocupados), nível de serviços ao cliente (percentual de tempo que o cliente necessita para estar satisfeito), tempo médio de fluxo (tempo médio gasto por uma unidade no sistema), e percentual de tempo parado (percentual de tempo em que uma máquina está sob reparos), entre outras.

A importância da análise de desempenho é que, conhecendo as deficiências do sistema de manufatura, pode-se redirecionar os esforços com o intuito de aperfeiçoar seus processos, tornando-os cada vez mais eficientes e, conseqüentemente, responder com mais rapidez às necessidades do mercado e reduzir custos.

2.5 Simulação de sistemas

2.5.1 Introdução à simulação de sistemas

Schmidt e Taylor (1970 apud LAW e KELTON, 2000, p.3, tradução nossa) definem um sistema como "[...] uma coleção de entidades, tais como pessoas ou máquinas, que agem e interagem juntas visando a realização de alguma finalidade lógica". De acordo com Law e Kelton (2000, p.3), na prática os limites do sistema dependem dos objetivos do estudo.

Existem diferentes caminhos para se estudar o comportamento de um sistema, como mostra a Fig. 2.7, e isso envolve a realização de experimentos com o próprio sistema ou com um modelo. Quando possível, é desejável realizar os experimentos no próprio sistema, porém isto normalmente resulta num aumento de custos, e pode levar a interrupções no funcionamento do sistema. Além do mais, em alguns casos isso não é possível, pelo fato do sistema ainda não existir ou oferecer riscos (LAW e KELTON, 2000). Por isso, a utilização de um modelo como substituto do sistema é uma solução interessante, contudo necessita que o modelo seja validado para comprovar se ele realmente representa as características desejadas do sistema.

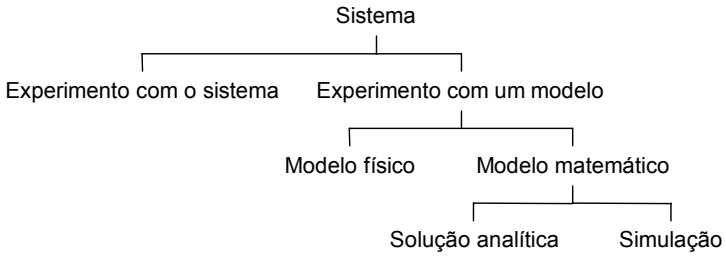


Figura 2.7 - Caminhos para estudar um sistema (LAW e KELTON, 2000, p.4, tradução nossa)

Em alguns casos podem ser construídos modelos físicos, que representam réplicas do sistema a ser estudado, geralmente feitos em escala reduzida. O uso desses modelos é mais comum no estudo de fenômenos onde não há equações que reproduzam o efeito estudado com a fidelidade desejada e a complexidade envolvida, inviabilizando assim o tratamento analítico. Como exemplo de modelo físico tem-se a construção de modelos para simular o escoamento de fluidos em túneis de vento.

Os modelos físicos também podem ser aplicados quando a intenção é analisar e avaliar um produto. Nesse caso, são desenvolvidos protótipos para avaliar as máquinas de produção e o custo do produto (REHG, 1994, p.67). Porém o uso desses modelos não é apropriado para a análise de sistemas de manufatura, embora alguns modelos físicos no estudo de gestão de sistemas tenham sido utilizados para representar sistemas de manuseio de materiais (escala reduzida) e um restaurante do tipo *fast-food* (escala real) (LAW e KELTON, 2000). Deve-se mencionar que a maior parte dos modelos para o estudo desses sistemas é matemático, "[...] representando um sistema em termos da lógica e relacionamento quantitativo, o quais são manipulados e alterados para ver como o modelo reage, e portanto como o sistema poderia reagir – se o modelo é válido." (LAW e KELTON ,2000, p.5, tradução nossa).

Se um modelo é possível de ser resolvido matematicamente, isto é, empregando as técnicas analíticas para a solução do problema, é possível obter uma solução "exata". Contudo, em muitos casos, o problema envolve um modelo extremamente complexo para ser resolvido analiticamente, por isso obter uma solução por meio da simulação pode se

tornar mais viável. Com relação a este aspecto, vale aceitar a recomendação de Law e Kelton (2000, p.5, tradução nossa):

> "Se uma solução analítica para um modelo matemático é disponível e computacionalmente eficiente, normalmente é desejável estudar o modelo por esse caminho do que via simulação. Porém, muitos sistemas são altamente complexos, de modo que modelos matemáticos válidos são eles mesmos complexos, impedindo qualquer possibilidade de solução analítica. Nesse caso, o modelo deve ser estudado por meio da simulação [...]."

Na verdade, o uso de modelos como técnica de simulação vem desde a pré-história, onde o homem primitivo desenhava um alvo numa rocha, ou esculpia um animal no tronco de uma árvore, com a intenção de para avaliar a precisão da pontaria de suas armas rudimentares (SHIMIZU, 1975). Isso mostra que a idéia básica que permeia o conceito de simulação desde seu surgimento, é a de imitar o comportamento de um sistema ou processo do mundo real (BANKS et al.,1999), através de um modelo.

No entanto, com o advento dos computadores, a palavra simulação passou a ser sinônimo de simulação computacional digital, na qual um modelo computacional é executado. Nesse novo contexto, simulação passou a ser definida como "[...] o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com esse modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação." (PEDGEN, 1990 apud FREITAS FILHO, 2001, p.3).

Nesse sentido, um grande impulso ao desenvolvimento de modelos computacionais foi a possibilidade de se incorporar a variabilidade dos sistemas reais nos modelos por meio do método de Monte Carlo (MMC). O uso dessa expressão é atribuído a Von Neumann e Ulam em 1940, ao utilizarem essa técnica matemática para solução de um problema não probabilístico por simulação de um processo estocástico, ao qual estão associadas distribuições de probabilidade (NAYLOR, 1966). Até então o uso da simulação era restrito ao emprego de técnicas analíticas para "resolver" modelos matemáticos. Mais recentemente a expressão método de Monte Carlo vem sendo usada por alguns autores para designar o uso de números aleatórios em qualquer programa de simulação (LAW e KELTON, 2000). O uso deste método é válido em situações envolvendo processos estocásticos, como por exemplo a determinação do intervalo de tempo para a chegada de um paciente num hospital, ou para a solução de alguns problemas determinísticos difíceis de serem tratados empregando técnicas analíticas, como a solução de problemas de integrais múltiplas (NAYLOR, 1966; LAW e KELTON, 2000).

O principal apelo ao uso da simulação é que questões podem ser respondidas sem que os sistemas sob investigação sofram qualquer perturbação, uma vez que os estudos são realizados no computador. A simulação computacional permite que tais estudos sejam realizados sobre sistemas que ainda não existem, levando ao desenvolvimento de projetos eficientes antes que qualquer mudança física tenha sido iniciada, como destacam Law e

Kelton (2000) e Banks et al. (1999). Segundo eles, as principais vantagens com relação ao uso dessa ferramenta são as seguintes:

- sistemas complexos do mundo real podem ser modelados com elementos estocásticos que não poderiam ser descritos com a mesma precisão por meio de um modelo matemático para ser avaliado analiticamente. Portanto, muitas vezes uma investigação só é possível utilizando simulação;
- a simulação permite avaliar sistemas sob diferentes condições de operação;
- um projeto alternativo do sistema (ou uma estratégia de operação diferente) pode ser comparado via simulação;
- numa simulação é possível manter o controle das condições experimentais melhor do que poderia ser possível se o experimento fosse no sistema real;
- a simulação possibilita estudar os sistemas por um longo tempo num curto período, ou alternativamente estudar detalhadamente um sistema num curto intervalo;
- novas estratégias, procedimento operacionais, regras de decisão, fluxo de informações, procedimentos organizacionais, entre outros podem ser testados sem que o sistema real sofra qualquer perturbação;
- novos projetos de sistemas, arranjos, sistemas de transporte, entre outros podem ser testados antes da sua aquisição;
- idéias podem ser obtidas sobre a interação das variáveis;
- idéias podem ser obtidas sobre a influência das variáveis sobre o sistema;
- análises de recursos gargalos podem ser realizadas indicando onde existem atrasos com relação ao estoque em processo, informação e materiais;
- estudos de simulação podem ajudar a compreender como o sistema opera, melhor do que os indivíduos pensam sobre seu funcionamento;
- questões do tipo “O que aconteceria se [...]” podem ser respondidas. Isso é particularmente útil no projeto de novos sistemas.

No sentindo contrário, Law e Kelton (2000) e Banks et al. (1999) também apontam algumas desvantagens, que são as seguintes:

- a execução de um modelo estocástico produz somente uma estimativa do comportamento das características do sistema real para um determinado conjunto de parâmetros de entrada. Por isso várias execuções independentes do modelo poderão ser requeridas para cada conjunto de parâmetros de entrada a serem estudados. Por essa razão, a simulação produz apenas um comportamento aproximado, o que a torna inapropriada como ferramenta de otimização;
- a construção de modelos de simulação pode ser de elevado custo e consumir um elevado tempo de desenvolvimento;

- a simulação freqüentemente cria a tendência de elevada confiança nos resultados obtidos, isso em razão do elevado volume de itens produzidos ou pela persuasão criada pela animação do sistema. Assim, se um modelo não é uma representação válida do sistema sob estudo, não existe medida de sua imprecisão com relação ao sistema real;
- a construção de modelos requer um treinamento especial, isto a torna uma arte que é aprendida com o tempo e experiência;
- resultados de simulação freqüentemente são difíceis de serem interpretados, porque muitas vezes a maioria das saídas são variáveis aleatórias, dificultando determinar se uma observação é resultado de um relacionamento ou aleatório;
- embora o acesso ao programas de simulação tenha aumentado, o custo desses programas ainda é relativamente alto;
- a simulação pode ser indevidamente usada em casos onde uma solução analítica é possível (ou mesmo preferível) usando modelos de filas.

Enfim, apesar do uso de linguagens de simulação ter aumentado drasticamente nos últimos anos em razão do aumento da capacidade de processamento nos computadores e a melhoria na amigabilidade de programas de simulação, ainda hoje muitas empresas brasileiras ainda não fazem uso do seu potencial. Uma investigação sobre o uso da simulação em empresas das regiões Sul e Sudeste do Brasil realizada por Stamm (1998), mostrou que, embora a maior parte das empresas usuárias reconheçam os benefícios da sua utilização, mencionando que 24% consideram os resultados obtidos excelentes e 70% os consideram bons, das empresas pesquisadas 49% não usam simulação. Isso mostra que, apesar das empresas reconhecerem o potencial de melhoria no desempenho industrial propiciado pela utilização da simulação, seu uso ainda está restrito. Isto levou Stamm (1998) a concluir que as organizações produtivas e os agentes promotores necessitam realizar transformações em suas atitudes com urgência, se pretendem ser competitivos em nível mundial.

2.5.2 Modelagem de sistemas

O uso da simulação computacional torna imprescindível o uso de um modelo para representar o sistema, pois só assim é possível traduzir a realidade numa linguagem de programação que possa ser interpretada pelo computador. Assim, a tarefa de criar um modelo não pode ser menosprezada, pois de nada adiantaria fazer uso dos melhores recursos computacionais se o modelo não representa o sistema.

Na literatura, vários autores (BANKS et al., 1999; NAYLOR et al, 1966, entre outros) definem a tarefa de criar modelos como uma arte. Isso se deve ao fato da modelagem, em alguns casos, exigir do modelador não apenas o raciocino lógico, mas também criatividade,

pois para um mesmo sistema podem existir inúmeros modelos diferentes, todos eles capazes de representar o mesmo sistema. Isso ocorre porque, para se desenvolver um modelo, são admitidas hipóteses visando simplificar o sistema investigado a fim de facilitar sua análise. Logo, numa modelagem, o intuito é representar o sistema real da forma mais simples possível, entretanto sem perder informações preciosas a respeito do comportamento do sistema.

Outro ponto a ser considerado numa modelagem é a definição das condições de contorno, as quais são admitidas em função das entradas e saídas que o modelo deverá possuir e com os objetivos estabelecidos. Por exemplo, na modelagem de uma empresa, as condições de contorno poderão ou não envolver a consideração dos concorrentes, em função do objetivo definido. Muitas vezes a definição dos limites de um modelo é feita com base no conhecimento dos fatores que podem influenciar o comportamento do sistema. Por isso um pré-requisito encontrado na literatura para se realizar uma modelagem com sucesso é o conhecimento do sistema a ser modelado (BANKS et al. 1999; LAW e KELTON, 2000; NAYLOR et al., 1966). Tanto Naylor et al. (1966), Kelton et al. (2002) e Banks et al. (2000) definem três dimensões para caracterizar um modelo: estático ou dinâmico, contínuo ou discreto, e determinístico ou estocástico.

Um modelo estático é aquele que representa o um sistema num determinado momento do tempo, enquanto os modelos dinâmicos representam o sistema num determinado período de tempo. Por exemplo, um de modelo estático envolve a utilização de números aleatórios para resolver um determinado problema onde a passagem do tempo não é uma regra importante (LAW e KELTON, 2000), enquanto no modelo dinâmico a passagem do tempo é fundamental, como a simulação de uma agência bancária do período das 9:00 às 4:00 (BANKS et al, 1999).

Já um modelo contínuo é aquele cujo estado do sistema muda continuamente ao longo do tempo. Tradicionalmente, o modelo desses sistemas envolve equações diferenciais que representam o relacionamento da taxa de mudança do estado das variáveis no tempo (LAW e KELTON, 2000, p.87). Um exemplo típico desses sistemas é o nível de um reservatório de água quando existe um fluxo saindo do reservatório (BANKS et al, 1999, p.9). Num sistema discreto as mudanças no sistema só ocorrem em pontos separados no tempo, como um sistema de manufatura com peças chegando e deixando o sistema em tempos específicos. Um sistema contínuo-discreto também pode ser considerando quando o sistema comporta ambas mudanças de estado (KELTON et al., 2002, p.9).

Os modelos que não contêm variáveis aleatórias são definidos como determinísticos, isto é, o modelo possui um conjunto de entradas conhecidas resultando num único conjunto de saídas. Como exemplo tem-se um consultório de dentista cujos pacientes podem chegar num horário previamente definido. Por outro lado, um modelo estocástico tem uma ou mais variáveis aleatórias como entrada, onde as entradas aleatórias no sistema definem as

saídas aleatórias, como por exemplo o tempo entre a chegada de clientes numa loja. Portanto na simulação estocástica as medidas de saída (como número de pessoas esperando, tempo médio de espera, etc.) devem ser tratadas como uma estimativa das características verdadeiras do sistema (BANKS et al. 1999).

2.5.3 Simulação de sistemas de manufatura

Os modelos de sistemas de manufatura se diferenciam dos demais em razão da aleatoriedade intrínseca desses sistemas, o que dificulta que aproximações analíticas baseadas no comportamento médio do sistema forneçam bons resultados, como a solução analítica de modelos matemáticos. Em razão disso, a abordagem utilizando a simulação tem sido mais apropriada para lidar com sistemas complexos. Pois o modelo de simulação permite abandonar a complexidade, e se necessário representar o sistema fielmente, enquanto outros métodos requerem enormes simplificações do sistema sob análise, o que poderá comprometer a validade do modelo em questão (KELTON et al.,2002). Outra justificativa é o fato da disponibilidade de linguagens de simulação para propósitos especiais, aumento da capacidade computacional e a redução dos custos por operação, além dos avanços nas metodologias de simulação, tornando-a uma das mais usadas e aceitas ferramentas em pesquisa operacional e análise de sistemas (Banks et al, 1999).

De acordo com Rehg (1994) duas abordagens de simulação são usadas para avaliar sistemas de manufatura: eventos discretos ou contínuos. Simulação discreta usa símbolos para representar objetos e recursos, como peças e máquinas, na construção do modelo de manufatura. A interação entre os símbolos é definida matematicamente ou com um relacionamento lógico. Já os processos contínuos requerem um tipo diferente de estratégia de simulação, pois o estado do sistema muda continuamente num intervalo de tempo. Exemplos de sistemas contínuos incluem sistemas de produção para produtos à base de petróleo. Os sistemas contínuos são modelados usando um relacionamento matemático e lógico entre os componentes de produção e as equações matemáticas que descrevem a taxa de mudança nos processos. Segundo Rehg (1994), este último elemento no modelo diferencia a técnica de processos contínuos da baseada em eventos discretos.

A implementação dos modelos é realizada por intermédio de programas de simulação, os quais são classificados em dois grandes grupos chamados: propósito geral e orientado à aplicação segundo Law e Kelton (2000). Segundo eles, os programas de propósito geral são baseados numa linguagem de simulação que permite que qualquer tipo de sistema seja modelado. Com isso provém uma elevada flexibilidade, contudo tais programas normalmente são de difícil utilização. Por outro lado, os programas orientados à aplicação possuem ferramentas específicas para a modelagem de um determinado tipo de sistema, e isso facilita a implementação. No entanto, a flexibilidade é prejudicada, dificultando a modelagem de particularidades de determinados sistemas.

Os desenvolvedores de programas de propósito geral estão atentos a esses problemas, e por isso eles têm procurado utilizar métodos que facilitem a implementação. Dessa forma, o método de construção gráfica de modelos tem sido largamente empregado nos últimos anos, onde a modelagem é realizada utilizando uma paleta de ícones associados a determinadas funções que está localizada num dos cantos da tela. Isso permite que o usuário construa seus modelos apenas selecionando o ícone da função desejada com o mouse e movendo-o para a área de trabalho (LAW e KELTON, 2000, p.204). Dentre os programas de simulação que utilizam linguagens de propósito geral, um dos que apresentam maior popularidade tanto no meio acadêmico como na indústria é o Arena®, o qual utiliza a linguagem de simulação SIMAN V.

2.5.4 Modelagem e simulação no aplicativo Arena®

O aplicativo Arena® consiste num ambiente de desenvolvimento cujos modelos são construídos através de módulos (*modules*), onde cada módulo é definido dentro de um conjunto especifico de módulos relacionados ao mesmo tipo de função, chamado padrão (*Templates*). Algumas da *Templates* existentes no Arena são: *Basic Process, Advanced Process, Advanced Transfer*, entre outros. Por exemplo, a *Template Basic Process* dispõe dos módulos usados na maior parte dos modelos, tais como: *Create* (criação de entidades), *Process* (processamento das entidades), *Decide* (testa uma ou mais condições que determinam a rota da entidade), *Dispose* (saída da entidade do sistema), entre outros, os quais permitem que o modelo de uma fábrica simples seja construído apenas arrastando os ícones relacionados a esses módulos para a área de trabalho. Já a *Template Advanced Process* possui módulos que permitem definir funções mais específicas associadas com a lógica do sistema, tais como: *Failure* (define a ocorrência de falha nos recursos), *Store* e *Unstore* (estabelece o armazenamento de entidades), entre outros. E por último, a *Template Advanced Transfer* permite definir aspectos relativos ao transporte das entidades, tais como: *Conveyor* (transportadores), *Transporter* (tipo de transporte), *Distance* (distância entre as estações), entre outros. A Fig. 2.8 ilustra a tela principal do Arena onde estão dispostas essas *Templates*, os módulos, as ferramentas, a barra de status, a barra de menus e a área de construção dos modelos.

A barra de menus armazena todas as funções contidas no Arena, algumas das quais estão disponibilizadas na barra de ferramentas, sendo a principal delas a que permite controlar a execução do modelo. A barra de status define o estado do modelo num determinado momento, como inicializando (*initializing*), executando (*running*), interrupção pelo usuário (*user interrupted*), fim da simulação (*end of run*), entre outros.

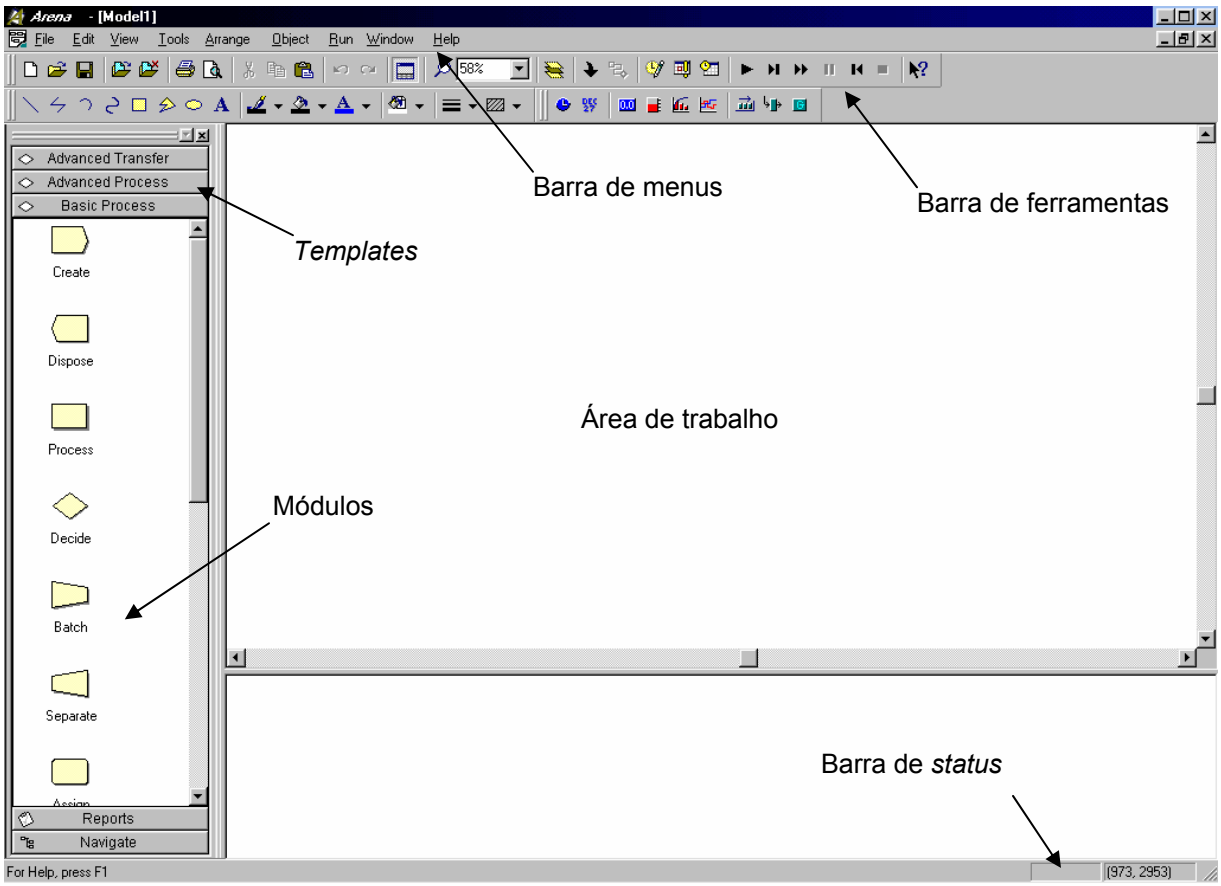


Figura 2.8 - Ambiente de construção de modelos no Arena®

Freitas Filho (2001) sugere as seguintes tarefas para se construir um modelo no Arena:

1. Inserir os módulos que representam o sistema na área de trabalho e interconectá-los;
2. Fornecer os dados para modelo, isto é, definir os parâmetros dos módulos;
3. Executar a simulação do modelo.

A primeira etapa é realizada de acordo com o comportamento lógico do sistema, por isso é preciso definir o escopo do problema, isto é, quais as atividades que serão consideradas no modelo. Feito isso, basta arrastar os módulos que representem essas atividades para a área de trabalho, e para isso normalmente utiliza-se a *template Basic Process*. A próxima etapa consiste em definir os valores dos parâmetros de cada módulo utilizado, ou seja, fornecer os dados do modelo. Para isso, basta dar um clique duplo nos módulos já colocados na área de trabalho e digitar os dados na janela que se abre para cada módulo. Por último, é realizada a execução do modelo, onde são definidos alguns parâmetros, como: a quantidade de replicações da simulação, o tamanho de cada replicação (tempo de simulação do sistema), os tipos de dados que serão exibidos no relatório (filas, utilização recursos, etc.), entre outros.

Para explicar cada uma dessas etapas, será construído o modelo visando representar um ponto de venda de lanches. Isso será realizado supondo que nesse sistema cada cliente chega aleatoriamente ao ponto de venda em média a cada 20 minutos, sendo que o tempo entre o atendimento e a preparação do lanche leve cerca de 10 a 15 minutos, e um único

funcionário realiza ambas as funções de atendimento e preparação dos lanches. Logo após a preparação do lanche o cliente efetua o pagamento e deixa o ponto de venda. Supõe-se que se deseja obter a fila média nesse sistema, o tempo médio de espera de cada cliente e a taxa de ocupação do funcionário.

A lógica desse sistema poderia ser modelada considerando aos seguintes eventos:

1. Chegada do cliente;
2. Escolha do lanche pelo cliente;
3. Funcionário prepara o lanche;
4. Pagamento e saída do cliente.

Todos os módulos para construção desse modelo no Arena estão na *Template Basic Process*. Assim, para representar a chegada dos clientes, será utilizado o módulo *Create*, o qual permite que entidades sejam criadas no sistema, onde, nesse caso, cada cliente representa uma entidade. Tanto a escolha como o pagamento serão consideradas como sendo uma única tarefa desempenhada pelo funcionário, a qual será definida como atendimento. Desse modo, o atendimento e a preparação serão admitidas como sendo um único processo, por isso será utilizado o módulo *Process* para representar essas etapas. Nesse módulo, será admitido que o funcionário permaneça ocupado durante o período que o cliente utiliza o sistema. Assim quando o cliente chega no ponto de venda, o funcionário é alocado (*seize*), e permanece dessa forma durante toda a etapa de preparação do lanche (*delay*), sendo liberado (*release*) somente quando o cliente efetuar o pagamento. A saída do cliente será realizada utilizando o módulo de saída de entidades do sistema, chamado *Dispose*. Os módulos utilizados para a modelagem desse sistema são mostrados na Fig. 2.9.

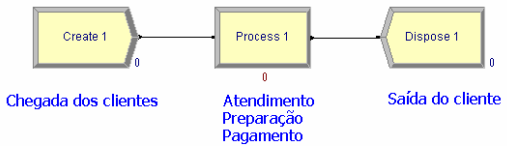


Figura 2.9 - Módulos utilizados para implementar a lógica do sistema

A próxima tarefa consiste em definir os dados da simulação do modelo, que é feito definindo-se os parâmetros para os módulos *Create* (tempo de chegada de clientes) e *Process* (tempo de atendimento, preparação e pagamento). Isso pode ser feito preenchendo-se os campos das janelas mostradas nas Fig. 2.10 e 2.11, respectivamente.

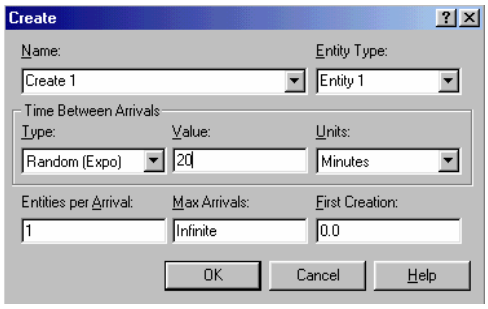


Figura 2.10 - Janela do módulo *Create*

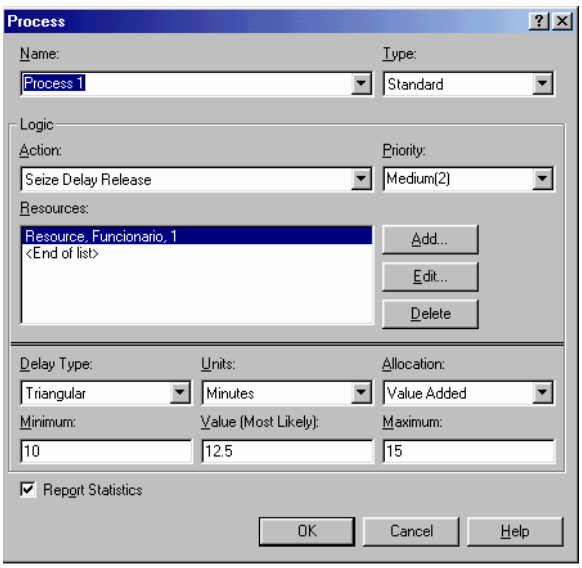


Figura 2.11 - Janela do módulo *Process*

Assim, admitiu-se uma distribuição exponencial com média 20 minutos, para representar a variação do tempo entre a chegada de clientes, em razão desse tipo de distribuição reproduzir a aleatoriedade existente no tempo de chegada. Já para o tempo de atendimento e preparação, admitiu-se uma distribuição triangular onde o menor e maior do tempo são 10 e 15 min., respectivamente, e o valor mais provável 12,5 min.

Para se executar a simulação do modelo é preciso definir alguns parâmetros associados à quantidade de replicações e o tempo de simulação. O tempo de simulação será de 5 dias, considerando que o ponto de venda está em funcionamento 8 h por dia. Daí resulta que o sistema funciona durante 40 horas. Os demais parâmetros referentes aos tipos de relatório serão utilizados os valores padrão do Arena.

Ao executar-se o modelo de acordo com o tempo previsto de simulação, obtém-se os seguintes resultados:

- fila média do sistema = 0,5 cliente;
- número máximo de clientes na fila = 5 clientes;
- tempo médio do cliente na fila = 11 minutos;
- ocupação média do funcionário = 56%.

Um aspecto interessante é a animação do sistema, que permite observar seu comportamento dinâmico, isto é, os clientes chegando ao ponto de venda, os clientes na fila aguardando o atendimento e os clientes que estão saindo do sistema, como mostra a Fig. 2.12.

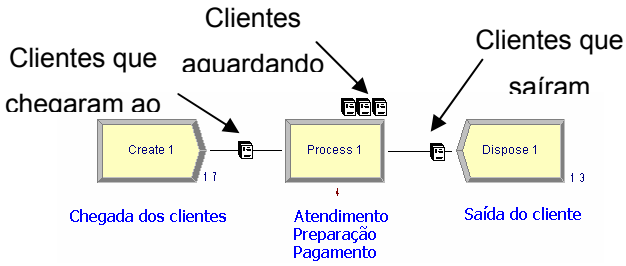


Figura 2.12 - Comportamento das entidades durante a execução do modelo

Possivelmente antes de se realizar a simulação, a impressão fosse de que não haveria filas, visto que a cada 20 minutos um cliente chega ao sistema, e o funcionário do ponto de venda leva de 10 a 15 minutos para efetuar o atendimento e a preparação do lanches. No entanto, se o sistema se comportasse dessa forma, é obvio que não haveria filas no sistema. Além do mais, haveria um intervalo de pelo menos 5 minutos onde o funcionário não estaria realizando nenhuma tarefa. Entretanto, o comportamento do ponto de venda, bem como boa parte dos sistemas reais, é estocástico. Esse comportamento é evidenciado nos valores mínimos e máximos encontrados para o tempo de chegada de um cliente e para o tempo de preparação do lanche, como mostra a Tabela 2.4. Isso significa que o funcionário do ponto de venda pode ficar aguardando um cliente por um intervalo de tempo de até 132 minutos, por outro lado o sistema chegou a ter 5 clientes esperando na fila.

Tabela 2.4 - Valores do tempo de chegada e preparação (em minutos) gerados pelo Arena

Evento	Mínimo	Máximo
Chegada de um cliente	0	132
Preparação do lanche	10	15

Quanto ao uso das distribuições de probabilidade, o Arena permite o uso de até 12 tipos de distribuições para representar o comportamento de uma variável no tempo, além de permitir alterar a taxa de variação do tempo para a chegada de entidades (LAW e KELTON, 2000).

Outra característica importante dessa ferramenta é o fato de incorporar o Microsoft Visual Basic® for Aplications (VBA), o que possibilita customizar os modelos, executando rotinas de programação dentro do modelo de simulação. O Arena também permite ler e gravar dados num planilha como o Microsoft® Excel.

2.6 Projeto de experimentos

2.6.1 Características básicas

As técnicas de projeto de experimentos são úteis para se verificar se determinado fator influencia, ou não, a resposta de um sistema, como indica a Fig.2.13. Nesta figura, os fatores de controle são variáveis do processo cujo valor é possível controlar, enquanto os fatores não controláveis são as variáveis cujo valor não é possível controlar, e a saída corresponde às variáveis de resposta, que fornecem os resultados do processo ou sistema.

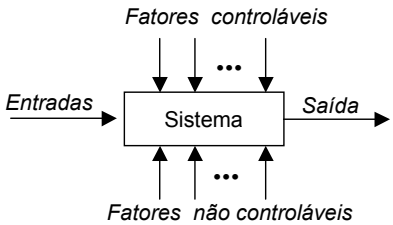


Figura 2.13 - Relação de variáveis que influenciam um sistema
(MONTGOMERY, 1997, p.2, tradução nossa)

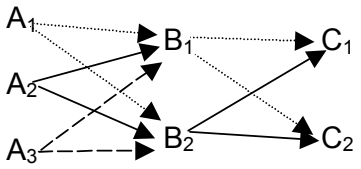
Segundo Montgomery, (1997), experimentos são usados para estudar o desempenho de processos e sistemas. Mais precisamente, Montgomery (1997, p.2) define: "[...] um experimento consiste em um teste, ou série de testes, no qual proposições são realizadas através da escolha de fatores de um processo ou sistema, que permitem observar e identificar as razões da alteração dos resultados." Logo, segundo ele, o projeto de experimentos inclui os seguintes objetivos:

- determinar quais os valores dos fatores de controle têm maior influência sobre a resposta;
- determinar quais os valores dos fatores de controle produzem respostas próximas do valor nominal;
- determinar quais os valores dos fatores de controle que reduzem a variabilidade das respostas;
- determinar quais os valores das variáveis de controle que reduzem a influência dos fatores não controláveis.

É importante ressaltar que, além da análise, o projeto de experimentos envolve também as etapas referentes à organização e condução de um experimento. Isto porque, em qualquer experimento, os resultados e conclusões que podem ser obtidos dependem da forma como os dados foram coletados, segundo Montgomery (1997).

2.6.2 Projeto fatorial completo

Umas das estratégias de se coletar esses dados visando avaliar a influência de diversos fatores ao mesmo é o projeto fatorial completo. De acordo com Montgomery (1997), nessa estratégia diversos fatores são alterados em conjunto, ao invés de um a cada momento. Isso significa que todas as possíveis combinações dos fatores são testadas. Por exemplo, num experimento com três fatores (A, B e C), onde cada um deles possui três, dois e dois níveis respectivamente, tem-se $3^1 \times 2^2 = 12$ combinações. Em cada um destes fatores a base da potência representa a quantidade de níveis, e o expoente a quantidade de fatores em um determinado nível. A combinação desses fatores é ilustrada na Fig. 2.14.



$A_1\ B_1\ C_1$	$A_1\ B_1\ C_2$
$A_1\ B_2\ C_1$	$A_1\ B_2\ C_2$
$A_2\ B_1\ C_1$	$A_2\ B_1\ C_2$
$A_2\ B_2\ C_1$	$A_2\ B_2\ C_2$
$A_3\ B_1\ C_1$	$A_3\ B_1\ C_2$
$A_3\ B_2\ C_1$	$A_3\ B_2\ C_2$

Figura 2.14 - Combinações de teste de um experimento fatorial 3x2x2
(Adaptado de MONTGOMERY, 1997, p.230) (CARPINETTI, 2000, p.111)

Num experimento fatorial completo é possível avaliar o efeito de cada nível dos fatores de controle sobre as diferentes variáveis de resposta. Segundo Carpinetti (2000), o efeito de

um fator corresponde ao valor médio da variável de resposta, em relação à variação produzida pela mudança do nível do fator. Assim, usualmente o efeito é chamado de efeito principal porque está relacionado com os primeiros fatores de interesse no experimento (MONTGOMERY, 1997, p. 228). Para visualizar esse efeito, os valores médios de cada nível são utilizados para geração de gráficos de efeito principal, como mostra a Fig. 2.15. Quando o aumento no nível de um determinado fator corresponde a um aumento do efeito na variável de resposta (Fig. 2.15a), o efeito é considerado positivo. Inversamente, quando o aumento do nível do fator corresponde a uma redução do efeito na variável de resposta (Fig. 2.15b), tem-se o efeito negativo. O efeito também pode ser nulo (Fig. 2.15c), caso não seja verificada alteração na variável de resposta alterando-se o nível do fator.

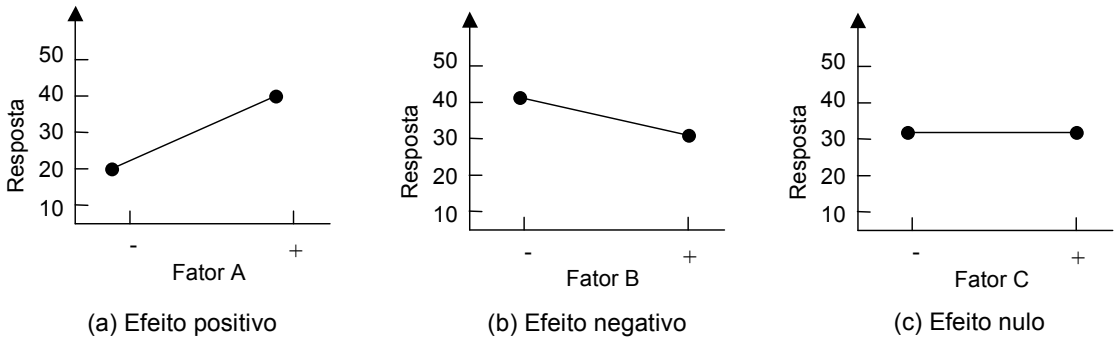


Figura 2.15 - Gráfico de efeito na variável de resposta em função do nível dos fatores A, B e C

Adicionalmente, também se deve considerar o efeito da interação entre os fatores, o qual corresponde à diferença média do efeito entre os fatores. Normalmente, são utilizados visando ilustrar a interação entre os fatores num experimento, como indica a Fig. 2.16, onde dois fatores, A e B, são testados em dois níveis, baixo (-) e alto (+).

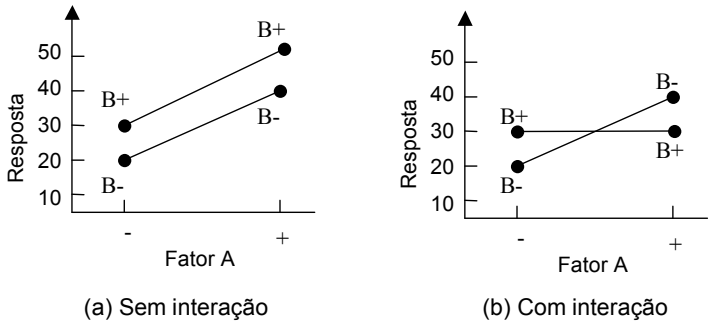


Figura 2.16 - Gráfico de interação na variável de resposta em função do nível dos fatores A e B (Adaptado de MONTGOMERY, 1997, p.230)

Nesses gráficos as linhas aproximadamente paralelas (Fig. 2.16a) indicam a ausência de interação entre os fatores, por outro lado, quando as linhas não estão paralelas ou se cruzam (Fig. 2.16a) isso indica que existe interação (MONTGOMERY, 1999).

Outro procedimento muito comum entender a influência do efeito consiste em realizar a análise de variância (ANOVA) para determinar quais os efeitos são diferentes de zero. Esse procedimento é preferencialmente aplicado em experimentos que tenham sido replicados

(repetidos), ou seja, exista mais de uma medida para a variável de resposta (CARPINETTI, 2000). As replicações são necessárias para calcular o erro entre as diferentes medidas. No caso de experimentos não replicados, a ANOVA é realizada considerando o erro igual ao efeito das interações de mais alta ordem, e estas interações são desprezadas. Em alguns casos podem ocorrer interações de mais alta ordem, assim não convém adotar essa hipótese. Por isso, outra forma de análise em experimentos não replicados atribui todos os efeitos aleatórios ao erro, e esses efeitos podem ser identificados através de uma distribuição Normal. Portanto, todos os efeitos que não pertencem a essa distribuição são admitidos como produzidos pela mudança de nível do fator.

Segundo Freitas Filho (2001), a vantagem do projeto fatorial completo é possibilitar que todas as combinações sejam analisadas, podendo encontrar o efeito de todos os fatores e entender suas interações. Por outro lado, segundo ele, a principal desvantagem consiste no custo deste tipo de estudo em decorrência da necessidade de cada experimento ser repetido várias vezes. No entanto, em geral, essa desvantagem não é um empecilho tão considerável quando os experimentos são realizados no computador, no caso da simulação computacional, a não ser os casos onde o modelo de simulação demande um tempo excessivo para ser executado.

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". Além do mais, na análise de variância em experimentos fatoriais completos é comum o emprego de pacotes computacionais. (MONTGOMERY, 1997).

Projeto fatorial 2^K

De acordo com Montgomery (1997) existem alguns casos especiais num projeto fatorial completo. Um deles é aquele onde existem k fatores, sendo que cada fator possui apenas dois níveis: alto e baixo. Assim, a quantidade de experimentos em cada replicação é determinada substituindo os k fatores em $2^k = 2 \times 2 \times ... \times 2$, por isso esse tipo de experimento é chamado projeto fatorial 2^k.

Para representar as diferentes combinações de níveis de cada fator, Montgomery (1997) apresenta três tipos de notações mais utilizadas. Para exemplificar isso, seja um experimento de três fatores A, B, e C, cada um com dois níveis, portanto um projeto fatorial 2^3. Na primeira simbologia, chamada notação geométrica, o nível alto e baixo para cada fator é representado pelos sinais "+" e "-", respectivamente. A segunda notação utiliza uma legenda própria para identificar as cada combinações de fator, enquanto a última utiliza os números 1 e 0 ao invés dos sinais de "+" e "-", para identificar os níveis alto e baixo, respectivamente. Essas diferentes notações podem ser identificadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Diferentes notações usadas em projeto de experimentos (MONTGOMERY, 1997, p.301)

Experimento	A	B	C	Legenda	A	B	C
1	-	-	-	(1)	0	0	0
2	+	-	-	a	1	0	0
3	-	+	-	b	0	1	0
4	+	+	-	ab	1	1	0
5	-	-	+	c	0	0	1
6	+	-	+	ac	1	0	1
7	-	+	+	bc	0	1	1
8	+	+	+	abc	1	1	1

Outra forma de representação freqüentemente utilizada possibilita visualizar as combinações dos fatores. Assim, para o projeto fatorial 2^3 descrito anteriormente, tem-se o cubo mostrado na Fig. 2.17.

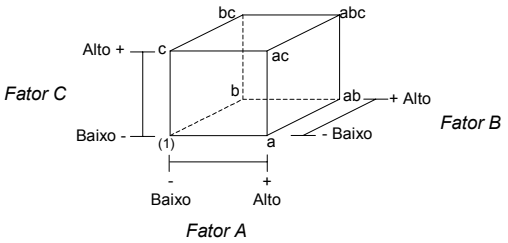


Figura 2.17 - Projeto fatorial 2^3 (MONTGOMERY, 1997, p.302)

A ANOVA é baseada no seguinte teste de hipóteses:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_1 = \mu_2 =... = \mu_a$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \text{ para o menor do par (i, j)}$$

Onde μ_i corresponde ao valor médio do efeito do tratamento i, para i =1,2,...,a. Quando a hipótese nula (H_0) é verdadeira, significa que a média dos efeitos para ambos os níveis é estatisticamente igual, portanto o efeito não é significativo. No sentido inverso, quando a hipótese nula é falsa, significa que a média dos efeitos é estatisticamente diferente, por isso o efeito é significativo. Essas análises levam em consideração a probabilidade de aceitar uma hipótese falsa, ou rejeitar uma hipótese verdadeira, e essa probabilidade é expressa pelo valor do nível de significância admitido para o teste (1 - α). Isto porque a média dos efeitos pode ser afetada tanto pelo efeito provocado pela alteração do nível de um fator, como também pelo efeito associado ao erro. Assim, a análise de variância consiste na comparação efeito do fator com o efeito do erro, considerando um determinado nível de significância.

A ANOVA é realizada a partir do cálculo de algumas variáveis usadas para medir a variabilidade nos resultados, como a soma dos quadrados (SS - *Sum of Square*) e a média quadrática (MS – *Mean Square*). Estas variáveis são utilizadas para testar a hipótese de que essas variabilidades não são maiores que o erro, por meio do teste de hipótese usando a distribuição F, como mostra a Tabela 2.6. O valor do nível de significância para o experimento (1 - P) corresponde ao menor nível de significância de rejeitar uma hipótese nula, sendo ela verdadeira. Por isso normalmente esse valor é comparado com o nível de

significância adotado (1 - α) para decidir se um fator influencia ou não. Assim, se o valor de 1 - P for maior que o valor de 1 - α, significa que o efeito do fator é significativo, e vice-versa.

Tabela 2.6 - ANOVA para o projeto fatorial 2^3

Fonte de variação	SS	DF	MS	F_0	P
A	SS_A	1	MS_A	F_{0A}	P_A
B	SS_B	1	MS_B	F_{0B}	P_B
C	SS_C	1	MS_C	F_{0C}	P_C
AB	SS_{AB}	1	MS_{AB}	F_{0AB}	P_{AB}
AC	SS_{AC}	1	MS_{AC}	F_{0AC}	P_{AC}
BC	SS_{BC}	1	MS_{BC}	F_{0BC}	P_{BC}
ABC	SS_{ABC}	1	MS_{ABC}	F_{0ABC}	P_{ABC}
Erro	SS_E	$2^k(n - 1)$	MS_E		
Total	SS_T	$n2^k - 1)$			

A soma dos quadrados ($SS_{AB...K}$) para cada fonte de variação é calculado de acordo com a Eq. 2.1, à exceção da soma dos quadrados total (SS_T) e a soma dos quadrados para o erro (SS_E), os quais são calculados pelas Eq. 2.2 e 2.3, respectivamente.

$$SS_{AB...K} = \frac{1}{n2^k}(Contrast_{AB...K})^2 \tag{2.1}$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{n} y^2_{ijk} - \frac{y^2_{...}}{4n} \tag{2.2}$$

Onde:

$$y_{...} = \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{n} y_{ijk}$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - ... - SS_K - SS_{AB} - SS_{AC} - ... - SS_{JK} - SS_{ABC} - SS_{ABD} - ... - SS_{IJK} - ... \tag{2.3}$$

O $Contrast_{AB...K}$ representa o efeito produzido pelo fator considerado, o qual é calculado utilizando a Eq. 2.4.

$$Contrast_{AB...K} = (a \pm 1)(b \pm 1)...(k \pm 1) \tag{2.4}$$

O sinal em cada conjunto de parênteses é negativo se o fator está incluído no efeito e positivo se o fator não está incluído. Por exemplo, em um projeto fatorial 2^3 o *Contrast* para a fonte de variação AB seria:

$$Contrast_{AB} = (a - 1)(b - 1)(c + 1)$$

$$Contrast_{AB} = abc + ab + c + (1) - ac - bc - a - b$$

Para se obter o valor do $Contrast_{AB}$ basta substituir a combinação de níveis dos fatores expressa por cada termo pelo seu respectivo resultado obtido no experimento.

Já a média quadrática é obtida dividindo-se a soma dos quadrados pela quantidade de graus de liberdade (DF – *Degree of Freedom*) de cada fonte de variação, conforme a Eq. 2.5. Por outro lado, o valor de F_0 é calculado baseado na razão do efeito do fator pelo efeito do erro, como mostra a Eq. 2.6.

$$MS_{AB...K} = \frac{SS_{AB...K}}{DF_{AB..K}} \tag{2.5}$$

$$F_{0AB...K} = \frac{MS_{AB...K}}{MS_E} \tag{2.6}$$

De forma generalizada, considerando uma quantidade de k fatores, a ANOVA pode ser representada de acordo com a Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - ANOVA generalizada para o experimento 2^k (MONTGOMERY, 1997, p.317)

Fonte de variação	**SS**	**DF**
k efeitos principais		
A	SS_A	*1*
B	SS_B	*1*
...	...	...
K	SS_K	*1*
$\left(\frac{k}{2}\right)$ interações entre dois fatores		
AB	SS_{AB}	*1*
AC	SS_{AC}	*1*
...	...	...
JK	SS_{JK}	*1*
$\left(\frac{k}{3}\right)$ interações entre três fatores		
ABC	SS_{ABC}	*1*
ABD	SS_{ABD}	*1*
...	...	...
IJK	SS_{IJK}	*1*
…	…	...
$\left(\frac{k}{k}\right)$ = 1k interações entre fatores		
ABC	SS_{ABC}	*1*
ABD	SS_{ABD}	*1*
...	...	...
IJK	SS_{IJK}	*1*
…	…	...
ABC ... K	$SS_{ABC...K}$	*1*
Erro	SS_E	$2^k(n - 1)$
Total	SS_T	$n2^k - 1)$

Usualmente a analise de variância (ANOVA) é usada para confirmar a interpretação dos resultados examinando a magnitude e direção dos efeitos (MONTGOMERY, 1997, p.294).

CAPÍTULO 3
METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho consiste no emprego da simulação de sistemas aliada à técnica de projeto de experimentos. Inicialmente é dada uma visão geral do experimento de simulação realizado, destacando as *features* consideradas, a identificação dos fatores e variáveis de resposta. Em seguida é apresentado o modelo de simulação, o qual foi desenvolvido com o propósito de possibilitar a variação de cada um dos fatores considerados e seus respectivos níveis. A seguir, são apresentados detalhes do modelo relacionados à geração dos lotes, ao planejamento do processo, às ordens de fabricação e ao sistema de manufatura. No último item é discutido o procedimento aplicado para combinar os fatores utilizados na realização da simulação propriamente dita e obtenção dos resultados.

3.1 Planejamento do experimento

O projeto de experimentos consiste tanto na definição dos fatores de controle e variáveis de resposta, quanto nas técnicas empregadas para a condução do experimento e análise dos resultados. Tais técnicas são úteis para verificar se um determinado fator influencia ou não a resposta de um sistema. Segundo Montgomery (1997), isto permite validar os resultados obtidos para intervalos bem maiores do que aqueles para os quais o experimento foi realizado, já que cada experimento é realizado variando-se o nível de alguns fatores de controle, enquanto o nível de outros é mantido constante.

Os fatores de controle são variáveis do processo cujo valor é possível controlar. Logo, a primeira etapa do experimento foi a identificação dos fatores de controle, bem como seus respectivos níveis. Neste trabalho, foram identificados fatores relacionados à formação da peça (*features* por peça e *features* duplicadas), ao processo (quantidade do lote, quebra de máquina e tipo de plano) e ao ambiente do sistema de manufatura (lotes simulados e tempo de chegada).

Feito isso, foram escolhidas variáveis de resposta condizentes com os critérios de desempenho propostos para análise neste trabalho. Desse modo, as variáveis de resposta selecionadas foram a produtividade (peças/hora), estoque médio em processamento (peças) e a utilização dos recursos (%).

Assim, cada experimento de simulação foi conduzido de modo que fosse testado um determinado fator em função de todos os níveis dos demais. Esse procedimento foi realizado para todos os fatores selecionados, e permitiu verificar a influência do nível de cada fator nas variáveis de resposta.

Como todas as possíveis combinações dos fatores foram consideradas, o experimento caracteriza-se como um projeto fatorial completo. De acordo com Montgomery (1997), esse tipo de experimento é necessário quando interações entre os fatores devem ser mostradas a fim de evitar conclusões contraditórias.

Cada experimento foi realizado considerando ainda dois sistemas de manufatura análogos, diferindo apenas na quantidade de máquinas existentes, e dessa forma foi possível avaliar dois níveis diferentes de carga de trabalho sobre os recursos. Além disso, como se adotou a hipótese de que a seleção de um recurso alternativo está associada a uma menor eficiência, assim foram consideradas penalidades atuando sobre as alternativas, no caso do plano de processo com alternativas. Esta penalidade corresponde a um tempo de usinagem maior, comparado ao plano sem alternativas. Como cada variável de resposta foi avaliada em função de duas penalidades distintas, cada sistema de manufatura também foi simulado em termos dessas penalidades. Em suma, os resultados obtidos caracterizam quatro cenários distintos, da seguinte forma:

- Sistema de manufatura balanceado
  - *Penalidade de 20%;*
  - *Penalidade de 40%;*
- Sistema de manufatura desbalanceado
  - *Penalidade de 20%;*
  - *Penalidade de 40%.*

Assim, para reduzir os erros inerentes à variabilidade do sistema e obter o erro experimental, foram realizadas três simulações para um mesmo nível de cada fator, ou seja, cada experimento foi replicado (repetido) três vezes. Montgomery (1997, p.225) sugere que ao menos duas replicações devem ser realizadas para cada fator visando determinar a soma dos quadrados devido ao erro, pois num projeto fatorial completo admite-se no modelo a existência de todas as possíveis interações.

Como foram considerados sete fatores, cada um com dois níveis, isso resulta num total de 2^7 = 128 experimentos. Porém para cada fator são consideradas três replicações, portanto a quantidade de experimentos aumenta para 3 x 128 = 384 experimentos. Considerando a existência de dois sistemas de manufatura, cada um sujeito a duas penalidades diferentes atuando sobre a utilização de alternativas, tem-se o total de 2 x 2 x 384 = 1536 experimentos. Todos esses experimentos foram realizados com os seguintes propósitos:

- determinar quais os fatores de controle que mais influenciam a produtividade, o estoque em processo e a utilização dos recursos;
- avaliar se existem interações entre os fatores de controle considerados, em relação à produtividade, o estoque em processo e à utilização dos recursos;

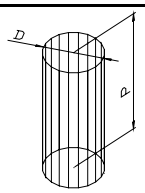
- avaliar a influência do tipo de plano de processo, ou seja, do nível desse fator, sobre a produtividade, o estoque em processo e a utilização dos recursos;
- avaliar a influência da penalidade na utilização de alternativas, considerado os resultados obtidos para cada fator em relação à produtividade, o estoque em processo e à utilização dos recursos.
- avaliar a influência do tipo de sistema de manufatura, considerando os resultados obtidos para cada fator em relação à produtividade, o estoque em processo e à utilização dos recursos.

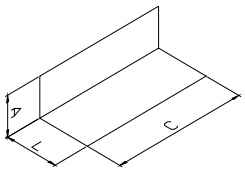
Uma explicação mais detalhada dos fatores e variáveis de resposta considerados é dada nos itens seguintes, sendo que antes são apresentas as *features* utilizadas no experimento de simulação.

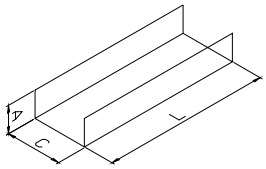
3.1.1 *Features* consideradas

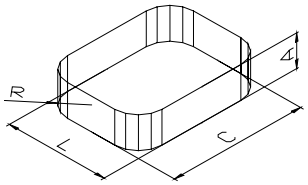
No Capítulo 1 definiu-se *features* como sendo formas geométricas às quais estão associadas informações úteis para sua fabricação, tais como dimensões, ferramentas, máquinas, etc. Com base nessa definição, foram selecionadas quatro tipos de *features* visando a fabricação de peças prismáticas, tais como: furo, rebaixo, canal e cavidade. Para cada tipo de *feature* foram selecionadas cinco dimensões diferentes, tal como mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Dimensões da *features* utilizadas na formação das peças

Furo			
	***Feature nº***	**Diâmetro (D)**	**Profundidade (P)**
	1	12	32
	2	13	40
	3	18	44
	4	20	55
	5	22	60

Rebaixo				
	***Feature nº***	**Comprimento (C)**	**Largura (L)**	**Altura (A)**
	6	80	16	15
	7	85	18	18
	8	90	20	18
	9	95	23	20
	10	100	28	25

Canal				
	***Feature nº***	**Comprimento (C)**	**Largura (L)**	**Altura (A)**
	11	80	14	10
	12	85	15	12
	13	85	16	13
	14	90	18	15
	15	95	20	18

Cavidade					
	***Feature nº***	**Comprimento (C)**	**Largura (L)**	**Altura (A)**	**Raio conc.(R)**
	16	50	20	8	4
	17	55	22	10	5
	18	60	25	12	6
	19	60	30	12	7
	20	70	32	14	8

3.1.2 Fatores de controle

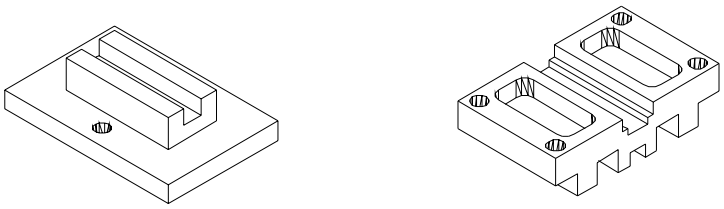
Os fatores de controle são aqueles que influenciam as variáveis de resposta do sistema, cujo comportamento deseja-se avaliar. No caso de um sistema de manufatura acredita-se que os critérios de desempenho considerados podem ser afetados pelos seguintes fatores: *features* por peça, *features* duplicadas, tamanho do lote, quebra de máquina, tipo de plano, tempo de chegada e lotes simulados. Para cada um desses fatores foram considerados dois níveis, isto é, baixo e alto. Os fatores e seus respectivos níveis são descritos nos itens seguintes e apresentados resumidamente na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Fatores de controle utilizados no experimento

Fator	Descrição	Nível	Valor
Features por peca	Quantidade de *features* diferentes numa mesma peça.	- Baixo	1 a 3 *features* por peça
		+ Alto	7 a 10 *features* por peça
Features duplicadas	Quantidade de duplicações de uma mesma *feature* em cada peça.	- Baixo	1 a 3 *features*
		+ Alto	7 a 10 *features*
Quantidade do lote	Quantidade de peças contidas em cada lote.	- Baixo	10 a 50 peças
		+ Alto	200 a 500 peças
Quebra de máquina	Valor da média utilizada para estimar o tempo médio entre falhas.	- Baixo	500h de tempo médio entre falhas
		+ Alto	100h de tempo médio entre falhas
Tipo de plano	Plano de processos considerado pode ou não apresentar alternativas.	- Baixo	Plano sem alternativas
		+ Alto	Plano com alternativas
Tempo de chegada	Tempo para a chegada do próximo lote em relação ao anterior.	- Baixo	20 a 30% do tempo usinagem
		+ Alto	50 a 60% do tempo usinagem
Lotes simulados	Quantidade total de lotes simulados em cada replicação.	- Baixo	50 lotes
		+ Alto	200 lotes

***Features* por peça**

Corresponde à quantidade de *features* diferentes em cada peça. No nível baixo, considera-se que uma peça possua de uma a três *features*, já no nível alto cada peça possui de sete a dez *features*. Por exemplo, no nível alto tem-se um elevado número de *features* por peça, conseqüentemente a peça será formada por uma quantidade de *features* que varia de sete a dez *features*, sendo que todas elas devem ser diferentes. A Fig. 3.1, exemplifica os diferentes níveis para esse fator. Assim, a figura 3.1a e 3.1b, mostram duas possíveis peças geradas utilizando os níveis baixo e alto, respectivamente, para esse fator, enquanto o fator *features* duplicadas foi mantido no nível baixo.



(a) Três features (b) Sete features

Figura 3.1 - Peças formadas em diferentes níveis do fator *features* por peça

Features duplicadas

Esse fator considera a quantidade de *features* iguais em cada peça, sendo que o nível baixo corresponde a uma variação de uma a três *features* iguais, enquanto no nível alto pode-se ter de sete a dez *features* iguais. Em outras palavras, um alto número de *features* duplicadas corresponde à existência de uma mesma *feature* de sete a dez vezes na mesma peça. Tanto esse fator como o anterior estão diretamente relacionados à complexidade da peça a ser formada. Assim, quanto mais alto o nível desses fatores maior será a complexidade da peça. As Fig. 3.2a e Fig. 3.2b apresentam duas possíveis peças geradas considerando os níveis baixo e alto, respectivamente.

(a) 2 rebaixos, 2 canais e 1 cavidade (b) 8 Furos, 8 rebaixos e 8 canais

Figura 3.2 - Peças formadas em diferentes níveis do fator *features* duplicadas

Tamanho do lote

A quantidade do lote refere-se à quantidade de peças em cada lote. Um lote pode conter uma quantidade variável de um mesmo tipo de peça em cada nível. No nível baixo a quantidade do lote varia entre dez e cinqüenta peças, enquanto que no nível alto os valores variam de duzentas a quinhentas peças.

Quebra de máquina

A probabilidade de ocorrência de falhas nas máquinas segue uma distribuição de Poisson cuja média varia em função do nível desse fator. Assim a média do tempo entre falhas utilizada nesta distribuição pode assumir os seguintes valores: 500 ou 100 horas, de acordo com o níveis baixo e alto, respectivamente. Quanto maior o valor da média do tempo entre falhas, menor a probabilidade de ocorrência de falhas.

É importante lembrar que a ocorrência de uma falha, de qualquer forma, ainda é aleatória. Assim, o valor definido pelo nível do fator quebra de máquina refere-se à média a ser utilizada pela distribuição de Poisson para determinação do tempo de falha, sendo que o tempo em que a falha irá ocorrer é determinado aleatoriamente.

Tipo de plano

O fator tipo de plano define dois tipos de plano de processo, de acordo com seu nível: baixo ou alto. Assim o nível baixo caracteriza um plano sem alternativas (plano de processo tradicional), isto é, apenas uma opção de máquina é selecionada para a execução de etapa do processo. Já o nível alto consiste no plano de processo com alternativas, e nesse caso foram consideradas duas opções de máquina para a execução de cada etapa do processo.

Dessa forma, no plano de processos com alternativas existem dois caminhos para a fabricação de uma peça. De acordo com Usher (2003), preferencialmente devem ser utilizadas apenas duas alternativas, pelo fato de uma quantidade maior de alternativas estar associada à utilização de recursos de menor eficiência. Isso porque os recursos mais eficientes estão, na maior parte do tempo, sobrecarregados em razão de serem preferidos pelos processistas. Além do mais, uma menor quantidade de alternativas, dispensa a utilização de métodos complexos e de difícil implementação (alguns deles baseados na utilização de técnicas de inteligência artificial para seleção das alternativas).

A estratégia adotada para a seleção das alternativas no plano de processos com alternativas foi baseada no estoque em processo. Assim, inicialmente dois recursos são selecionados para a execução de uma tarefa, sendo que um recurso é definido como sendo a primeira opção e outro como segunda opção. Sendo que um recurso definido como segunda opção só será utilizado para a fabricação de uma peça quando o estoque em processo nesse recurso for menor que o estoque em processo no recurso definido como primeira opção. Essa estratégia favorece utilização dos recursos de menor carga de trabalho, reduzindo a sobrecarga nos recursos gargalos. Outra vantagem é sua possibilidade de implementação sem grandes transtornos, pois em geral é fácil identificar os recursos de menor estoque no chão de fábrica.

Tempo de chegada

O tempo entre a chegada de um lote e outro constitui um importante parâmetro na simulação de um sistema de manufatura, pois é ele que irá determinar a existência de estoques em processo ou não. Por exemplo, se o tempo de chegada de um lote numa determinada máquina for menor que o tempo necessário para fabricar o lote anterior nesta mesma máquina, ocorrerão estoques em processo. Por outro lado, quando o tempo para a chegada de um lote numa máquina for maior que o tempo necessário para fabricar um lote

anterior nesta mesma máquina, haverá ociosidade da máquina. Pode ocorrer ainda uma situação intermediária, na qual o tempo de chegada às vezes supera o tempo de fabricação, formando-se estoques em processo, e outras vezes não, causando ociosidade. Todas essas situações foram consideradas no experimento, com o tempo entre duas chegadas consecutivas de lotes aumentando de 10% até 100% do tempo de fabricação do lote anterior, conforme o nível desse fator. Assim tem-se um tempo de 20 a 30% para o nível baixo e 50 a 60% no nível alto. Por exemplo, se um lote entrar no sistema num tempo qualquer, e o tempo de usinagem deste lote for 120 minutos, o próximo lote poderá chegar 24 minutos depois, se o nível desse fator for baixo. Assim, o próximo lote irá chegar quando ainda restam 96 minutos para terminar o lote anterior, e portanto terá de esperar para ser fabricado.

Lotes simulados

Este fator está relacionado com a duração da simulação, ou seja, ao tempo total de simulação, já que a quantidade de lotes simulados é proporcional ao tempo de simulação. Dessa forma, quanto maior a quantidade de lotes simulados, maior o tempo necessário para produzi-los. A existência desse fator permite avaliar a influência do tamanho da simulação sobre os resultados, pois, como o sistema em questão se caracteriza como um sistema não terminal, não existe estado inicial predefinido, muito menos um evento que determina o fim da simulação (FREITAS FILHO, 2001). Normalmente a simulação é realizada considerando apenas a fase em que o mesmo se encontra em regime permanente, o qual é caracterizado por uma menor variabilidade das variáveis estocásticas do modelo de simulação (FREITAS FILHO, 2001). Entretanto, a determinação do regime permanente em um modelo de simulação combinado com projeto de experimentos pode se tornar inviável, em razão da quantidade de experimentos a ser realizada, pois seria necessário avaliar o tamanho da simulação para cada combinação de fatores.

A utilização de um fator relacionado à duração da simulação permite avaliar o comportamento do sistema em dois contextos distintos. O nível baixo desse fator permite submeter o sistema a uma maior variabilidade no tempo para a chegada de uma ordem de fabricação quando comparado ao nível alto desse fator, onde essa variabilidade é menor. Portanto, a maior incerteza quanto ao tempo para chegada de uma ordem de fabricação ao sistema está associada ao nível baixo, se comparada ao nível alto. Com isso, adotou-se a quantidade de lotes simulados igual a 50 lotes, no nível baixo, e 200 lotes, no nível alto.

3.1.3 Variáveis de resposta

Produtividade

O cálculo da produtividade (*P*) é realizado considerando a quantidade total de peças produzidas (*Q*) em um intervalo de tempo (*Δt*), conforme mostra a Equação 3.1. A quantidade total de peças produzidas (*Q*), dada pela Equação 3.2, é o somatório da quantidade de peças em cada lote produzido (*q*), considerando uma determinada quantidade de lotes (*n*). Assim, para dois experimentos com um mesmo nível para o fator lotes simulados, que define a quantidade de lotes (n) que serão simulados pelo sistema, o valor da quantidade total de peças (Q) será o mesmo em ambos os experimentos. Por isso, o que irá diferenciar a produtividade obtida entre um experimento e outro será o tempo necessário (*Δt*) para produzir todas as peças na quantidade de lotes simulados (*n*).

$$P = \frac{Q}{\Delta t} \tag{3.1}$$

Onde:

$$Q = \sum_{i=0}^{n} q \tag{3.2}$$

Estoque em processo

O estoque médio em processo (*E*) para cada máquina foi calculado com base na expressão apresentada por Law e Kelton (2000), a qual relaciona o somatório do tempo total de espera (*Δte*) para todos os lotes simulados (*n*), considerando a quantidade total de peças em cada lote (q) no intervalo de tempo (*Δt*), como se observa na Equação (3.3).

$$E = \frac{\sum_{i-0}^{n} (\Delta te.q)}{\Delta t} \tag{3.3}$$

Essa variável de resposta permite realizar análises em conjunto com a produtividade, pois de nada adianta obter elevada produtividade num sistema de manufatura à custa de elevados índices de estoque em processo. É desejável que o aumento da produtividade venha, sempre que possível, acompanhado de uma estabilização ou redução do estoque em processo.

Utilização dos recursos

A utilização de cada recurso é dada pela relação entre o intervalo de tempo de utilização (*Δtu*) do recurso e o intervalo de tempo (*Δt*) que o mesmo estava disponível, como mostra a Equação 3.4. Essa equação exprime a relação entre a ocupação do recurso e a sua

capacidade, onde a ocupação consiste no intervalo de tempo (Δtu) em que o recurso esteve empregado na fabricação do lote, e a capacidade consiste no intervalo de tempo (Δt) em que o recurso esteve disponível para fabricação do lote.

$$U = \frac{\Delta tu}{\Delta t} \tag{3.4}$$

Deseja-se alavancar uma elevada utilização desde que haja uma estabilização ou redução dos estoques.

3.2 Modelo de simulação

Neste trabalho realizou-se a modelagem de dois sistemas de manufatura utilizando um programa de simulação, o qual utiliza a linguagem SIMAN V.

Dividiu-se a tarefa de simulação em duas etapas: geração do lote de peças e simulação dos sistemas de manufatura. A primeira etapa refere-se à geração das ordens de produção dos lotes de peças que serão utilizados pelo modelo para simulação. Nessa etapa são realizadas as seguintes atividades: geração das *features*, definição da quantidade de *features* duplicadas, definição da quantidade do lote, geração da seqüência de usinagem e cálculo dos tempos de usinagem. Essas informações foram armazenadas numa planilha para em seguida, na segunda etapa, serem utilizadas como dados de entrada no programa de simulação, no qual o sistema de manufatura foi modelado.

A segunda etapa consiste na execução da simulação do sistema, sendo que os resultados obtidos para as variáveis de resposta são armazenados numa planilha de resultados. Esse processo é ilustrado na Figura 3.3, onde as tarefas desempenhadas por cada programa são limitadas pelas linhas tracejadas. Cada uma dessas tarefas é descrita com mais detalhes nos itens seguintes.

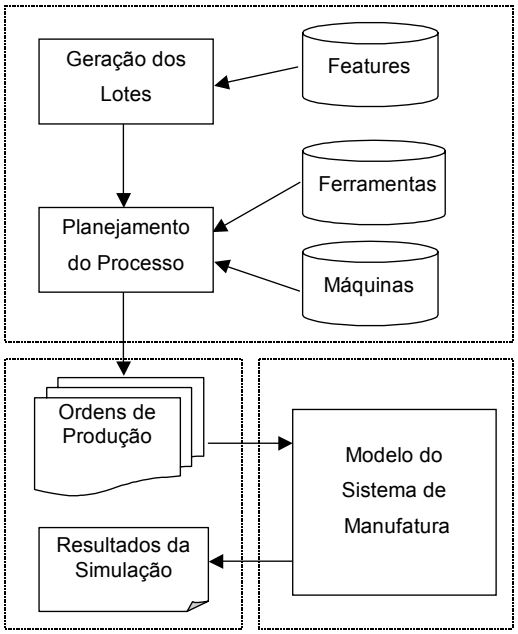


Figura 3.3 - Estrutura do modelo de simulação

3.2.1 Geração dos lotes

Nesta etapa são definidas as características dos lotes que compõem a ordem de produção, tais como as *features* que irão formar as peças e a quantidade de peças em cada lote. A quantidade de *features* diferentes para cada peça é definida aleatoriamente no intervalo definido pelo fator *features* por peça. Assim, definida a quantidade de *features* que vão compor uma determinada peça, resta determinar quais as *features* que irão compor cada peça. Isso é realizado aleatoriamente baseando-se no código de cada *feature* cadastrado no banco de dados de *features*.

A quantidade de *features* diferentes geradas para cada peça e a quantidade de duplicações (cópias) para cada uma dessas *features* varia de acordo com o nível definido para os fatores *features* por peça e quantidade de *features*, respectivamente.

Já a quantidade de peças em cada lotes é determinada aleatoriamente de acordo com o nível atribuído ao fator quantidade do lote, sendo que cada lote é formado por apenas um tipo de peça. A quantidade de lotes a serem gerados, isto é, a quantidade de lotes a serem utilizados pelo modelo de simulação, também é definido nesta etapa.

Ao final do processo de geração do lote pode-se saber quais as *features* utilizadas para formar as peças, bem como a quantidade de peças em cada lote e a quantidade de lotes gerados. A próxima etapa consiste em determinar a seqüência de fabricação e o tempo de usinagem para cada lote, como será mostrado no próximo item.

3.2.2 Planejamento do processo

Ainda considerando o lote formado na etapa anterior, o planejamento do processo é realizado usando as informações cadastradas nos bancos de dados de ferramentas e máquinas para cada uma das *features* geradas. O banco de dados de ferramentas relaciona as *features* e as ferramentas, enquanto o banco de dados de máquinas relaciona as *features* e máquinas necessárias para sua fabricação. No caso do banco de dados de máquinas, foram definidas duas máquinas para fabricação de cada *feature*, sendo que apenas uma foi considerada no caso do plano de processos sem alternativas. No caso do plano de processos com alternativas foram consideradas duas máquinas, sendo uma a primeira alternativa e a outra a segunda alternativa. Cada plano continha a seqüência das máquinas utilizadas para a usinagem de cada *feature*, e seus respectivos tempos de usinagem.

A seqüência de usinagem era obtida a partir das informações do banco de dados de máquinas, enquanto os tempos de usinagem eram calculados com base nas informações do banco de dados de ferramentas. As informações cadastradas para cada ferramenta eram as suas dimensões e condições de corte (avanço, profundidade de corte, velocidade de corte). A Tabela 3.3 apresenta os tempos de usinagem calculados para cada uma das *features* consideradas, bem como suas respectivas ferramentas (TITEX, 1998). Assumiu-se que as máquinas disponíveis tinham condições de fornecer a potência de corte exigida por cada

ferramenta. As expressões usadas no cálculo do tempo de usinagem foram obtidas do trabalho de Ferreira e Wysk (2001), para a usinagem de furos, rebaixos, canais e cavidades.

Tabela 3.3 - Dados relacionados às *features* consideradas

Feature nº	**Tempo (mim.)**	**Tipo de *Feature***	**Ferramentas**	
1	0,3	Furo	A1211*12	
2	0,4	Furo	A1211*13	
3	0,5	Furo	A1211*18	
4	0,6	Furo	A1211*20	
5	0,7	Furo	A1211*22	
6	2,6	Rebaixo	D3265*18	
7	3,1	Rebaixo	D3265*20	
8	3,2	Rebaixo	D3265*22	
9	3,1	Rebaixo	D3265*25	
10	2,9	Rebaixo	D3265*30	
11	1,0	Canal	D2141*14	
12	1,1	Canal	D2141*15	
13	1,2	Canal	D2141*16	
14	1,2	Canal	D2141*18	
15	1,4	Canal	D2141*20	
16	2,3	Cavidade	D2141*20	D2141*4
17	2,2	Cavidade	D2141*22	D2141*5
18	2,9	Cavidade	D2141*25	D2141*6
19	2,8	Cavidade	D2141*15	D2141*7
20	3,4	Cavidade	D2141*16	D2141*8

3.2.3 Ordens de fabricação

Para cada ordem de fabricação eram gerados vários lotes, de acordo com a quantidade definida pelo usuário, e com isso as etapas de geração dos lotes e planejamento do processo, conforme a Fig. 3.1, eram repetidas para cada lote gerado. A cada ordem gerada estava associada uma determinada combinação dos fatores: *features* por peça, *features* duplicadas e quantidade do lote.

As ordens eram então gravadas num arquivo, o qual reunia as seguintes informações: número do lote, quantidade de lotes, *features* da peca, quantidade de *features* duplicadas, quantidade do lote, seqüência de usinagem para a primeira opção, seqüência de usinagem para a segunda opção, tempo de usinagem para a primeira opção, tempo de usinagem para a segunda opção. Em seguida essas informações eram lidas pelo programa de simulação para a usinagem de cada lote e obtenção das variáveis de resposta.

3.2.4 Modelagem do sistema de manufatura

Dois sistemas de manufatura fictícios foram modelados para avaliar o desempenho do uso de alternativas sob dois cenários distintos, isto é, um sistema de manufatura balanceado e outro desbalanceado. No sistema balanceado a quantidade de máquinas capazes de produzir um determinado tipo de peça foi determinada visando nivelar a produtividade de acordo com a demanda de cada tipo.

Inicialmente isso foi realizado admitindo a existência de quatro máquinas, onde cada uma era capaz de produzir um dos quatro tipos de *features* consideradas, como mostra a Tabela 3.4. Em seguida, foi realizado um ajuste para nivelar ainda mais a produtividade, isso porque para um mesmo tipo de *feature* o tempo de usinagem depende das suas dimensões (Tabela 3.3). Essa variação foi compensada considerando um diferente número de operadores por máquina, sendo que alguns operadores foram dedicados ao controle de duas máquinas, ao passo que outros a apenas uma.

Tabela 3.4 - *Features* usinadas em cada tipo de máquina no sistema balanceado

	Plano processo sem alternativas	**Plano processo com alternativas**
Furadeira	Furo	Furo
Fresadora Vertical	Rebaixo, Canal	Furo, Rebaixo, Canal, Cavidade
Fresadora Vertical	Rebaixo, Canal	Furo, Rebaixo, Canal, Cavidade
Centro de usinagem	Cavidade	Furo, Rebaixo, Canal, Cavidade

No sistema desbalanceado esse nivelamento foi rompido com o acréscimo de uma máquina, e assim, nessa situação, existem cinco máquinas capazes de produzir quatro tipos de *features*, conforme a Tabela 3.5. O nivelamento entre a produtividade de cada recurso foi rompido porque qualquer uma das *features* tem a mesma probabilidade de ser selecionada para compor a peça. Assim, a produção de um determinado tipo de *feature* será favorecida, embora a demanda por cada tipo permaneça a mesma.

Tabela 3.5 - *Features* usinadas em cada tipo de máquina no sistema desbalanceado

	Plano processo sem alternativas	**Plano processo com alternativas**
Furadeira	Furo	Furo
Fresadora Vertical	Rebaixo, Canal	Furo, Rebaixo, Canal, Cavidade
Fresadora Vertical	Rebaixo, Canal	Furo, Rebaixo, Canal, Cavidade
Centro de usinagem	Cavidade	Furo, Rebaixo, Canal, Cavidade
Centro de usinagem	Cavidade	Furo, Rebaixo, Canal, Cavidade

Desse modo, o sistema balanceado possui uma carga de trabalho alocada para cada máquina relativamente equilibrada. Por outro lado, no sistema desbalanceado os recursos estavam sujeitos a uma carga de trabalho desproporcional, ou seja, desbalanceada.

Assim, no sistema balanceado a tendência à formação de estoques é baixa, pois o fluxo de peças ao longo do sistema está nivelado. Por outro lado, no sistema desbalanceado existe uma forte tendência à formação de estoques, e, conseqüentemente, à formação de gargalos, pois alguns recursos dispõem de mais capacidade que outros, o que permite que produzam a uma taxa maior e, portanto, acumulam lotes aguardando para serem fabricados nos recursos de menor taxa de produção.

Utilizam-se dois sistemas de manufatura diferentes visando comparar o uso de alternativas sob duas situações: (i) aquela cuja produtividade do sistema não depende de recursos específicos; e (ii) aquela cuja produtividade do sistema depende fortemente do desempenho de apenas alguns recursos, conhecidos como recursos gargalos.

A proposta de se realizar essa comparação surgiu em função da existência de indícios que o uso de alternativas pudesse ser vantajoso na presença de recursos gargalos.

Sistema de manufatura balanceado

O sistema de manufatura balanceado considerado é composto por três operadores e quatro máquinas, sendo duas fresadoras, um centro de usinagem e uma furadeira. Admitiu-se que apenas o centro de usinagem dispõe de comando numérico computadorizado (CNC). Nesse sistema, o qual está ilustrado na Fig. 3.4, são disponibilizados um operador para cada fresadora, enquanto apenas um operador é disponibilizado tanto para controlar o centro de usinagem como a furadeira. Para esse operador, 80% de seu tempo são dedicados à furadeira, enquanto os 20% restantes são disponibilizados ao centro de usinagem. Isso foi admitido porque a tarefa de operação do centro de usinagem envolve principalmente a alimentação de peças, enquanto o tempo remanescente pode ser aproveitado na realização de outras tarefas.

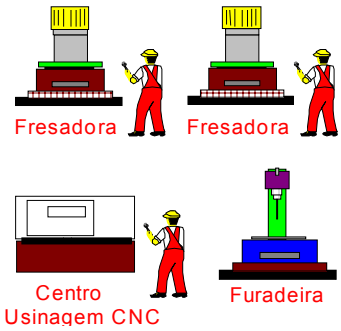


Figura 3.4 - Sistema de manufatura balanceado

Sistema de manufatura desbalanceado

O sistema de manufatura desbalanceado compõe-se de cinco máquinas, ou seja foi acrescentada uma máquina (centro de usinagem) em relação ao sistema balanceado, como mostra a Fig. 3.5. As máquinas utilizadas nesse sistema são as seguintes: duas fresadoras, dois centros de usinagem e uma furadeira. O número de operadores disponibilizados em cada máquina é o mesmo do sistema balanceado. Porém a disponibilidade de tempo do operador da furadeira é menor, pois esse operador passou agora a controlar mais um centro de usinagem. Assim, o tempo dedicado por esse operador à furadeira passou para 60%, enquanto cada centro de usinagem continua a utilizar 20% do tempo.

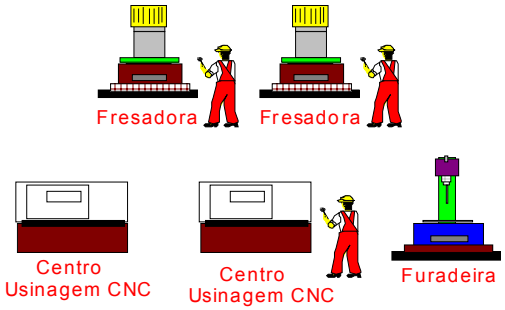


Figura 3.5 - Sistema de manufatura desbalanceado

Penalidade

Foram consideradas ainda duas diferentes penalidades atuando sobre o tempo de usinagem quando uma alternativa do plano de processos é utilizada na usinagem de um lote. Assim, são considerados acréscimos de 20% e 40% sobre o tempo de usinagem para cada penalidade. Por exemplo, considere que o tempo de usinagem para um determinado lote seja de 90 minutos, assumindo que o mesmo seja fabricado utilizando um recurso selecionado na primeira alternativa. Caso o lote venha a ser fabricado utilizando um recurso alternativo, devido à impossibilidade de utilizar o recurso previsto anteriormente, o tempo de usinagem passará para 108 minutos se a penalidade considerada for de 20%, ou 126 minutos se a penalidade considerada for de 40%.

A utilização de duas penalidades visa possibilitar a avaliação do uso de alternativas em planos de processo sob dois contextos, os quais correspondem à escolha de um recurso alternativo com uma eficiência 20% ou 40% menor, de acordo com a penalidade em questão. Assim, foi admitida a pior hipótese na escolha de um recurso alternativo, baseada na situação onde não existem dois recursos disponíveis de mesma eficiência para a usinagem Isso porque acredita-se que os recursos de maior eficiência sejam preferidos para a fabricação de uma peça, portanto estarão menos disponíveis.

Valores adotados

Algumas variáveis da simulação, bem como algumas distribuições de probabilidade tiveram seus valores adotados, como descrito abaixo:

- tempo de chegada: distribuição uniforme cujo valor faria de acordo com o tempo de usinagem do lote anterior e o nível adotado para esse fator, sendo que o tempo para a chegada da primeira ordem era igual a zero;
- tempo de transporte: distribuição uniforme com valor mínimo de 3 minutos e máximo de 10 minutos;
- tempo de *set-up*: na furadeira foi admitido igual a 10 minutos enquanto para a fresadora e centro de usinagem foi considerado igual a 20 minutos.
- tempo de usinagem: esse tempo é determinado no plano de processos, e caso haja alternativas, ele é determinado em função da alternativa considerada.

O tempo de usinagem foi considerado uma variável determinística visando restringir as fontes de variação no modelo, uma vez que o tempo de chegada já é variável estocástica. Logo, a introdução de uma outra variável aleatória iria aumentar as fontes de variabilidade no modelo, o que exigiria uma quantidade de replicações considerável para garantir um intervalo de confiança satisfatório. Além disso, como neste trabalho a influência de cada variável aleatória tem sido controlada, a introdução de uma nova variável aleatória exigiria um novo fator de controle, o que seria redundante pois já existe um fator de controle nesse

sentindo, o qual está relacionado ao tempo de chegada, assim haveria dois fatores executando uma mesma função.

3.3 Simulação do sistema de manufatura

O processo de simulação combinado com projeto de experimentos consiste, basicamente, na realização das simulações associada a um processo iterativo de redefinição do nível dos fatores de controle. Em alguns casos, o nível de cada fator só é alterado após um determinado conjunto de repetições (replicações) do experimento previamente estabelecidas, para cada nível são obtidos novos resultados para as variáveis de resposta, tal como ilustra a Figura 3.6.

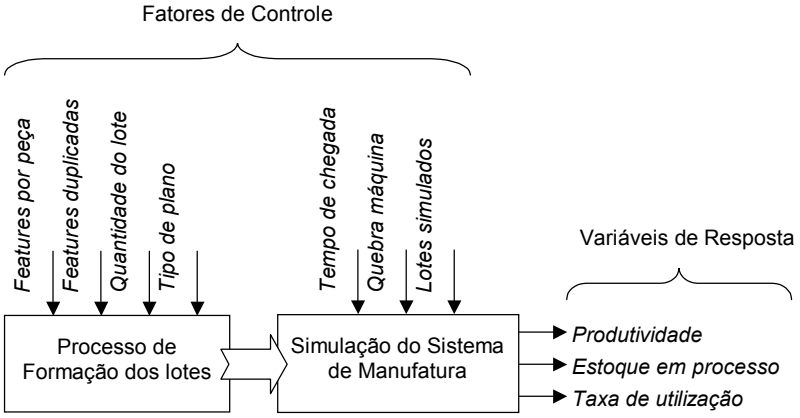


Figura 3.6 - Fatores de controle e variáveis envolvidos na simulação

Assim, antes de se realizar a simulação, é preciso definir quais as combinações de níveis dos fatores a serem realizadas. Como o experimento em questão consiste num experimento fatorial completo, cada simulação é realizada a para um determinado nível de um fator enquanto o nível de todos os outros permanecem inalterados, e algumas das combinações realizadas são mostradas na Tabela 3.6.

É importante ressaltar que nesse processo as etapas de formação dos lotes e simulação do sistema são realizadas separadamente, como já foi visto nos itens anteriores. A formação dos lotes é realizada utilizando a planilha, enquanto a simulação propriamente dita é realizada no programa de simulação, e os resultados obtidos são armazenados numa planilha de resultados.

Para integrar os programas utilizados para desempenhar cada uma dessas etapas, foi utilizado um ambiente de programação comum a todos. Isso permitiu que as informações da planilha de dados fossem lidas pelo programa de simulação, e seus resultados fossem armazenados numa outra planilha de planilha para análise dos resultados. Mais detalhes sobre a implementação do modelo de simulação são descritos no capítulo seguinte.

3.4 Hipóteses adotadas

Tanto no planejamento do experimento como na modelagem do sistema de manufatura, foram consideradas algumas hipóteses, tais como:

- as máquinas selecionadas podem fornecer a potência de corte para qualquer uma das ferramentas selecionadas;
- no início da simulação todos os recursos (máquinas e operadores) estão disponíveis;
- a quantidade de refugo ou retrabalho é considerada desprezível;
- os operadores estavam disponíveis com 100% de sua capacidade, assim as necessidades fisiológicas e eventuais abstenções foram desprezadas;
- admitiu-se que a tolerância das peças, a configuração do magazine de ferramentas e capabilidade das máquinas não era um fator crítico do processo;
- os estoques em processo obedeciam a regra do primeiro que entra é o primeiro que sai (PEPS ou *FIFO – First In First Out*).

Enfim, embora a implementação tenha sido realizada utilizando-se aplicativos comerciais tanto para a geração das ordens (Microsoft® Excel) e a simulação do sistema de manufatura (Arena®), é importante ressaltar que a não há impedimentos para utilizar outros aplicativos, a não ser no caso de limitações de cada aplicativo em relação à integração entre aplicativos diferentes.

Tabela 3.6 - Exemplo da combinação de níveis dos fatores de controle utilizados no experimento

Tempo de Chegada	**Quebra de máquina**	**Lotes Simulados**	**Quantidade do lote**	***Features* Duplicadas**	***Features* por peça**	**Tipo de Plano**
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	+
-	-	-	-	-	+	-
-	-	-	-	-	+	+
-	-	-	-	+	-	-
-	-	-	-	+	-	+
-	-	-	-	+	+	-
-	-	-	-	+	+	+
-	-	-	+	-	-	-
-	-	-	+	-	-	+
-	-	-	+	-	+	-
-	-	-	+	-	+	+
-	-	-	+	+	-	-
-	-	-	+	+	-	+
-	-	-	+	+	+	-
-	-	-	+	+	+	+

CAPÍTULO 4
IMPLEMENTAÇÃO

Neste capítulo serão abordados aspectos referentes à implementação e ao experimento de simulação realizado, O qual está dividido em duas etapas: geração das ordens e simulação do sistema de manufatura. Tanto a lógica de funcionamento como o procedimento operacional são descritos para as duas etapas. Porém, antes disso, será justificada a seleção das ferramentas de desenvolvimento utilizadas.

4.1 Seleção das ferramentas de desenvolvimento

A primeira decisão com relação à implementação foi definir a ferramenta utilizada na realização da simulação, ou seja, se seria desenvolvido um programa especÍfico ou se utilizaria um aplicativo já disponível.

Optou-se pela última alternativa, isto é, utilizar um aplicativo já existente, pois o desenvolvimento de um programa para uma situação específica, como o experimento a ser realizado, poderia consumir muitos recursos sem uma justificativa compatível em relação à utilização do mesmo em outros trabalhos. Havia a possibilidade em desenvolver um programa de maneira a torná-lo o mais genérico possível, de modo que pudesse contemplar tanto o experimento em questão, como possibilitar a realização de outros tipos de experimentos, ou seja, adicionar e controlar diferentes fatores. No entanto, como o prazo disponível para o desenvolvimento e realização das simulações era de aproximadamente seis meses, seria necessário o envolvimento de uma equipe de trabalho de maiores proporções para o cumprimento desse prazo, o que não estava disponível naquele momento.

Assim, a solução encontrada foi a utilização de um aplicativo de simulação que fosse ao mesmo tempo robusto, permitindo obter resultados confiáveis, e possibilitasse incorporar as customizações necessárias para o experimento, como a definição de alguns parâmetros durante a simulação através de um programa auxiliar.

O aplicativo Arena® foi o que mais se adequou a essas exigências, pois além de ser largamente empregado e ter seu mérito reconhecido para efetuar a modelagem e simulação de processos industriais, ele possui uma farta literatura e licenças para treinamento disponíveis gratuitamente (com limitação quanto ao número de entidades modeladas). Além disso, o Arena dispõe de ferramentas que facilitam sua customização e integração com outros programas como o Microsoft Excel®, com o uso dos recursos ActiveX® Automation. Dessa forma, um código de programação em Microsoft® Visual Basic® pode ser editado no Arena, por meio do ambiente Visual Basic® for Application (VBA).

Assim, a questão pertinente à realização da simulação estava resolvida. No entanto, no decorrer da modelagem, verificou-se uma carência de recursos mais específicos, como por exemplo uma planilha onde as ordens de produção geradas pelo programa em Visual Basic® pudessem ser visualizadas para verificação e validação antes da realização da simulação. Portanto, optou-se por separar a realização do experimento de simulação em duas etapas, sendo que a primeira consistia em gerar as ordens de produção numa planilha, no caso o Microsoft® Excel, e a segunda em ler essas ordens num ambiente de simulação, nesse caso o Arena.

O Excel foi selecionado porque, além de permitir a integração com o Arena, também permitia a automação de algumas funções por meio do desenvolvimento de macros[3] no ambiente VBA. Assim a implementação foi realizada utilizando a linguagem de programação Visual Basic, pelo fato da mesma ser compatível tanto com o Excel como o Arena. Portanto, essa linguagem foi então utilizada para gerar programas em ambos os aplicativos.

4.2 Geração da ordem de produção

4.2.1 Etapas para geração da ordem de produção

A próxima etapa na implementação foi o desenvolvimento do programa para a geração da ordem de produção no Excel, e esse programa foi desenvolvido a partir da criação de macros em Visual Basic. A principal vantagem disso é que o programa pode ser construído de forma modular facilitando o desenvolvimento, o que combinado à utilização de uma planilha, facilita validar o código gerado. Por exemplo, o código das *features* geradas podia ser visualizado na planilha sem que se fosse necessário acompanhar o valor de uma determinada variável ao longo da execução do programa, como teria de ser realizado caso não fosse utilizada a planilha. Outra facilidade é a utilização da extensa biblioteca de funções disponível no Excel, como por exemplo as funções para geração de números aleatórios utilizados para geração das *features* e da quantidade do lote.

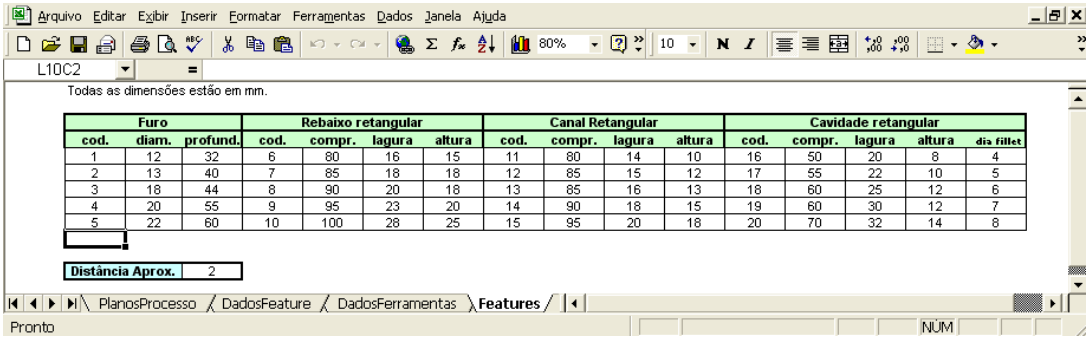
Assim, o programa foi desenvolvido para permitir ao usuário a alteração no nível dos fatores, e com isso criar diferentes ordens de produção, cabendo ao usuário definir os dados das *features*, ferramentas e máquinas antes de realizar a geração de uma ordem. Isso era realizado apenas uma vez porque esses dados eram armazenados nas planilhas como um banco de dados, portanto não eram alterados, já que as *features*, ferramentas e tipos de máquinas utilizadas foram as mesmas para todas as ordens de produção geradas.

Assim, para gerar uma ordem de produção era necessário que o usuário realizasse os cinco passos descritos a seguir.

---

[3] Uma Macro é um programa desenvolvido no editor VBA, existente no próprio aplicativo, que ao ser executada permite o envio de instruções para automatizar algumas tarefas (Dodge, 1998).

1º Passo – Cadastro das *features*: Inicialmente, o usuário necessitava cadastrar as *features*, relacionando cada *feature* com um código específico que será utilizado pelo programa, como mostra a Figura 4.1.



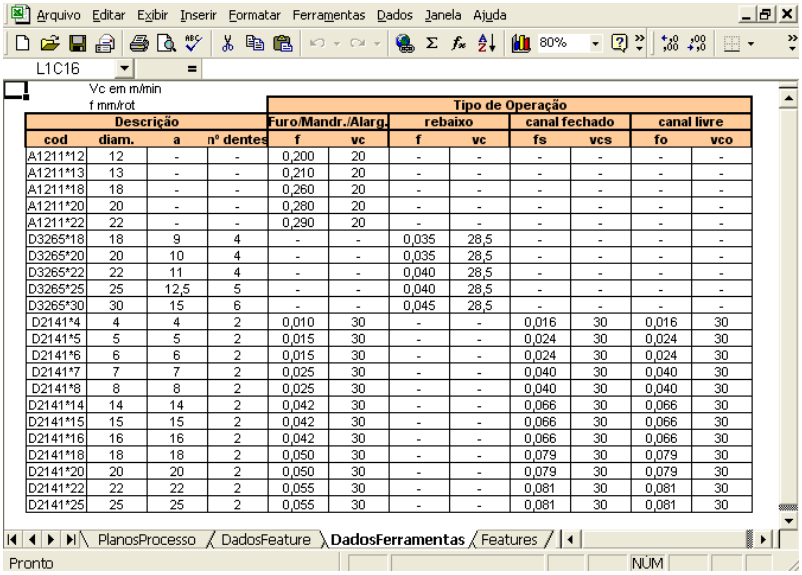
Todas as dimensões estão em mm.

Furo			Rebaixo retangular				Canal Retangular				Cavidade retangular				
cod.	diam.	profund.	cod.	compr.	lagura	altura	cod.	compr.	lagura	altura	cod.	compr.	lagura	altura	dia fillet
1	12	32	6	80	16	15	11	80	14	10	16	50	20	8	4
2	13	40	7	85	18	18	12	85	15	12	17	55	22	10	5
3	18	44	8	90	20	18	13	85	16	13	18	60	25	12	6
4	20	55	9	95	23	20	14	90	18	15	19	60	30	12	7
5	22	60	10	100	28	25	15	95	20	18	20	70	32	14	8

Distância Aprox. 2

Figura 4.1 - Planilha de edição de *features*

2º Passo – Cadastro das ferramentas: Depois disso é preciso que o usuário cadastre as ferramentas que serão utilizadas na usinagem de cada *feature*, informando suas características, como o diâmetro (mm) e/ou número de dentes, e suas respectivas condições de corte, tais como: profundidade de corte (mm), avanço (mm/rot.) e velocidade de corte (m/min.), como apresenta a Figura 4.2.

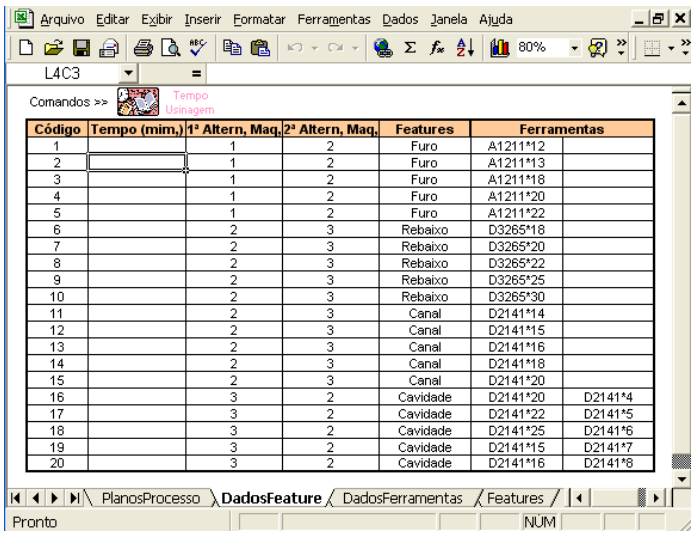


Vc em m/min
f mm/rot

Descrição				Tipo de Operação							
				Furo/Mandr./Alarg.		rebaixo		canal fechado		canal livre	
cod	diam.	a	nº dentes	f	vc	f	vc	fs	vcs	fo	vco
A1211*12	12	-	-	0,200	20	-	-	-	-	-	-
A1211*13	13	-	-	0,210	20	-	-	-	-	-	-
A1211*18	18	-	-	0,260	20	-	-	-	-	-	-
A1211*20	20	-	-	0,280	20	-	-	-	-	-	-
A1211*22	22	-	-	0,290	20	-	-	-	-	-	-
D3265*18	18	9	4	-	-	0,035	28,5	-	-	-	-
D3265*20	20	10	4	-	-	0,035	28,5	-	-	-	-
D3265*22	22	11	4	-	-	0,040	28,5	-	-	-	-
D3265*25	25	12,5	5	-	-	0,040	28,5	-	-	-	-
D3265*30	30	15	6	-	-	0,045	28,5	-	-	-	-
D2141*4	4	4	2	0,010	30	-	-	0,016	30	0,016	30
D2141*5	5	5	2	0,015	30	-	-	0,024	30	0,024	30
D2141*6	6	6	2	0,015	30	-	-	0,024	30	0,024	30
D2141*7	7	7	2	0,025	30	-	-	0,040	30	0,040	30
D2141*8	8	8	2	0,025	30	-	-	0,040	30	0,040	30
D2141*14	14	14	2	0,042	30	-	-	0,066	30	0,066	30
D2141*15	15	15	2	0,042	30	-	-	0,066	30	0,066	30
D2141*16	16	16	2	0,042	30	-	-	0,066	30	0,066	30
D2141*18	18	18	2	0,050	30	-	-	0,079	30	0,079	30
D2141*20	20	20	2	0,050	30	-	-	0,079	30	0,079	30
D2141*22	22	22	2	0,055	30	-	-	0,081	30	0,081	30
D2141*25	25	25	2	0,055	30	-	-	0,081	30	0,081	30

Figura 4.2 - Planilha para o cadastro de ferramentas

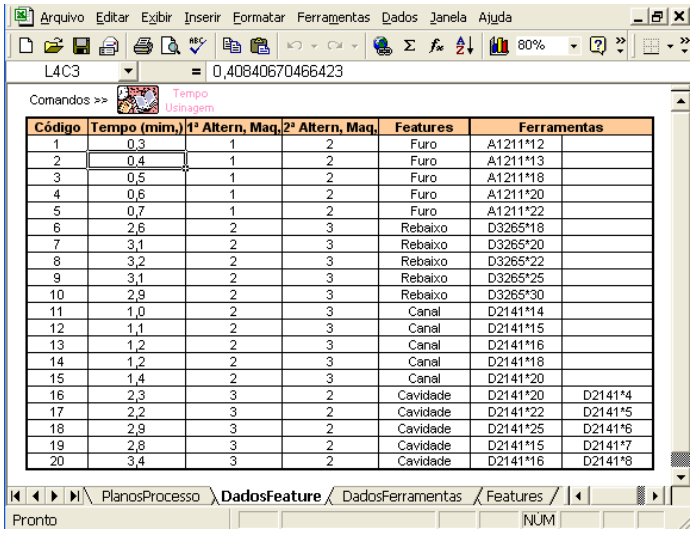
3º Passo – Cadastro das máquinas: Em seguida é preciso que o usuário cadastre as máquinas que irão usinar as *features* cadastradas e relacione cada ferramenta a uma dessas *features*, tal como mostra a Figura 4.3.



Código	Tempo (mim,)	1ª Altern, Maq,	2ª Altern, Maq,	Features	Ferramentas	
1		1	2	Furo	A1211*12	
2		1	2	Furo	A1211*13	
3		1	2	Furo	A1211*18	
4		1	2	Furo	A1211*20	
5		1	2	Furo	A1211*22	
6		2	3	Rebaixo	D3265*18	
7		2	3	Rebaixo	D3265*20	
8		2	3	Rebaixo	D3265*22	
9		2	3	Rebaixo	D3265*25	
10		2	3	Rebaixo	D3265*30	
11		2	3	Canal	D2141*14	
12		2	3	Canal	D2141*15	
13		2	3	Canal	D2141*16	
14		2	3	Canal	D2141*18	
15		2	3	Canal	D2141*20	
16		3	2	Cavidade	D2141*20	D2141*4
17		3	2	Cavidade	D2141*22	D2141*5
18		3	2	Cavidade	D2141*25	D2141*6
19		3	2	Cavidade	D2141*15	D2141*7
20		3	2	Cavidade	D2141*16	D2141*8

Figura 4.3 - Planilha para o cadastramento de máquinas

<u>4º Passo – Cálculo do tempo de usinagem:</u> Isso permite o usuário obter os tempos de usinagem para cada *feature* acionando com um clique o botão “Tempo Usinagem”, em destaque na parte superior da planilha, de acordo com a Fig. 4.4. Esses tempos de usinagem são calculados com base nos dados fornecidos para cada ferramenta cadastrada, admitindo a hipótese de que as máquinas selecionadas dispõem de potência suficiente para fornecer as condições de corte definidas para as ferramentas. O cálculo do tempo é realizado de acordo com as expressões apresentadas no trabalho de Ferreira e Wysk (2001a).



Código	Tempo (mim,)	1ª Altern, Maq,	2ª Altern, Maq,	Features	Ferramentas	
1	0,3	1	2	Furo	A1211*12	
2	0,4	1	2	Furo	A1211*13	
3	0,5	1	2	Furo	A1211*18	
4	0,6	1	2	Furo	A1211*20	
5	0,7	1	2	Furo	A1211*22	
6	2,6	2	3	Rebaixo	D3265*18	
7	3,1	2	3	Rebaixo	D3265*20	
8	3,2	2	3	Rebaixo	D3265*22	
9	3,1	2	3	Rebaixo	D3265*25	
10	2,9	2	3	Rebaixo	D3265*30	
11	1,0	2	3	Canal	D2141*14	
12	1,1	2	3	Canal	D2141*15	
13	1,2	2	3	Canal	D2141*16	
14	1,2	2	3	Canal	D2141*18	
15	1,4	2	3	Canal	D2141*20	
16	2,3	3	2	Cavidade	D2141*20	D2141*4
17	2,2	3	2	Cavidade	D2141*22	D2141*5
18	2,9	3	2	Cavidade	D2141*25	D2141*6
19	2,8	3	2	Cavidade	D2141*15	D2141*7
20	3,4	3	2	Cavidade	D2141*16	D2141*8

Figura 4.4 - Planilha de seleção de máquinas com o cálculo do tempo usinagem

<u>5 Passo – Geração da ordem de produção:</u> De posse dos dados obtidos nos passos anteriores, é possível gerar as ordens de acordo com o nível definido para os fatores relacionados à peça, tais como: *features* por peça, *features* duplicadas e quantidade do lote. Assim, inicialmente a planilha “PlanoProcesso” está vazia, pois o nível desses fatores ainda não foi definido. Isso era realizado por meio da janela “Dados do Experimento”, exibida

quando o ícone “Gerar Peça” era acionado, como mostrado na Fig. 4.5. Dessa forma, todos os passos anteriores foram realizados uma única vez, enquanto este passo era realizado sempre que se desejava alterar o nível de um dos fatores relacionados a peça.

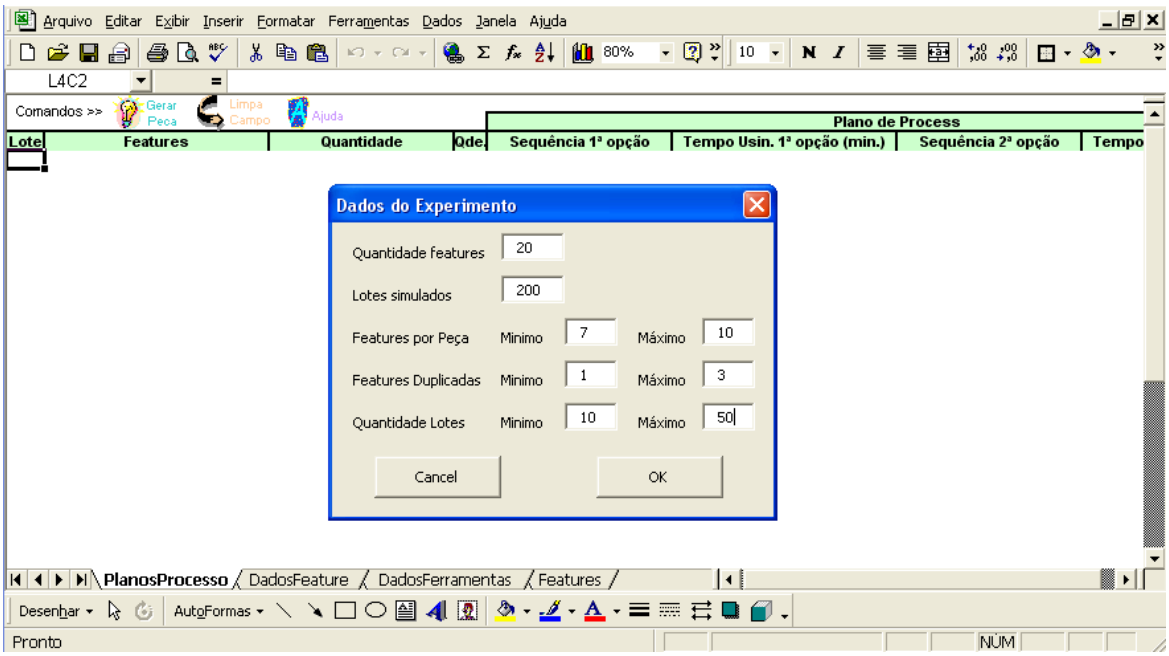


Figura 4.5 - Janela para aquisição dos dados do experimento

Nessa janela, o campo “Quantidade *Features*” permite ao usuário selecionar a quantidade de *features* que deseja utilizar para a geração das pecas. Como visto anteriormente neste trabalho foram cadastradas vinte *features* diferentes (1º Passo), divididas em quatro tipos. Isso define a quantidade máxima de *features* utilizadas na geração das peças. Assim, nesse campo é possível definir uma quantidade de *features* menor ou igual à quantidade de *features* cadastradas, para ser utilizada na geração das peças.

Já o campo “Quantidade Lotes” define a quantidade de ordens de produção que serão geradas pelo sistema. Assim, se o usuário deseja simular a fabricação de 500 lotes, ele deverá informar este valor no campo “Quantidade de Lotes”. Neste trabalho foram geradas 200 ordens, o que corresponde à maior quantidade de ordens consideradas para o nível alto do fator lotes simulados.

Os três campos seguintes definem o nível para os fatores f*eatures* por peça, f*eatures* duplicadas e quantidade do lote, respectivamente. Cada fator dispõe de dois campos, onde é possível definir a faixa de variação de cada nível em baixo e alto. Por exemplo, supondo que se deseja gerar ordens cujo fator quantidade do lote esteja no nível baixo, a quantidade mínima será 10 lotes e a quantidade máxima 50 lotes, portanto estes valores deverão ser introduzidos nos campos “Mínimo” e “Máximo”, respectivamente, do campo “Quantidade lote”. O mesmo procedimento deverá ser realizado para os outros dois fatores.

Após inserir os valores desejados em todos os campos da janela “Dados do Experimento”, o usuário aciona com um clique o botão “OK”. Este botão inicia o processo de geração das ordens, e com isso os valores inseridos nos campos da janela “Dados do Experimento” são lidos pelo programa, e a ordem de fabricação é gerada, tal como mostra a Fig. 4.6. O procedimento para a geração das ordens pelo programa é apresentado no item seguinte.

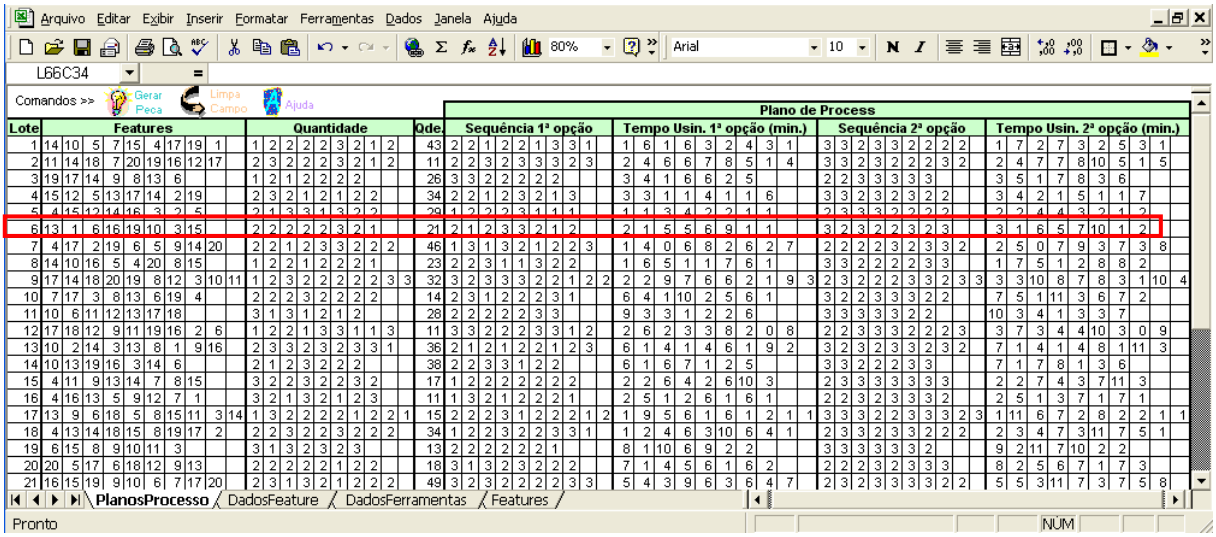


Figura 4.6 - Planilha com a ordem de produção gerada

4.2.3 Procedimento para geração de ordens

O procedimento utilizado pelo programa para a geração das ordens de fabricação é mostrado por meio do fluxograma apresentado na Fig. 4.7.

Inicialmente são obtidos os dados do experimento definidos pelo usuário na janela “Dados do Experimento” (Fig. 4.5), o que permite definir aleatoriamente o número de *features* por peça, porém dentro do intervalo escolhido no campo “*Features* por Peça”. Em seguida são geradas aleatoriamente as *features* que irão compor a peça. Para isso são gerados números aleatórios diferentes entre si no intervalo de um até o valor definido no campo “Quantidade de *Features*”. A esses números estão associados os códigos definidos pelo usuário no cadastro das *features*.

A próxima etapa consiste na definição da quantidade de cada *feature* gerada, e isso é feito gerando-se números aleatórios dentro do intervalo definido pelo campo “*Features* duplicadas”. Assim, para cada *feature* é gerado um número aleatório dentro do intervalo definido pelo nível desse fator, que corresponde aos número de duplicações daquela *feature* na peça.

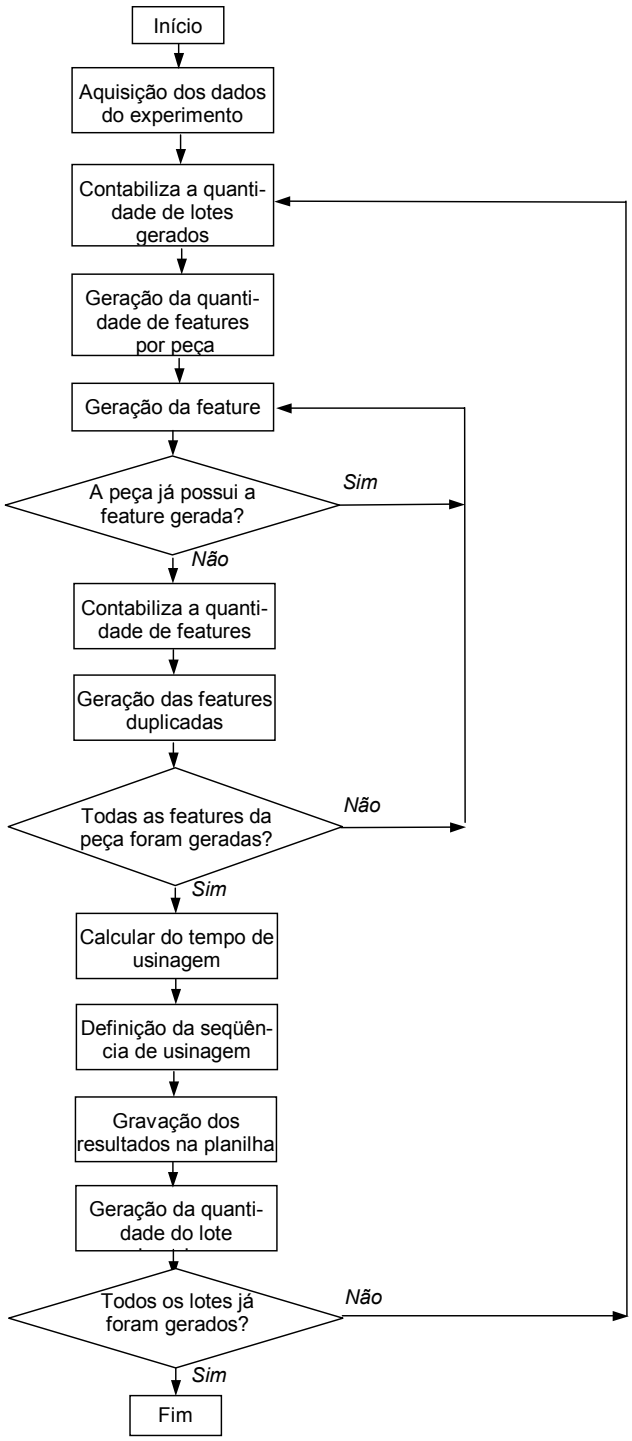


Figura 4.7 - Fluxograma de geração de ordens de produção

Em seguida uma função calcula o tempo de usinagem para cada uma das *features* geradas, e isso é realizado utilizando-se as informações cadastradas no banco de dados de *features* e de ferramentas. Já a seqüência de máquinas para a fabricação de cada *feature* corresponde às máquinas cadastradas (3º passo) para a fabricação de cada *feature* na mesma seqüência em que elas foram geradas, e conseqüentemente a seqüência de fabricação das *features* também é aleatória. Nessas duas etapas (isto é, cálculo do tempo e seqüência de máquinas), como ainda não foi definido o tipo de plano a ser utilizado no

sistema de manufatura, são considerados ambos os tipos de planos. Logo, os tempos calculados e a seqüência são definidos para duas circunstâncias.

Assim, tem-se as *features* que irão compor a peça, bem como suas quantidades, restando apenas a definição da quantidade do lote. Isso é realizado gerando-se números aleatórios entre os valores “Mínimo” e “Máximo” definidos para o fator “Quantidade do lote”.

Todas as etapas anteriores são realizadas para gerar cada lote. Desse modo, todo o procedimento é repetido até que a quantidade de lotes gerados atinja a quantidade de lotes definida no campo “Quantidade Lote”. Assim, uma ordem é formada por vários lotes com uma mesma combinação de níveis dos seguintes fatores: *features* por peça, *features* duplicadas, quantidade do lote e lotes simulados. Ao final do processo, a ordem de produção para cada lote gerado é armazenada na planilha “Ordens de produção”, tal como indica a Fig. 4.6, onde os atributos de um dos lotes gerados são mostrados em destaque.

A primeira coluna indica o número do lote, o qual serve apenas como uma referência para identificar cada lote gerado. Na coluna seguinte tem-se o código das *features* geradas, logo para cada código estão associadas as *features* cadastradas. A coluna “Quantidade” indica a quantidade de duplicações para cada *feature*, onde a posição de uma determinada quantidade está relacionada a uma posição idêntica das *features* geradas. Por exemplo, para o lote número 6, destacado na Fig. 4.6, a *feature* 13 está presente 2 vezes, a *feature* 1 esta presente 2 vezes, a *feature* 6 está presente 2 vezes, e assim por diante. Uma possível peça gerada a partir desses atributos é mostrada na Fig. 4.8. Logo, as *features* que compões a peça foram geradas na coluna “*Features*”, de acordo com suas respectivas quantidades definidas na coluna “Quantidades”.

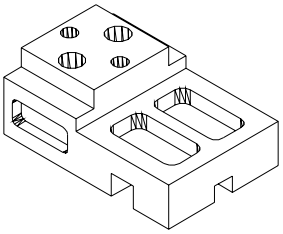


Figura 4.8 - Peça gerada de acordo com os atributos da ordem de produção

Na coluna “Qde.” é indicada a quantidade do lote para uma determinada peca. Por exemplo, para o lote 6, a quantidade do lote é de 21 peças. As colunas seguintes estão relacionadas ao processo, mais especificamente com o tempo e a seqüência de usinagem.

A seqüência e o tempo de usinagem para cada *feature* gerada estão dispostos de forma seqüencial. Por exemplo, considerando a peça 6, composta das seguintes *features*: 13, 1, 6, 16, 19, 20, 3, e 15, e considerando que a usinagem seja realizada na máquina selecionada como primeira opção, as máquinas especificadas na seqüência para a usinagem de cada uma dessas *features* é a seguinte: 2, 1, 2, 3, 3, 2, 1 e 2, respectivamente, já tempos de usinagem arredondados (em minutos) para a correspondem a 2, 1, 5, 5, 6, 9, 1 e 1 respectivamente. No caso da segunda opção, tem-se para as mesmas *features* a seqüência

de usinagem composta das seguintes máquinas: 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2 e 3, respectivamente, e os seguintes tempos de usinagem: 3, 1, 6, 5, 7, 10, 1 e 2, respectivamente. que embora a exibição dos tempos de usinagem na planilha não mostre as casas decimais, as mesmas são consideradas internamente pelo Excel. É importante mencionar que na seqüência de usinagem apresentada, as máquinas 1, 2 e 3 correspondem a furadeira, fresadora e centro de usinagem, respectivamente.

Para cada combinação de fatores foi gerada uma planilha com as ordens de produção referente àquela combinação, de modo que a planilha obtida em cada combinação de fatores era gravada em um arquivo diferente. No entanto, antes de gerar uma nova combinação de fatores, era executada a função “Limpa Campos”, a qual apagava todos dados da planilha gerados pela combinação anterior, permitindo que uma nova combinação fosse gerada. Após gerar as ordens de produção para a combinação de todos os níveis dos fatores definidos para o experimento, era realizada a simulação no modelo desenvolvido no programa Arena.

4.3 Simulação do sistema de manufatura

A modelagem de um sistema no Arena® compreende os seguintes etapas:

- determinação da lógica do sistema;
- atribuição dos dados ao modelo;
- execução da simulação.

Cada uma dessas etapas será descrita nos itens seguintes.

4.3.1 Determinação da lógica do sistema

A determinação da lógica do sistema possibilita a representação do mesmo utilizando os módulo disponíveis nas templates[4] do Arena®. Desse modo, a lógica simplificada da simulação é apresentada na Fig. 4.9, utilizando-se um fluxograma.

Inicialmente eram definidos os dados da simulação pelo usuário, tais como a quantidade de lotes simulados, o tipo de plano e a localização dos arquivos de dados e resultados. Em seguida eram definidas algumas condições inicias da simulação, como a inicialização das variáveis de estado (número de lotes no sistema, estoque em processo, produtividade, utilização dos recursos, tempo de chegada do próximo lote, etc.) e algumas constantes (tempo de *set-up*, tempo de transporte,etc.).

[4] Uma descrição mais detalhada desse processo se encontra no item 2.5.4.

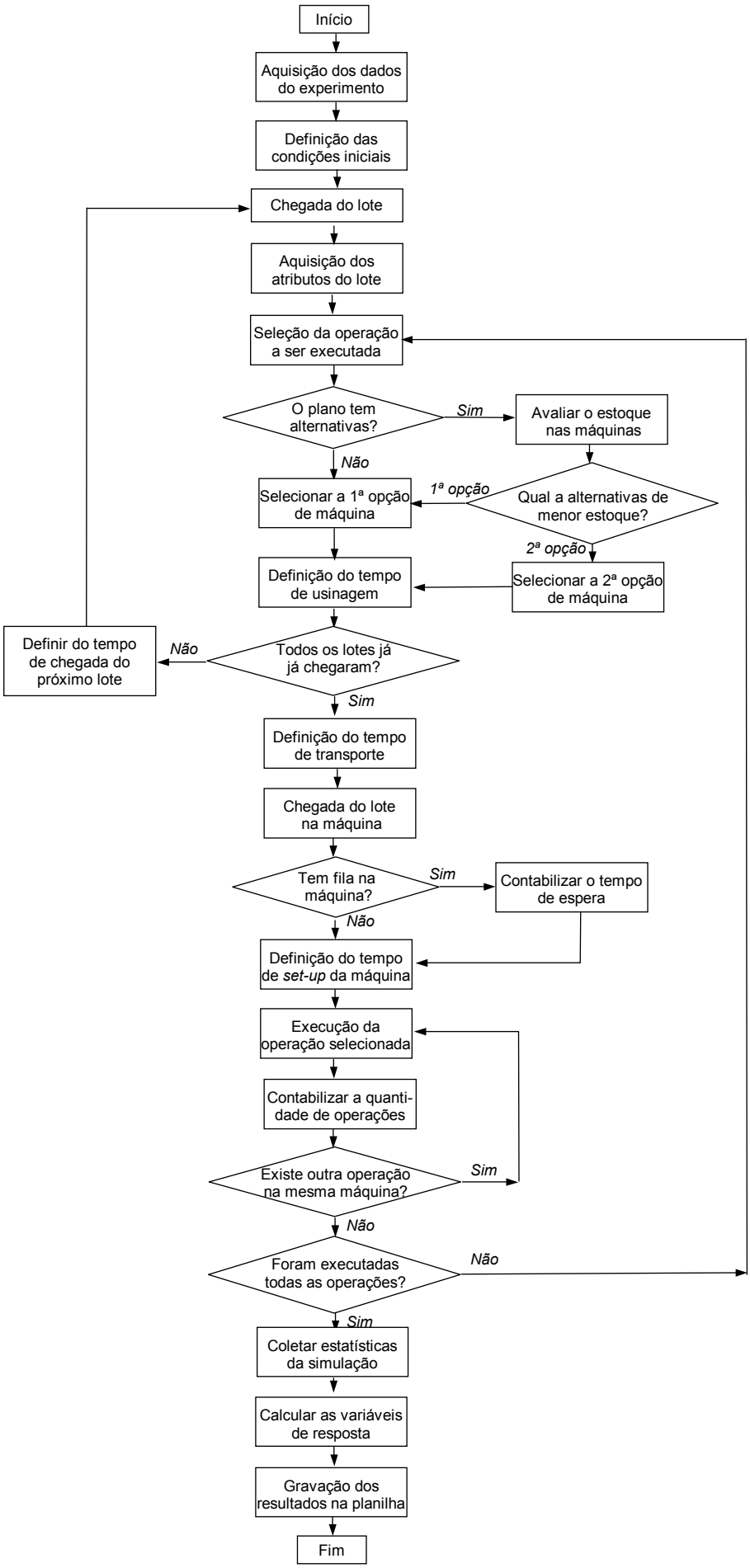


Figura 4.9 - Fluxograma do modelo de simulação

A chegada de um lote é o evento que inicia o processo de simulação do sistema, já que o tempo para a chegada do primeiro lote é igual a zero. Logo, tendo em vista que os lotes de peças a serem utilizados na simulação já foram definidos na etapa anterior, era necessário que o modelo de simulação pudesse reproduzir as características desejadas do comportamento do sistema de acordo com o lote a ser produzido, para o qual foi definida uma combinação de níveis dos fatores que se desejava avaliar. Assim, era necessário que o modelo diferenciasse cada lote quanto ao tipo de *features* das peças, o número de *features* por peça, o número de *features* duplicadas e quantidade do lote. Isso foi realizado a partir do arquivo de ordens gerado no Excel.

Em seguida, de acordo com as *features* existentes em cada lote, eram definidas as operações a serem executadas. A partir das operações já é possível definir as máquinas para fabricação do lote, porém antes era necessário verificar o tipo de plano que havia sido definido pelo usuário. Caso fosse um plano sem alternativas, era seleciona a máquina definida como primeira opção para usinagem da *feature*. Por outro lado,caso o plano tivesse alternativas, era levado em conta o estoque em processo para seleção da máquina. Desse modo, se a primeira opção de máquina para a usinagem da *feature* possuía um estoque em processo menor ou igual ao da segunda opção, era selecionada a primeira opção. Do contrário, a segunda opção seria preferida para a usinagem da *feature*.

A próxima etapa era determinar o tempo de usinagem, a qual era realizada considerando o tipo de plano, já que no plano de processo com alternativas existe uma penalidade associada à escolha da segunda opção de máquina, como já foi discutido no capítulo 3.

O tempo de chegada do próximo lote foi definido em função do tempo de usinagem do lote anterior. Depois disso, o tempo de usinagem era somado ao tempo de transporte. Nesse caso, onde ainda não foi realizada nenhuma operação no lote, o tempo de transporte está associado à chegada da matéria-prima na máquina. Caso já houvesse sido realizada outra operação, esse tempo seria considerado como o tempo para o deslocamento do lote entre duas máquinas.

Embora a princípio todos os recursos foram considerados disponíveis, antes de se realizar a operação selecionada era verificada a existência de estoques em processo nos recursos. Caso não houvesse estoque em processo, a operação era realizada imediatamente. Do contrário, era contabilizado o tempo que o lote permanecia estocado até o início da sua usinagem. Antes de se iniciar a usinagem do lote, era definido o tempo de *set-up* de acordo com a máquina utilizada.

O lote só deixava a máquina selecionada caso não houvesse mais nenhuma operação a ser realizada na máquina atual. No caso do plano de processo com alternativas, antes de o lote deixar a máquina, era verificada a possibilidade da segunda opção de máquina para a próxima operação ser igual à máquina atual. Isso era realizando comparando-se o estoque em processo no recurso selecionado para a próxima operação (primeira opção de máquina)

com o recurso em questão (segunda opção de máquina). Caso a segunda opção de máquina selecionada para a próxima operação fosse igual à máquina atual, era avaliado o estoque em processo no recurso definido como segunda opção de máquina. Caso o estoque em processo no recurso selecionado como primeira opção de máquina para a execução da próxima operação fosse igual a zero, o lote era deslocado para esse recurso. Caso contrário, isto é, o estoque em processo fosse nulo, a operação seria realizada na máquina atual, e desse modo seria obtido um ganho com a redução do número *set-ups*, pois o *set-up* não será realizado novamente.

Ao final de todas as operações era verificado se ainda existia mais alguma operação a ser realizada. Caso houvesse, uma nova operação era secionada de acordo com a seqüência definida na planilha de geração da ordem. Caso não houvessem mais operações a serem executadas, o lote deixava o sistema, e suas estatísticas eram coletadas, tais como: ao tempo de espera, tempo de entrada no sistema, tempo de saída, etc. Assim, as variáveis de desempenho eram calculadas baseadas nessas estatísticas, para serem então gravadas num arquivo previamente preparado no Excel para armazenar os resultados.

Tradicionalmente a lógica de um sistema é representada no Arena® apenas por meio dos módulos disponíveis em cada *template*. No entanto, como o modelo neste trabalho possui um nível de detalhamento maior que o usual e algumas rotinas específicas, foi necessário o uso de um programa auxiliar em Visual Basic®, já que o Arena® permite a integração com essa linguagem. Assim, o modelo foi desenvolvido utilizando alguns módulos já existentes, sendo que algumas variáveis nesses módulos eram geradas por um programa auxiliar.

4.3.2 Atribuição dos dados ao modelo

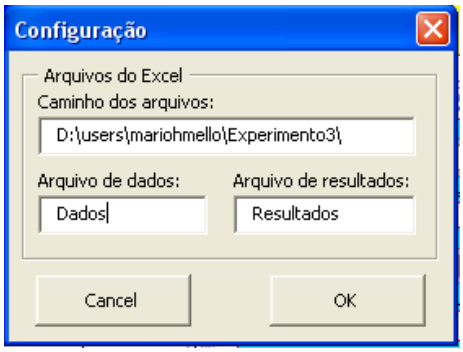
Os dados do modelo foram classificados em três tipos: dados fixos, dados variáveis e dados mistos. Os dados fixos permaneciam os mesmos para todas as combinações de fatores simuladas, enquanto os dados variáveis são aqueles que necessitavam ser alterados pelo usuário a cada nova combinação de fatores simulada. Os dados mistos são determinados programa auxiliar em Visual Basic® em função dos dados variáveis.

Os dados fixos são: tempo de chegada do primeiro lote, tempo de *set-up*, tempo de transporte e quantidade de replicações. Enquanto os dados variáveis são: tipo de plano, quantidade de lotes simulados e a média do tempo para quebra de máquina. Por fim, alguns exemplos de dados mistos são: tempo de chegada, tempo de fabricação, seqüência de fabricação, entre outros.

Os dados fixos foram definidos utilizando os módulos e funções já disponíveis no Arena®, enquanto os dados variáveis eram definidos pelo usuário a partir de uma janela associada ao programa auxiliar, exibida no início de cada simulação como mostra a Fig. 4.10. Quanto aos dados mistos, os mesmos eram atribuídos aos módulos e funções por

meio de variáveis, cujos valores eram definidos pelo programa auxiliar com base nos dados definidos pelo usuário na janela de aquisição de dados (dados variáveis).

(a) Janela de dados da simulação



(b) Janela de configuração

Figura 4.10 – Janelas de aquisição de dados variáveis

Na Fig. 4.10a o usuário define os dados da simulação, correspondente ao nível dos fatores lotes simulados e tipo de plano. Na Fig. 4.10b o usuário define a localização dos arquivos de dados (leitura das ordens de fabricação) e resultados (gravação dos resultados). A execução da simulação, discutida no próximo item, é realizada após um clique no botão "OK" da janela de dados.

4.3.3 Execução da simulação

Cada simulação era realizada a partir do arquivo de dados, contendo as ordens de fabricação geradas no item anterior. Assim, para um total de três fatores (*features* por peça, *features* duplicadas e quantidade do lote) relacionados à geração da ordem, e duas penalidades consideradas, tem-se um total de 2^3 x 2 = 16 arquivos diferentes, sendo que cada arquivo continha uma determinada combinação de fatores e penalidades. A execução da simulação para cada combinação de fatores durava entre 20 a 120 segundos, dependendo da complexidade do lote. Logo, considerando uma média de 70 segundos para a execução de cada simulação, e levando-se em conta a combinação dos quatro fatores remanescentes (tempo de chegada, lotes simulados, quebra de máquina, tipo de plano) tem-se 2^4 = 32 experimentos em cada um dos dois sistemas de manufatura (balanceado e desbalanceado). Isso equivale a um tempo total de simulação igual a 16 x 70 x 32 x 2 = 71680 segundos, ou seja, aproximadamente 20 horas de simulação. O computador utilizado para execução das simulações dispunha de um processador Intel® Pentium IV com 2,0 GHz e CPU de 512 MB de RAM.

Ao final da simulação os resultados obtidos para as variáveis de desempenho eram gravados em uma planilha previamente preparada no Excel, e essa planilha é mostrada na Fig. 4.11. Verifica-se nesta planilha que são mostrados os resultados para cada combinação de fatores, bem como os resultados para cada replicação.

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

L11C3 = -

Arquivo	Penalidade	Tempo de Chegada	Quebra de máquina	Lotes Simulados	Quant. do lote	Features Duplicadas	Features por peça	Tipo de Plano	Produtividade			Média	Estoque em processo			Média	Taxa de Utilização		
A1	-	-	-	-	-	-	-	-	17,85	18,32	19,64	18,60	311,95	326,79	293,51	310,75	52,68	51,06	55,86
A1	-	-	-	-	-	-	-	+	18,89	17,90	19,85	18,88	253,29	225,72	244,88	241,30	54,40	50,64	51,79
A2	-	-	-	-	-	-	+	-	4,25	3,95	3,83	4,01	245,25	243,30	299,48	262,68	59,09	59,05	55,46
A2	-	-	-	-	-	-	+	+	4,09	4,28	4,12	4,16	347,03	357,78	264,15	322,99	62,49	65,89	65,04
A3	-	-	-	-	-	+	-	-	4,80	4,66	4,41	4,62	244,88	248,68	264,02	252,53	59,00	57,23	54,92
A3	-	-	-	-	-	+	-	+	4,50	4,76	4,03	4,43	236,86	211,57	250,50	232,98	60,31	56,94	52,54
A4	-	-	-	-	-	+	+	-	1,14	1,19	1,12	1,15	264,39	242,04	313,39	273,27	67,63	67,26	64,86
A4	-	-	-	-	-	+	+	+	1,03	0,94	1,13	1,03	242,57	213,09	291,43	249,03	68,87	69,72	69,50
A5	-	-	-	-	+	-	-	-	17,79	20,12	20,67	19,53	2255,44	1515,19	2411,29	2060,64	62,28	61,74	70,59
A5	-	-	-	-	+	-	-	+	15,52	19,48	17,60	17,53	2389,54	2001,45	2347,81	2246,27	57,64	56,65	63,99
A6	-	-	-	-	+	-	+	-	4,78	4,66	4,70	4,71	2557,35	2238,47	2067,63	2287,81	59,54	62,16	61,44
A6	-	-	-	-	+	-	+	+	4,04	4,23	4,64	4,31	3540,98	2956,40	3358,49	3285,29	68,24	69,16	69,94
A7	-	-	-	-	+	+	-	-	4,40	4,49	4,31	4,40	2355,46	2550,81	2360,84	2422,37	65,07	66,46	63,13
A7	-	-	-	-	+	+	-	+	4,31	4,16	4,17	4,21	2913,89	2498,51	2337,57	2583,32	67,53	65,29	62,28
A8	-	-	-	-	+	+	+	-	1,16	1,17	1,19	1,17	3911,54	3169,61	3893,22	3658,12	65,64	67,02	71,47
A8	-	-	-	-	+	+	+	+	1,14	1,00	1,12	1,08	4044,59	2313,64	3926,04	3428,09	70,43	69,42	72,26
A9	-	-	-	+	-	-	-	-	18,19	18,30	18,32	18,27	1225,69	1154,25	1213,55	1197,83	60,60	64,22	62,68
A9	-	-	-	+	-	-	-	+	16,82	17,59	15,99	16,80	1077,93	1064,94	1105,93	1082,93	62,22	59,09	57,04
A10	-	-	-	+	-	-	+	-	4,53	4,63	4,58	4,58	1348,45	1590,59	1437,00	1458,68	63,50	65,04	62,57
A10	-	-	-	+	-	-	+	+	4,67	4,57	4,57	4,60	1400,49	1496,43	1513,52	1470,15	68,58	69,39	68,06
A11	-	-	-	+	-	+	-	-	5,07	5,31	5,47	5,28	952,73	834,11	896,19	894,34	64,54	68,69	66,67
A11	-	-	-	+	-	+	-	+	4,91	4,93	5,04	4,96	1053,50	1034,79	805,15	964,48	65,99	64,51	61,12
A12	-	-	-	+	-	+	+	-	1,21	1,11	1,14	1,15	892,85	937,56	999,01	943,14	64,82	62,23	62,41
A12	-	-	-	+	-	+	+	+	1,15	1,14	1,05	1,11	1228,81	1272,59	808,98	1103,46	71,43	70,97	72,49

ResultadosSimulac

Pronto NUM

Figura 4.11 - Planilha de resultados da simulação

Na primeira coluna é mostrado o arquivo de dados utilizado na simulação, pois na geração das ordens de fabricação para cada combinação de fatores foi gravada em um arquivo diferente. Ns demais colunas, o sinal “-“ indica um nível baixo para os fatores considerados, enquanto o sinal “+” representa o nível alto. Deve-se mencionar que a penalidade não foi considerada um fator no experimento, porém o sinal “-“, nessa coluna indica que uma penalidade baixa foi utilizada, a qual corresponde a uma penalidade de 20%. Em seguida, são apresentados as colunas dos fatores: tempo de chegada, quebra de máquina, lotes simulados, quantidade do lote, *features* duplicadas, *features* por peça e tipo de plano. As colunas seguintes indicam os valores obtidos para as variáveis de resposta consideradas (produtividade, estoque em processo e taxa de utilização) em cada uma das três replicações realizadas.

CAPÍTULO 5
RESULTADOS

Os resultados obtidos na simulação, bem como as análises desses resultados, serão apresentadas neste capítulo. Inicialmente serão apresentados os gráficos dos principais efeitos nas variáveis de resposta, cuja análise visa evidenciar os efeitos mais relevantes. Em seguida são mostrados os gráficos de interação entre dois fatores, com o intuito de analisar as interações existentes e sua magnitude. Por último, é apresentada a análise de variância (ANOVA), para possibilitar a confirmação das análises realizadas a partir dos gráficos de efeito e interação, e a constatação de outras interações significativas.

5.1 Resultados da simulação

Cada um dos sistemas de manufatura, balanceado e desbalanceado, foi simulado em dois níveis diferentes de penalidade. Isto é, considerou-se duas penalidades diferentes atuando sobre o tempo de usinagem quando uma alternativa era utilizada, no caso do plano de processo com alternativas. O valor das penalidades corresponde a um acréscimo de 20% e 40% no tempo de usinagem, respectivamente.

Após a execução da simulação de cada um desses cenários, os resultados obtidos foram armazenados numa planilha, a qual relaciona os níveis de cada fator e suas respectivas variáveis de resposta. Alguns desses resultados, para o sistema de manufatura balanceado sujeito à penalidade de 20%, são mostrados na Tabela 5.1, enquanto uma outra planilha parcial, incluindo outras combinações de níveis dos fatores, é apresentada no Apêndice I.

Tabela 5.1 – Alguns resultados da simulação do sistema balanceado

Tempo de chegada	Quebra de máquina	Lotes simulados	Qde. do lote	*Features* duplicadas	*Features* por peça	Tipo de plano	Produtividade (pçs/h)	Estoque (pçs)	Utilização (%)
-	-	-	-	-	-	-	17,85	312,00	52,68
-	-	-	-	-	-	+	18,89	253,30	54,40
-	-	-	-	-	+	-	4,25	245,30	59,09
-	-	-	-	-	+	+	4,09	347,00	62,49
-	-	-	-	+	-	-	4,80	244,90	59,00
-	-	-	-	+	-	+	4,50	236,90	60,31
-	-	-	-	+	+	-	1,14	264,40	67,63
-	-	-	-	+	+	+	1,03	242,60	68,87
-	-	-	+	-	-	-	17,79	2255,40	62,28
-	-	-	+	-	-	+	15,52	2389,50	57,64
-	-	-	+	-	+	-	4,78	2557,40	59,54
-	-	-	+	-	+	+	4,04	3541,00	68,24
-	-	-	+	+	-	-	4,40	2355,50	65,07
-	-	-	+	+	-	+	4,31	2913,90	67,53
-	-	-	+	+	+	-	1,16	3911,50	65,64
-	-	-	+	+	+	+	1,14	4044,60	70,43

Para possibilitar uma comparação entre os efeitos da variação do nível de cada fator, foram gerados gráficos dos principais efeitos para cada uma das variáveis de resposta utilizando o aplicativo Minitab®. Esses gráficos estão dispostos numa mesma escala, para facilitar sua comparação. Os gráficos mostrados nas Fig. 5.1, 5.2, 5.3 referem-se ao sistema de manufatura balanceado com penalidade de 20%, enquanto os gráficos apresentados nas Fig. 5.4, 5.5 e 5.6 referem-se ao mesmo sistema, porém com penalidade de 40%. Já os gráficos apresentados nas Fig. 5.7, 5.8 e 5.9 referem-se ao sistema desbalanceado com penalidade de 20%, ao passo que os gráficos das Fig. 5.10, 5.11 e 5.12 são relativos ao mesmo sistema com penalidade de 40%.

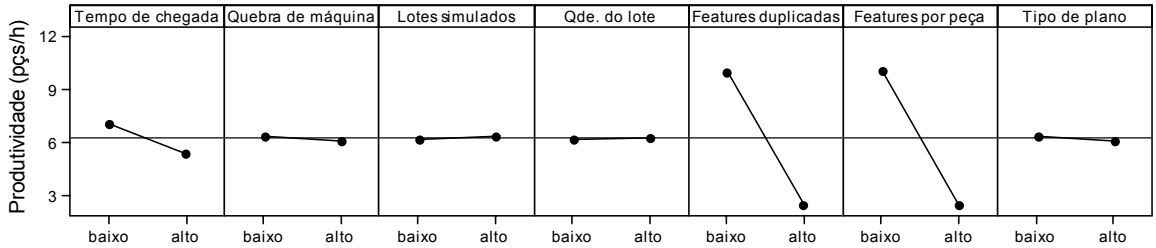


Figura 5.1- Efeitos na produtividade do sistema balanceado (penalidade de 20%)

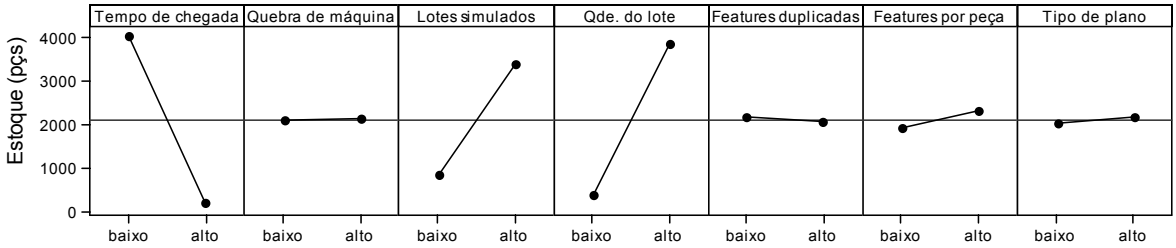


Figura 5.2 - Efeitos no estoque em processo do sistema balanceado (penalidade de 20%)

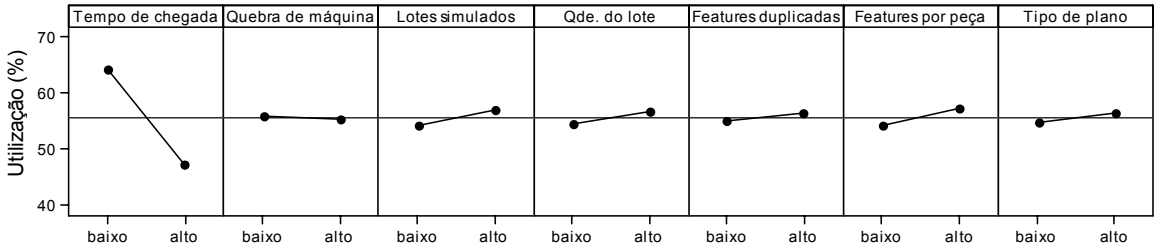


Figura 5.3 - Efeitos na utilização dos recursos do sistema balanceado (penalidade de 20%)

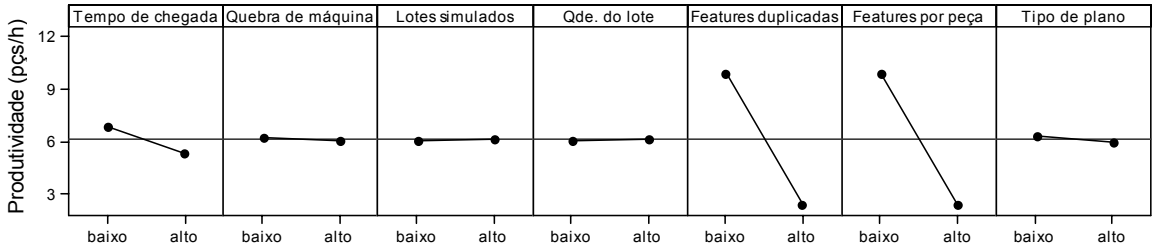


Figura 5.4 - Efeitos na produtividade do sistema balanceado (penalidade de 40%)

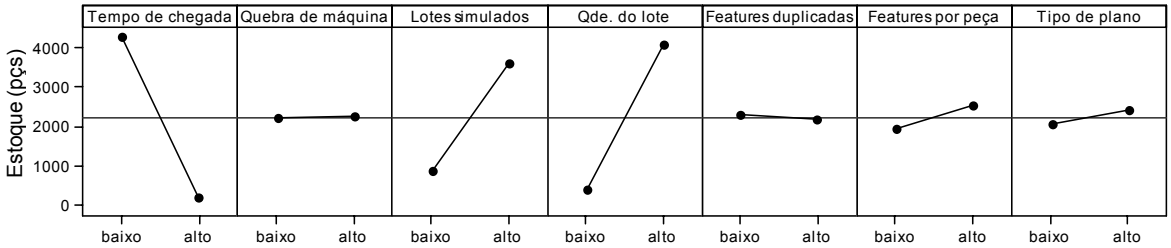


Figura 5.5 - Efeitos no estoque em processo do sistema balanceado (penalidade de 40%)

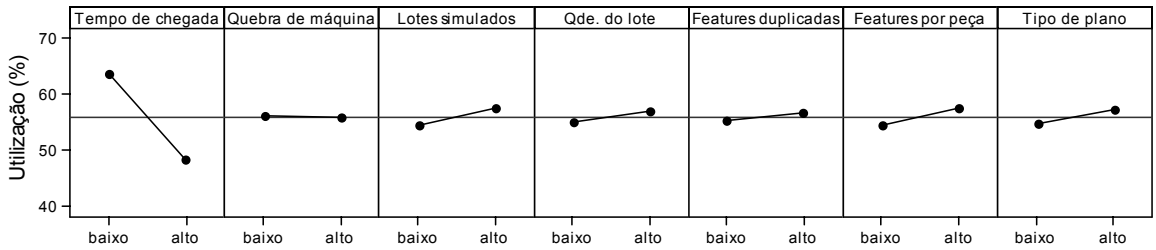


Figura 5.6 - Efeitos na utilização dos recursos do sistema balanceado (penalidade de 40%)

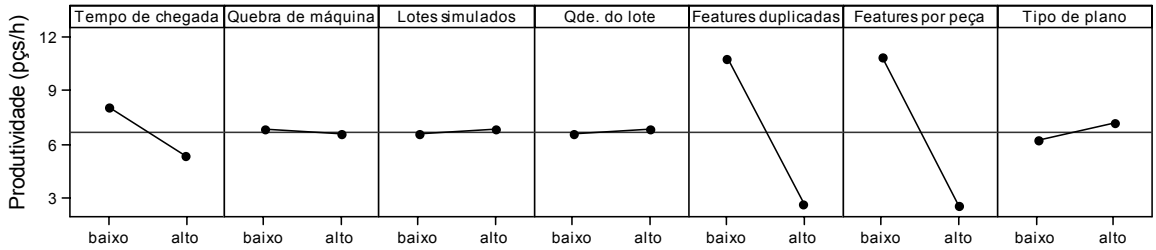


Figura 5.7 - Efeitos na produtividade do sistema desbalanceado (penalidade de 20%)

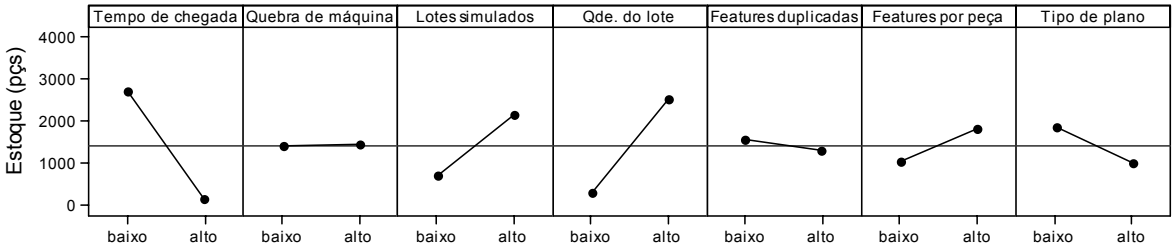


Figura 5.8 - Efeitos no estoque em processo do sistema desbalanceado (penalidade de 20%)

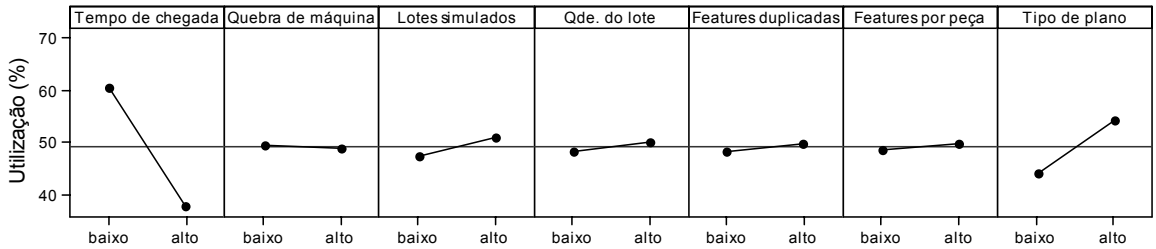


Figura 5.9 - Efeitos na utilização dos recursos do sistema desbalanceado (penalidade de 20%)

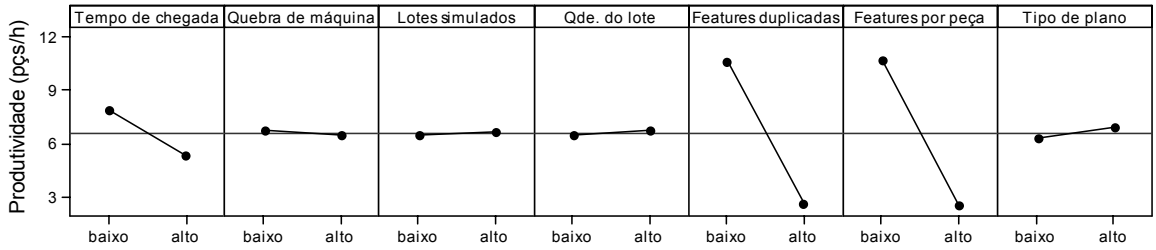


Figura 5.10 - Efeitos na produtividade do sistema desbalanceado (penalidade de 40%)

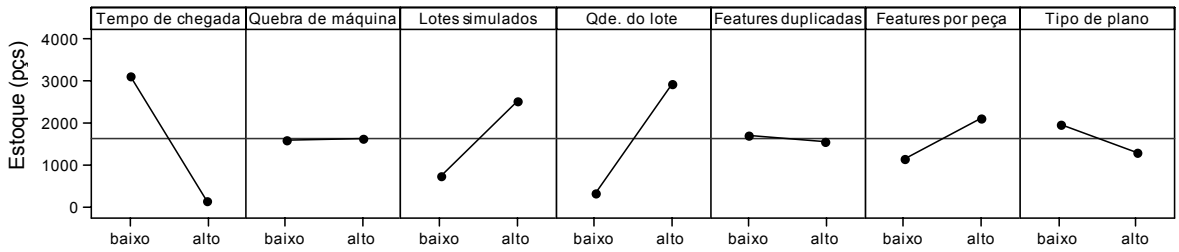


Figura 5.11 - Efeitos no estoque em processo do sistema desbalanceado (penalidade de 40%)

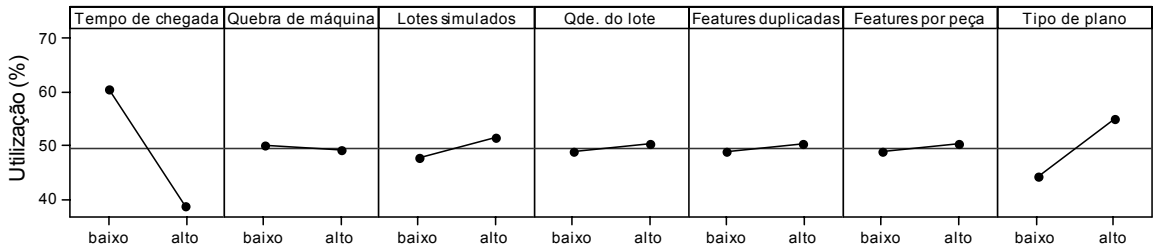


Figura 5.12 - Efeitos na utilização dos recursos do sistema desbalanceado (penalidade de 40%)

Também foram gerados os gráficos de interações entre dois fatores utilizando o aplicativo Minitab®, desse modo os gráficos representados nas Fig. 5.13, 5.14 e 5.15, são relativos ao sistema balanceado com penalidade de 20%. O mesmo sistema, mas com penalidade de 40% é representado nas Fig. 5.16, 5.17 e 5.18. Analogamente, as Fig. 5.19, 5.20 e 5.21 caracterizam os gráficos de interação para o sistema desbalanceado, adotando-se a penalidade de 20%, enquanto as Fig. 5.22, 5.23 e 5.24 correspondem aos gráficos de interação para o sistema desbalanceado, em penalidade de 40%.

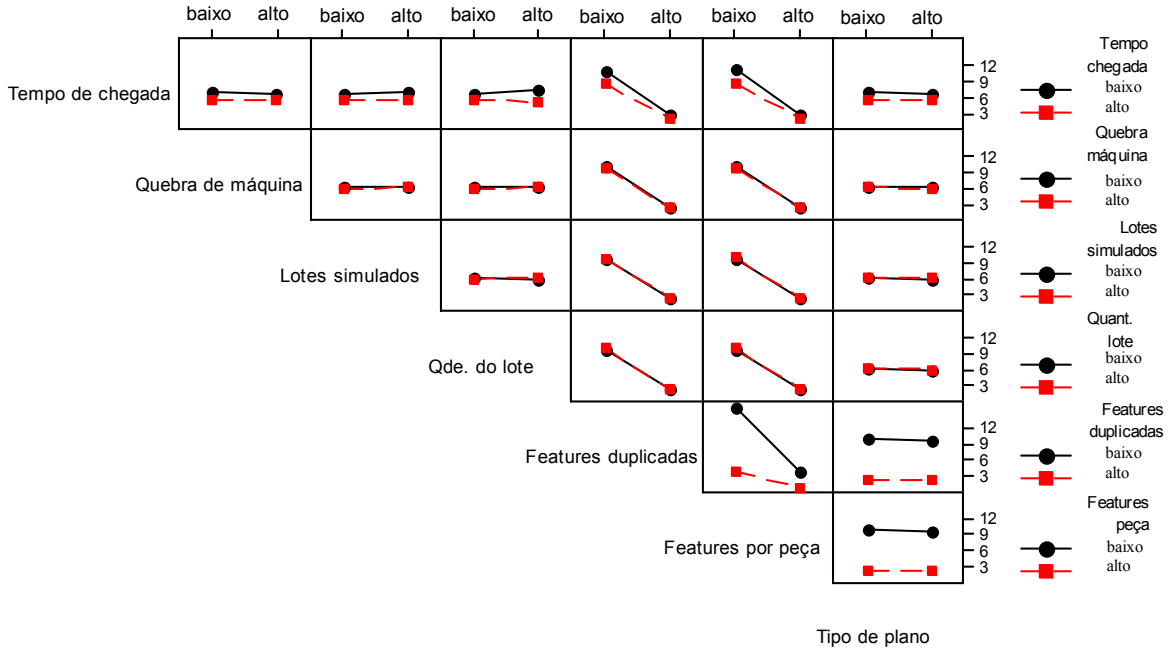


Figura 5.13 - Interação na produtividade do sistema balanceado (penalidade de 20%)

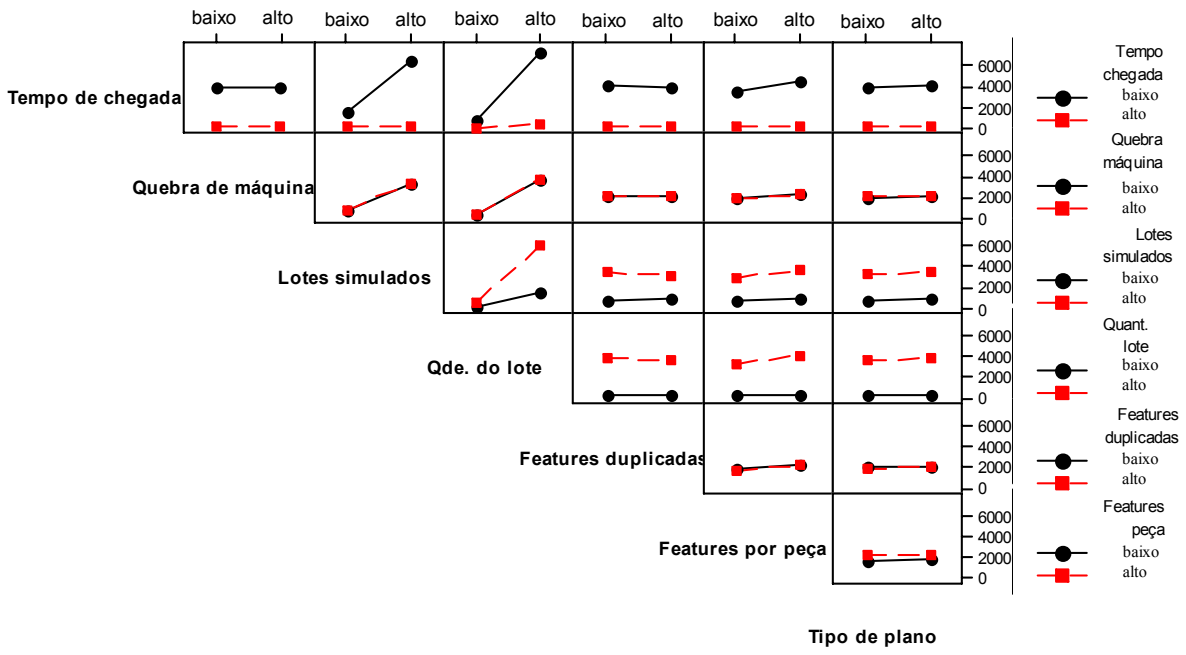


Figura 5.14 - Interação no estoque em processo do sistema balanceado (penalidade de 20%)

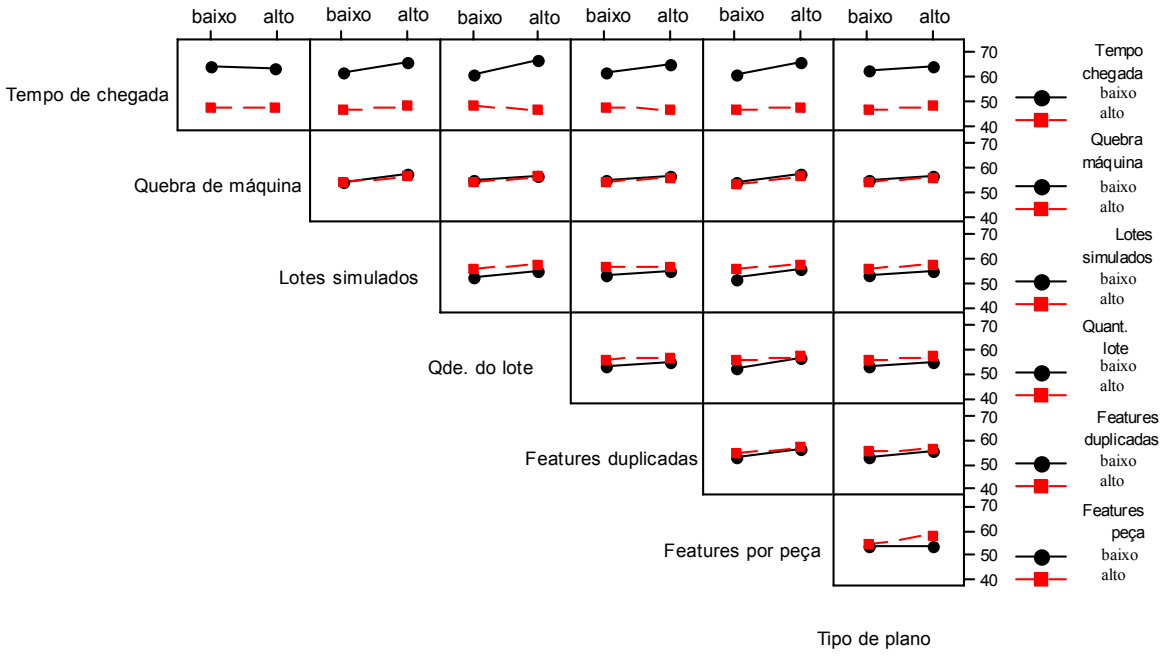


Figura 5.15 - Interação na utilização dos recursos do sistema balanceado (penalidade de 20%)

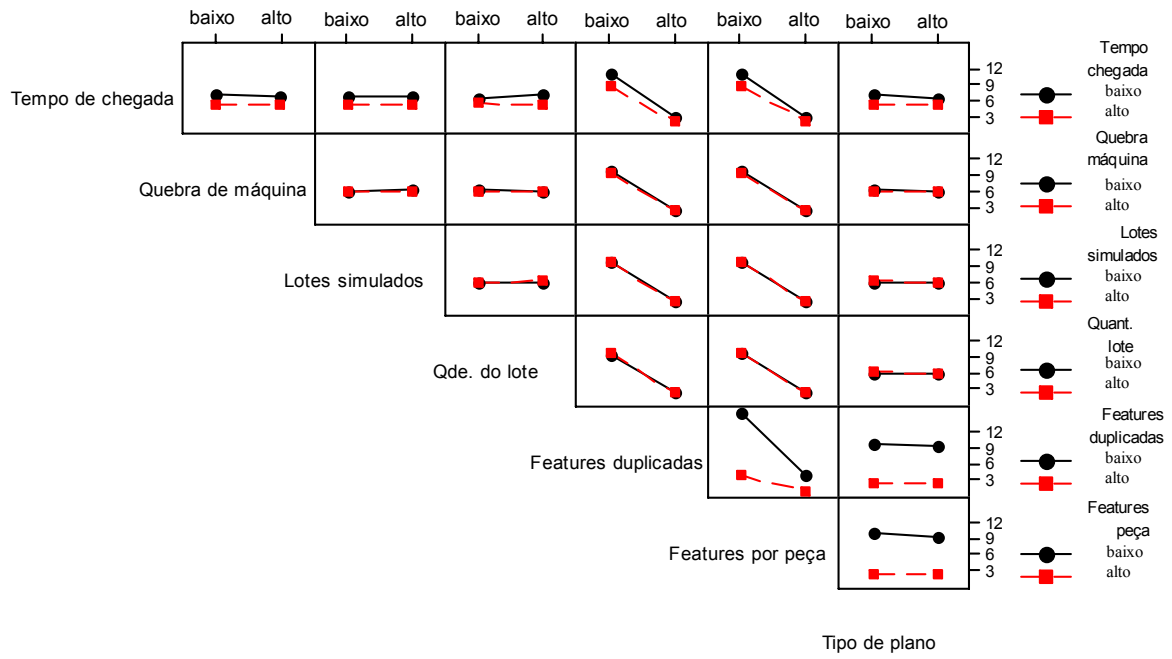


Figura 5.16 - Interação na produtividade do sistema balanceado (penalidade de 40%)

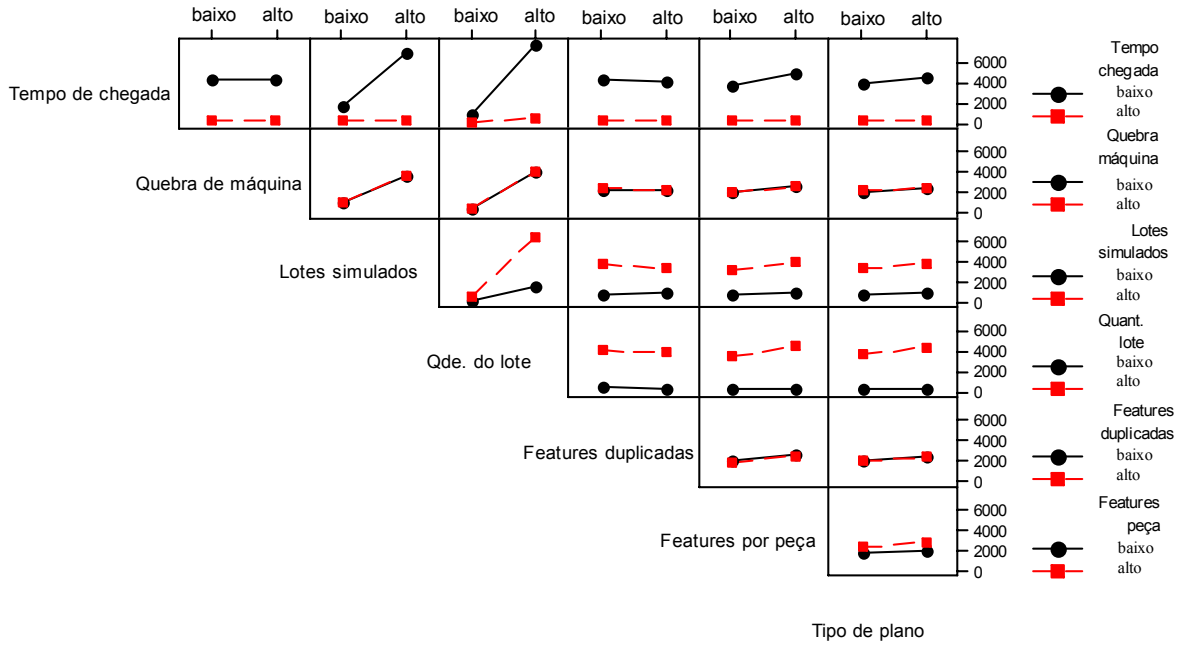


Figura 5.17 - Interação no estoque em processo do sistema balanceado (penalidade de 40%)

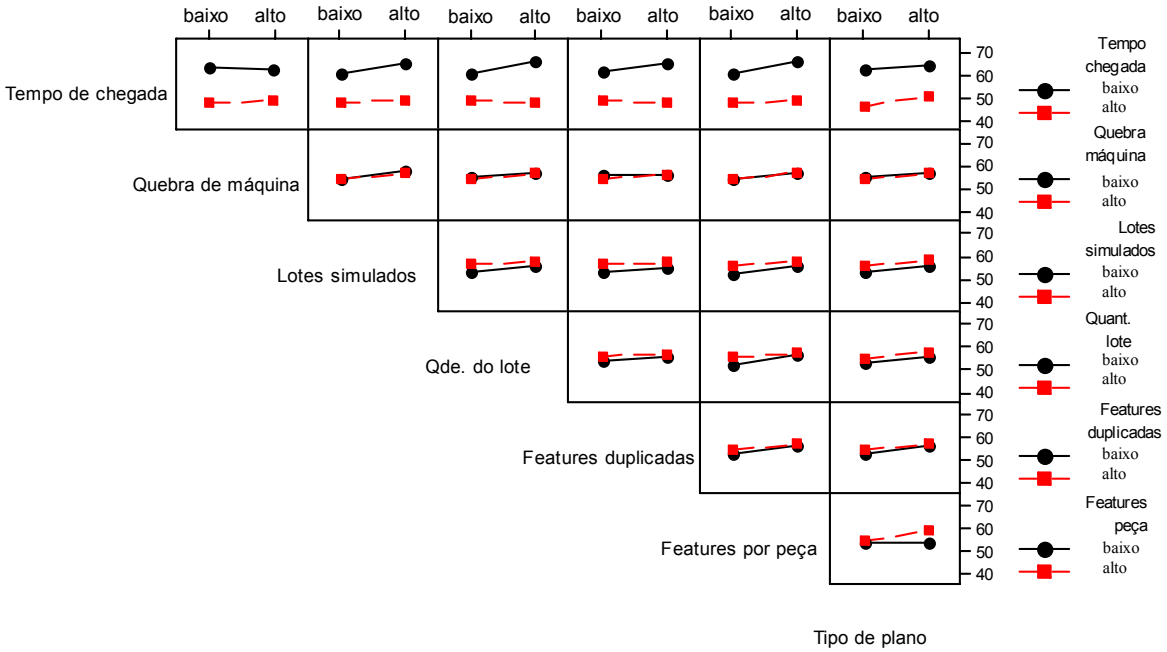


Figura 5.18 - Interação na utilização dos recursos do sistema balanceado (penalidade de 40%)

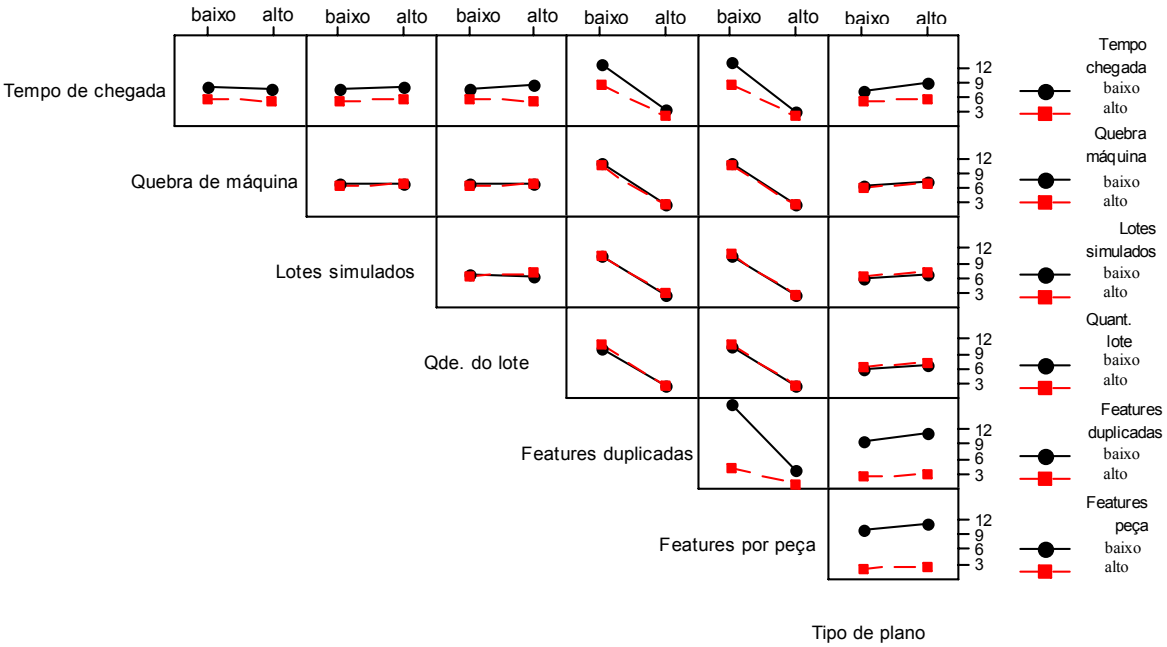


Figura 5.19 - Interação na produtividade do sistema desbalanceado (penalidade de 20%)

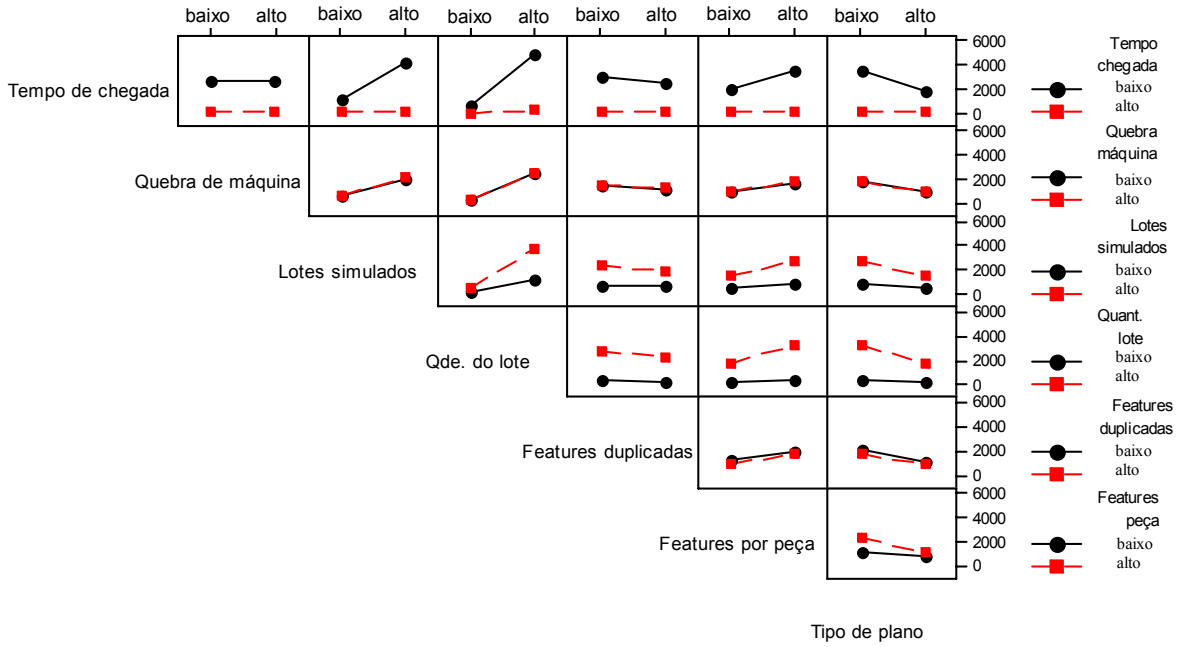


Figura 5.20 - Interação no estoque em processo do sistema desbalanceado (penalidade de 20%)

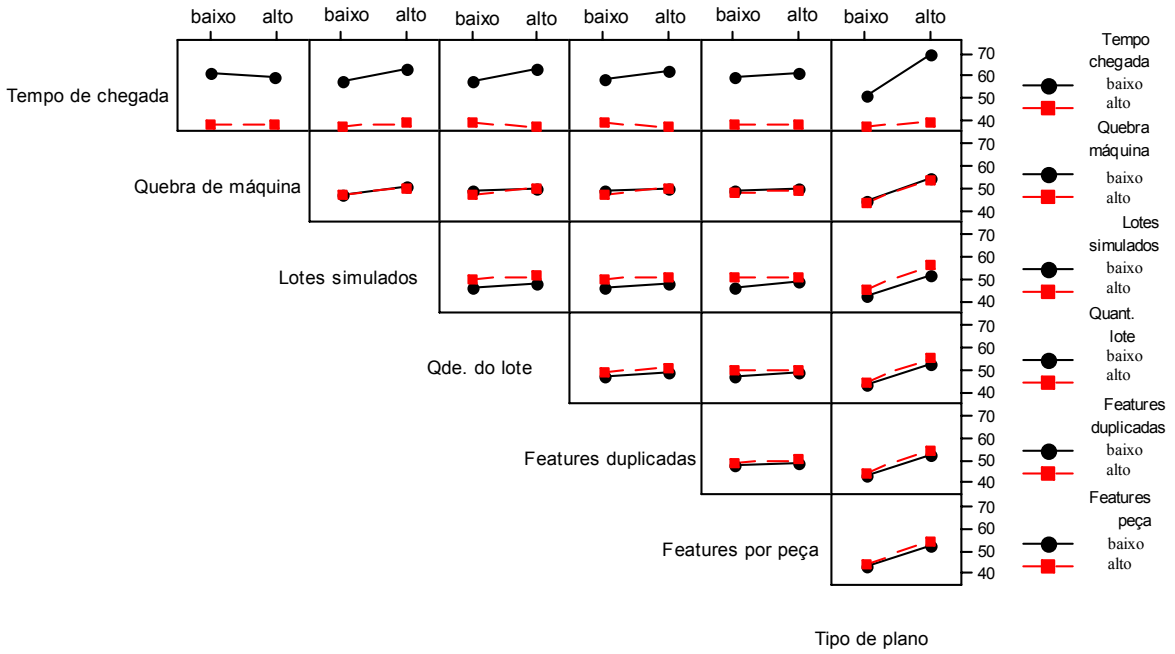


Figura 5.21 - Interação na utilização dos recursos do sistema desbalanceado (penalidade de 20%)

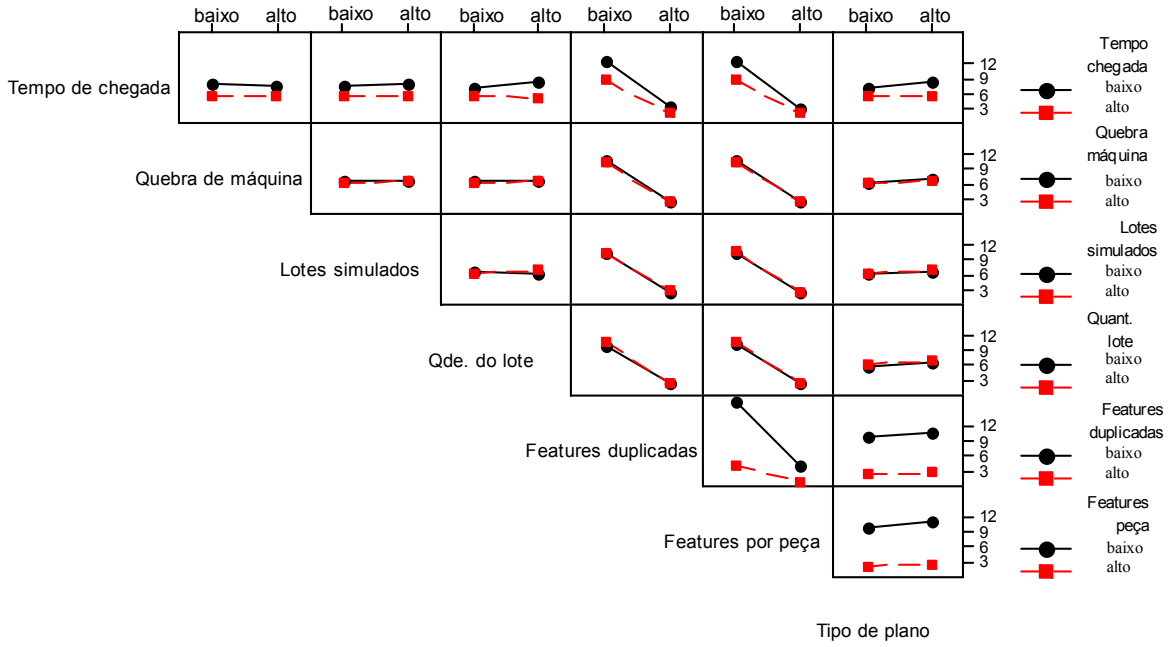


Figura 5.22 - Interação na produtividade do sistema desbalanceado (penalidade de 40%)

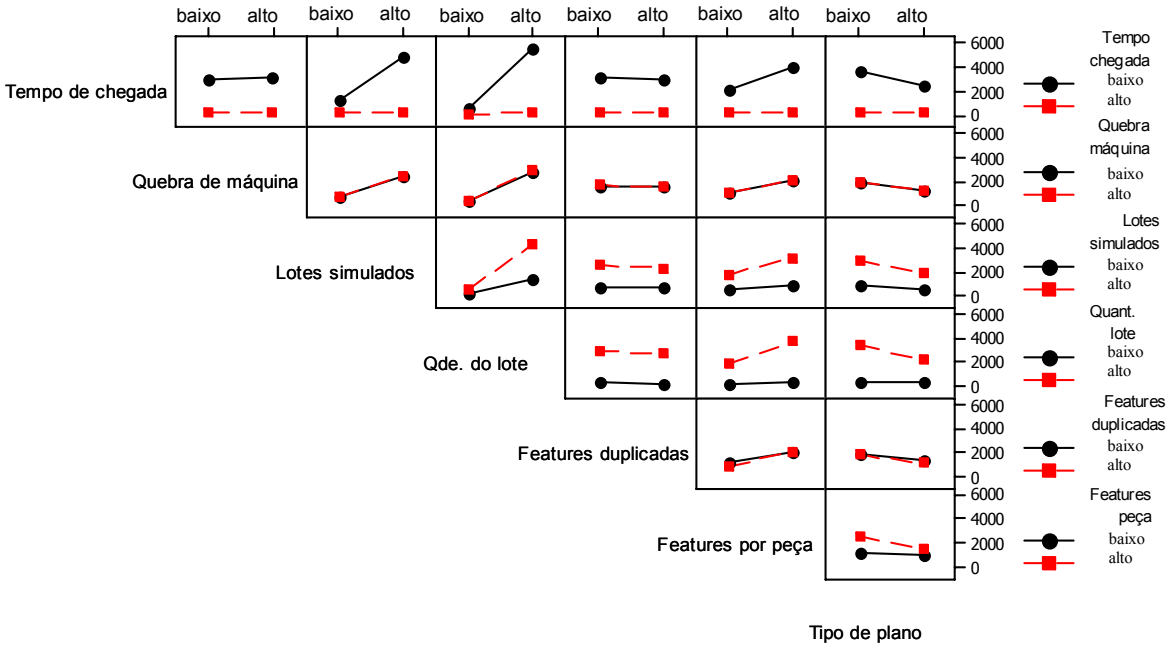


Figura 5.23 - Interação no estoque em processo do sistema desbalanceado (penalidade de 40%)

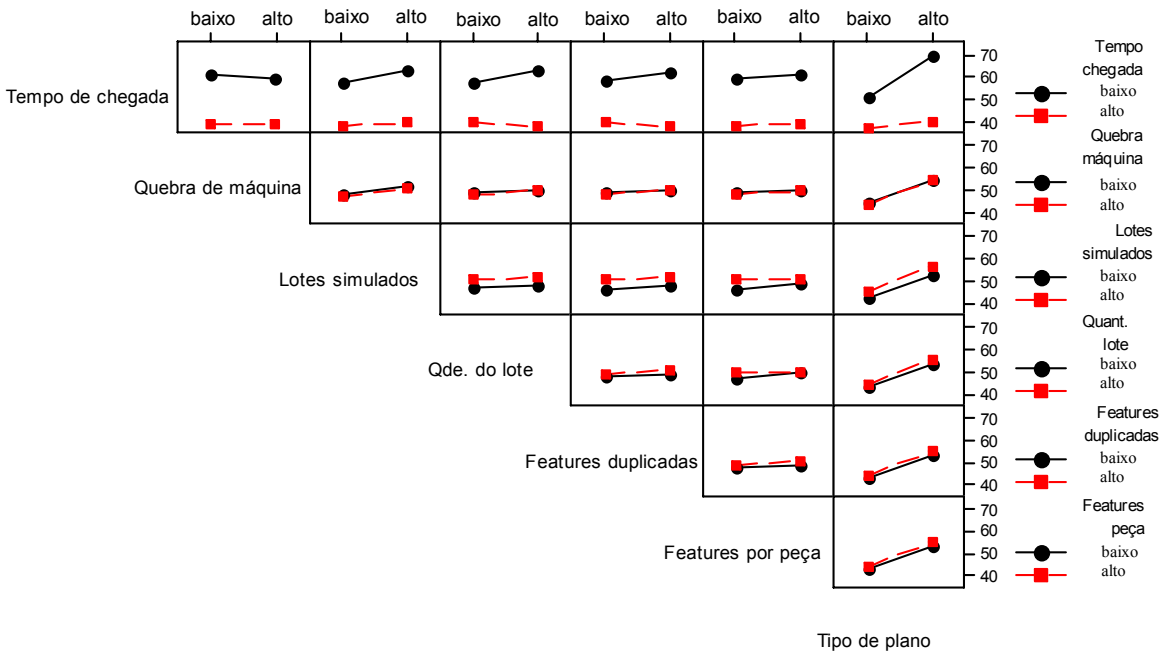


Figura 5.24 - Interação na utilização dos recursos do sistema desbalanceado (penalidade de 40%)

As Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4 referem-se à aplicação da ANOVA ao sistema de manufatura balanceado considerando-se uma penalidade de 20%. Da mesma forma, as Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7 referem-se ao mesmo sistema, entretanto com uma penalidade de 40%.

De maneira semelhante, a ANOVA para o sistema desbalanceado com penalidade de 20% está ilustrada nas Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10, enquanto a ANOVA para o mesmo sistema com penalidade de 40% é apresentada nas Tabelas 5.11, 5.12 e 5.13.

Tabela 5.2 - ANOVA na produtividade do sistema balanceado (penalidade de 20%)

Fonte de Variação	SS	DF	MS	F_0	P
Tempo de chegada	265,73	1	265,73	1509,59	0,000
Quebra de máquina	3,82	1	3,82	21,68	0,000
Lotes simulados	3,06	1	3,06	17,40	0,000
Quantidade do lote	1,42	1	1,42	8,07	0,005
Features duplicadas	5348,22	1	5348,22	30382,29	0,000
Features por peça	5526,89	1	5526,89	31397,24	0,000
Tipo de plano	4,60	1	4,60	26,12	0,000
Interações entre 2 fatores	2207,60	21	105,12	9051,77	0,000
Interações entre 3 fatores	98,10	35	2,80	597,18	0,000
Interações entre 4 fatores	30,40	35	0,87	15,92	0,000
Interações entre 5 fatores	2,90	21	0,14	4,94	0,000
Interações entre 6 fatores	1,90	7	0,28	0,80	0,725
Interações entre 7 fatores	0,50	1	0,50	1,57	0,146
Erro	45,1	256	0,18		
Total	13540,2	383			

Tabela 5.3 - ANOVA no estoque em processo do sistema balanceado (penalidade de 20%)

Fonte de Variação	SS	DF	MS	F_0	P
Tempo de chegada	1417617797	1	1417617797	6541,96	0,000
Quebra de máquina	26546	1	26546	0,12	0,727
Lotes simulados	621008829	1	621008829	2865,8	0,000
Quantidade do lote	1146811158	1	1146811158	5292,25	0,000
Features duplicadas	872577	1	872577	4,03	0,046
Features por peça	16447198	1	16447198	75,9	0,000
Tipo de plano	1793596	1	1793596	8,28	0,004
Interações entre 2 fatores	2050574927	21	97646425	450,61	0,000
Interações entre 3 fatores	461657597	35	13190217	60,87	0,000
Interações entre 4 fatores	11932799	35	340937	1,57	0,000
Interações entre 5 fatores	3417426	21	162735	0,75	0,026
Interações entre 6 fatores	1443580	7	206226	0,95	0,777
Interações entre 7 fatores	399989	1	399989	1,85	0,467
Erro	55474239	256	216696		
Total	5789478257	383			

Tabela 5.4 - ANOVA na utilização do sistema balanceado (penalidade de 20%)

Fonte de Variação	SS	DF	MS	F_0	P
Tempo de chegada	27288,75	1	27288,75	8989,71	0,000
Quebra de máquina	32,56	1	32,56	10,72	0,001
Lotes simulados	784,98	1	784,98	258,60	0,000
Quantidade do lote	443,18	1	443,18	146,00	0,000
Features duplicadas	176,35	1	176,35	58,10	0,000
Features por peça	873,17	1	873,17	287,65	0,000
Tipo de plano	312,21	1	312,21	102,85	0,000
Interações entre 2 fatores	3146,70	21	149,84	49,36	0,000
Interações entre 3 fatores	1274,00	35	36,4	11,99	0,000
Interações entre 4 fatores	355,40	35	10,15	3,34	0,000
Interações entre 5 fatores	137,90	21	6,57	2,16	0,003
Interações entre 6 fatores	37,33	7	5,33	1,75	0,097
Interações entre 7 fatores	6,53	1	6,53	2,15	0,144
Erro	777,10	256	3,04		
Total	35646,2	383			

Tabela 5.5 - ANOVA na produtividade do sistema balanceado (penalidade de 40%)

Fonte de Variação	SS	DF	MS	F_0	P
Tempo de chegada	224,42	1	224,42	1213,02	0,000
Quebra de máquina	3,80	1	3,80	20,52	0,000
Lotes simulados	0,83	1	0,83	4,48	0,035
Quantidade do lote	1,69	1	1,69	9,14	0,003
Features duplicadas	5290,16	1	5290,16	28594,03	0,000
Features por peça	5361,52	1	5361,52	28979,71	0,000
Tipo de plano	13,54	1	13,54	73,17	0,000
Interações entre 2 fatores	2141,90	21	102	551,30	0,000
Interações entre 3 fatores	109,60	35	3,13	16,93	0,000
Interações entre 4 fatores	33,10	35	0,95	5,11	0,000
Interações entre 5 fatores	2,90	21	0,14	0,75	0,779
Interações entre 6 fatores	0,80	7	0,12	0,63	0,729
Interações entre 7 fatores	0,20	1	0,20	1,08	0,301
Erro	47,40	256	0,19		
Total	13231,90	383			

Tabela 5.6 - ANOVA no estoque em processo do sistema balanceado (penalidade de 40%)

Fonte de Variação	SS	DF	MS	F_0	P
Tempo de chegada	1587162735	1	1587162735	5888,93	0,000
Quebra de máquina	23133	1	23133	0,09	0,77
Lotes simulados	693609397	1	693609397	2573,53	0,000
Quantidade do lote	1301527610	1	1301527610	4829,12	0,000
Features duplicadas	1060590	1	1060590	3,94	0,000
Features por peça	33982170	1	33982170	126,09	0,000
Tipo de plano	11707869	1	11707869	43,44	0,000
Interações entre 2 fatores	2355859454	21	112183784	416,24	0,000
Interações entre 3 fatores	554772984	35	15850657	58,81	0,000
Interações entre 4 fatores	27799955	35	794284	2,95	0,000
Interações entre 5 fatores	8535928	21	406473	1,51	0,075
Interações entre 6 fatores	2922626	7	417518	1,55	0,151
Interações entre 7 fatores	265816	1	265816	0,99	0,322
Erro	68996182	256	269516		
Total	6648226448	383			

Tabela 5.7 - ANOVA na utilização do sistema balanceado (penalidade de 40%)

Fonte de Variação	SS	DF	MS	F_0	P
Tempo de chegada	22060,53	1	22060,53	6391,62	0,000
Quebra de máquina	19,22	1	19,22	5,57	0,019
Lotes simulados	872,00	1	872,00	252,65	0,000
Quantidade do lote	379,49	1	379,49	109,95	0,000
Features duplicadas	158,00	1	158,00	45,78	0,000
Features por peça	925,10	1	925,10	268,03	0,000
Tipo de plano	715,48	1	715,48	207,30	0,000
Interações entre 2 fatores	3159,90	21	150,47	43,6	0,000
Interações entre 3 fatores	1707,70	35	48,79	14,14	0,000
Interações entre 4 fatores	458,50	35	13,10	3,8	0,000
Interações entre 5 fatores	142,60	21	6,79	1,97	0,008
Interações entre 6 fatores	37,70	7	5,38	1,56	0,148
Interações entre 7 fatores	4,13	1	4,13	1,2	0,275
Erro	883,60	256	3,45		
Total	31523,90	383			

Tabela 5.8 - ANOVA na produtividade do sistema desbalanceado (penalidade de 20%)

Fonte de Variação	SS	DF	MS	F_0	P
Tempo de chegada	693	1	693	8109,74	0,000
Quebra de máquina	6,46	1	6,46	75,58	0,000
Lotes simulados	3,69	1	3,69	43,13	0,000
Quantidade do lote	8,41	1	8,41	98,46	0,000
Features duplicadas	6157,93	1	6157,93	72062,5	0,000
Features por peça	6641,02	1	6641,02	77715,88	0,000
Tipo de plano	79,33	1	79,33	928,4	0,000
Interações entre 2 fatores	3048,9	21	145,19	1699,03	0,000
Interações entre 3 fatores	244,2	35	6,98	81,64	0,000
Interações entre 4 fatores	56,2	35	1,6	18,77	0,000
Interações entre 5 fatores	12,7	21	0,61	7,1	0,000
Interações entre 6 fatores	3,2	7	0,46	5,4	0,000
Interações entre 7 fatores	0,3	1	0,29	3,45	0,064
Erro	21,9	256	0,09		
Total	16977,2	383			

Tabela 5.9 - ANOVA no estoque em processo do sistema desbalanceado (penalidade de 20%)

Fonte de Variação	SS	DF	MS	F_0	P
Tempo de chegada	630592293,00	1	630592293,00	11786,12	0,000
Quebra de máquina	292257,00	1	292257,00	5,46	0,020
Lotes simulados	205263417,00	1	205263417,00	3836,49	0,000
Quantidade do lote	470611804,00	1	470611804,00	8795,99	0,000
Features duplicadas	6809986,00	1	6809986,00	127,28	0,000
Features por peça	58047739,00	1	58047739,00	1084,94	0,000
Tipo de plano	65309982,00	1	65309982,00	1220,68	0,000
Interações entre 2 fatores	984010516	21	205275354	875,8	0,000
Interações entre 3 fatores	331174348	35	46857644	176,85	0,000
Interações entre 4 fatores	68516728	35	9462124	36,59	0,000
Interações entre 5 fatores	10475114	21	1957621	9,32	0,000
Interações entre 6 fatores	354597	7	498815	0,95	0,471
Interações entre 7 fatores	53892	1	50657	1,01	0,317
Erro	13696761	256	53892		
Total	2845209433	383			

Tabela 5.10 - ANOVA na utilização do sistema desbalanceado (penalidade de 20%)

Fonte de Variação	SS	DF	MS	F_0	P
Tempo de chegada	49535,05	1	49535,05	37310,36	0,000
Quebra de máquina	44,13	1	44,13	33,24	0,000
Lotes simulados	1140,57	1	1140,57	859,09	0,000
Quantidade do lote	333,13	1	333,13	250,91	0,000
Features duplicadas	225,4	1	225,4	169,77	0,000
Features por peça	166,82	1	166,82	125,65	0,000
Tipo de plano	9718,77	1	9718,77	7320,28	0,000
Interações entre 2 fatores	10781,4	21	513,4	386,7	0,000
Interações entre 3 fatores	916,2	35	26,18	19,72	0,000
Interações entre 4 fatores	431,5	35	12,33	9,29	0,000
Interações entre 5 fatores	142,7	21	6,79	5,12	0,000
Interações entre 6 fatores	13	7	1,85	1,4	0,207
Interações entre 7 fatores	1	1	0,96	0,72	0,395
Erro	339,9	256	1,33		
Total	73789,4	383			

Tabela 5.11 - ANOVA na produtividade do sistema desbalanceado (penalidade de 40%)

Fonte de Variação	SS	DF	MS	F_0	P
Tempo de chegada	587,66	1	587,66	6171,76	0,000
Quebra de máquina	4,05	1	4,05	42,5	0,000
Lotes simulados	3,58	1	3,58	37,6	0,000
Quantidade do lote	6,58	1	6,58	69,14	0,000
Features duplicadas	5969,58	1	5969,58	62693,62	0,000
Features por peça	6424,24	1	6424,24	67468,64	0,000
Tipo de plano	43,67	1	43,67	458,66	0,000
Interações entre 2 fatores	2835,7	21	135,03	1418,16	0,000
Interações entre 3 fatores	202,3	35	5,78	60,7	0,000
Interações entre 4 fatores	49,6	35	1,42	14,88	0,000
Interações entre 5 fatores	11,2	21	0,53	5,61	0,000
Interações entre 6 fatores	2,7	7	0,39	4,09	0,000
Interações entre 7 fatores	0,03	1	0,03	0,36	0,548
Erro	24,4	256	0,1		
Total	16165,3	383			

Tabela 5.12 - ANOVA no estoque em processo do sistema desbalanceado com penalidade de 40%

Fonte de Variação	SS	DF	MS	F_0	P
Tempo de chegada	835349880	1	835349880	9942,08	0,000
Quebra de máquina	210259	1	210259	2,50	0,115
Lotes simulados	297277858	1	297277858	3538,11	0,000
Quantidade do lote	637486020	1	637486020	7587,16	0,000
Features duplicadas	1701009	1	1701009	20,24	0,000
Features por peça	88374661	1	88374661	1051,81	0,000
Tipo de plano	41458075	1	41458075	493,42	0,000
Interações entre 2 fatores	1300582867,00	21	61932517,00	737,10	0,000
Interações entre 3 fatores	421108103,00	35	12031660,00	143,20	0,000
Interações entre 4 fatores	84759452,00	35	2421699,00	28,82	0,000
Interações entre 5 fatores	14259072,00	21	679003,00	8,08	0,000
Interações entre 6 fatores	380197,00	7	54314,00	0,65	0,717
Interações entre 7 fatores	38404,00	1	38404,00	0,46	0,500
Erro	21509549,00	256	84022,00		
Total	3744495406,00	383			

Tabela 5.13 - ANOVA na utilização do sistema desbalanceado com penalidade de 40%

Fonte de Variação	SS	DF	MS	F_0	P
Tempo de chegada	45877,65	1	45877,65	35245,83	0,000
Quebra de máquina	56,92	1	56,92	43,73	0,000
Lotes simulados	1284,03	1	1284,03	986,47	0,000
Quantidade do lote	244,68	1	244,68	187,98	0,000
Features duplicadas	207,88	1	207,88	159,7	0,000
Features por peça	166,14	1	166,14	127,64	0,000
Tipo de plano	11122,69	1	11122,69	8545,09	0,000
Interações entre 2 fatores	9490,70	21	451,94	347,20	0,000
Interações entre 3 fatores	961,80	35	27,48	21,11	0,000
Interações entre 4 fatores	441,60	35	12,62	9,69	0,000
Interações entre 5 fatores	90,90	21	4,33	3,33	0,000
Interações entre 6 fatores	16,40	7	2,34	1,80	0,088
Interações entre 7 fatores	1,00	1	1	0,76	0,385
Erro	333,20	256	1,30		
Total	70295,60	383			

5.2 Análise dos resultados

As análises serão feitas separadamente para cada variável de resposta, tendo em vista o volume expressivo de dados obtidos, entre gráficos e tabelas. Além disso, para cada variável de resposta, as análises serão divididas em três etapas: análise dos gráficos de efeito, análise do gráfico de interações e análise das tabelas de ANOVA.

Com relação à análise de variância, é importante mencionar que a análise será realizada comparando os efeitos de cada fator a partir dos valores da soma dos quadrados (SS). Isso porque a análise usual, que corresponde ao método do valor P (Montgomery, 1997), que consiste em comparar o menor nível de significância obtido (1 - P) com o nível de significância adotado (1 - α) não levaria a conclusões relevantes. Pois o nível de significância obtido na maioria das simulações seria maior que o nível de significância adotando mesmo que este fosse igual a 0,01, que corresponde a um nível de significância igual a 99% (isto é, um erro de 1%). Isso iria evidenciar um efeito significativo para quase

todos os fatores, pois o erro experimental obtido foi baixo em razão da quantidade de testes realizados e das poucas fontes de variabilidade no sistema. Assim, a comparação entre qualquer um dos fatores com o erro experimental aparenta ser relevante, mesmo não sendo.

5.2.1 Efeito dos fatores em relação à produtividade

A partir dos gráficos de efeito mostrados nas Fig. 5.1, 5.4, 5.7 e 5.10, pode-se verificar que os fatores que influenciam a produtividade são os mesmos para ambos os sistemas de manufatura e para ambas as penalidades consideradas. Dentre esses fatores, os maiores efeitos foram evidenciados para os fatores *features* por peça, *features* duplicadas e o tempo de chegada, respectivamente. O efeito de cada um desses três fatores é negativo, ou seja, a mudança do nível baixo para o nível alto nesses fatores corresponde a uma redução da produtividade.

O aumento no nível dos fatores *features* por peça e *features* duplicadas reduz a produtividade em razão deles estarem relacionados ao aumento da complexidade da peça a ser fabricada.

Já o aumento do nível do fator tempo de chegada se traduz no aumento do intervalo de tempo entre a chegada de uma ordem de fabricação e outra. Por isso, o tempo de espera para a chegada de uma ordem no sistema também aumenta, elevando as chances do sistema ficar ocioso, o que reduz a produtividade.

O aumento do nível do fator tipo de plano, que corresponde ao uso de alternativas no plano de processo, apresenta uma influência menor comparada aos fatores *features* duplicadas, *features* por peça e tempo de chegada. Essa influência é menor e desfavorável à produtividade no sistema balanceado. No caso do sistema desbalanceado essa influência, além de ser um pouco maior, atua no sentido de aumentar a produtividade. A influência negativa no uso de alternativas no sistema balanceado mostra que os prejuízos em produtividade com relação à utilização de um recurso de menor eficiência são maiores que os ganhos de produtividade obtidos com a sua utilização. Já no sistema desbalanceado ocorre o inverso, evidenciando que o uso de um recurso alternativo de menor eficiência é benéfico à produtividade quando comparado à situação onde tal recurso não foi previsto.

Os gráficos de interação entre dois fatores, conforme mostram as Fig. 5.13, 5.16, 5.19 e 5.21, apresentam algumas interações relevantes, sendo os fatores envolvidos nessas interações aproximadamente os mesmos para ambos os sistemas de manufatura e ambas as penalidades consideradas.

As maiores interações são provocadas pelos fatores de maior efeito sobre a produtividade, tais como: *features* por peça, *features* duplicadas e tempo de chegada. Dentre essas interações, vale ressaltar as seguintes, em ordem decrescente: *features*

duplicadas e *features* por peça, *features* duplicadas e tempo de chegada, *features* por peça e tempo de chegada, tempo de chegada e quantidade do lote.

A interação mais significativa envolve os fatores *features* duplicadas e *features* por peça, de modo que o fator quantidade de *features* por peça prejudica menos a produtividade quando o fator *features* duplicadas é alto. Isso evidencia o efeito do aumento do número de *features* duplicadas, no sentido de reduzir a quantidade de *set-ups* realizados.

A única interação envolvendo um fator de baixo efeito sobre a produtividade, corresponde aos fatores tempo de chegada e quantidade do lote, entretanto essa interação é baixa. Essa interação mostra que o aumento no nível do fator tempo de chegada, propicia uma redução maior na produtividade para o nível alto do fator quantidade do lote. A interpretação disso é que o efeito do aumento da quantidade do lote é menor quando o intervalo de tempo entre a chegada de uma ordem e outra aumenta.

Além dessas interações, verificou-se uma interação adicional no sistema desbalanceado entre o fator tempo de chegada e tipo de plano. Esta última interação indica que o efeito do nível alto para o fator tipo de plano, que corresponde ao uso de alternativas, é menor quando o tempo de chegada aumenta. Isso significa que os ganhos em produtividade são maiores quando o tempo de chegada está no nível baixo, e menores quando o tempo de chegada está no nível alto. Isso mostra que o aumento da ociosidade dos recursos no sistema, em razão do aumento no nível do fator tempo de chegada, propicia maiores incrementos de produtividade com o uso de alternativas.

A análise das tabelas de ANOVA pode ser realizada comparando-se os efeitos a partir da soma dos quadrados (SS) de cada fator. Com base nesse critério, os valores da SS nas Tabelas 5.2, 5.5, 5.8 e 5.11confirmam as análises realizadas com base nos gráficos de efeito e interação. Além disso, a ANOVA mostra que as interações entre três e quatro fatores também são relevantes, o que pode ser explicado pela combinação da influência do efeito dos fatores mais relevantes, tais como: *features* por peça, *features* duplicadas, tempo de chegada e tipo de plano (somente no sistema desbalanceado), com os demais fatores.

Finalmente, em relação aos fatores quebra de máquina e lotes simulados, os efeitos e as interações evidenciadas foram pouco expressivos. Contudo é importante destacar que o efeito do fator quebra de máquina é negativo, ou seja, o aumento da quantidade de quebras reduz a produtividade.

5.2.2 Efeito dos fatores em relação ao estoque em processo

Quanto ao estoque em processo, é possível evidenciar pelos gráficos de efeito ilustrados nas Fig. 5.2, 5.5, 5.8 e 5.11, que a influência mais expressiva é causada pelos seguintes fatores: tempo de chegada, quantidade do lote e lotes simulados, respectivamente. No

entanto, não pode ser desprezada a influência dos fatores *features* por peça e tipo de plano, principalmente quando se considera o sistema desbalanceado .

O tempo de chegada tem um efeito negativo sobre o estoque em processo, isto é, aumentando-se o nível do fator tempo de chegada o estoque em processo diminui. Isso parece evidente, haja visto que com o aumento do nível do fator tempo de chegada, aumenta o intervalo de tempo entre a chegada de uma ordem de fabricação e outra, e com isso reduz-se a quantidade de peças dentro do sistema.

Já o fator quantidade do lote tem uma influência positiva, pois quanto maior o nível desse fator maior a quantidade de peças existente nos lotes, e, conseqüentemente, maior o estoque em processo. Assim, considerando que exista uma mesma quantidade de lotes aguardando para serem produzidos, quanto maior a quantidade de peças em cada lote, maior o estoque em processo. No gráfico de efeito a influência desse fator mostrou-se bastante relevante, cuja magnitude é semelhante ao efeito do tempo de chegada.

O fator lotes simulados produz uma influência positiva no estoque em processo. Acredita-se que isso ocorre porque este fator permite submeter o sistema de manufatura a duas situações distintas, de acordo com o seu nível. Na primeira, quando o nível do fator é baixo, a taxa de chegada de lotes é, na maior parte do tempo, menor ou igual à taxa de saída. Isso ocorre porque o sistema ainda se encontra num regime de maior variação no tempo de chegada, ou seja, num regime transiente. Dessa forma, a possibilidade de uma máquina ficar ociosa durante um curto intervalo de tempo é maior no nível baixo, comparado ao nível alto do fator lotes simulados. Isso ocorre porque no nível alto desse fator, o sistema está mais próximo do regime permanente, isto é, a taxa de chegada de lotes é, na maior parte do tempo, ligeiramente maior que a de saída. Conseqüentemente, o efeito produzido no sistema pelo fator lotes simulados é análogo ao efeito produzido pelo fator tempo de chegada, entretanto o nível baixo do fator lotes simulados corresponde a um nível alto do fator tempo de chegada, e vice versa.

Quanto aos fatores de menor influência sobre o estoque em processo tem-se *features* por peça, tipo de plano e *features* duplicadas, em ordem decrescente. Em relação ao fator *features* por peça, verifica-se que o mesmo afeta positivamente o estoque em processo. O aumento no nível do fator *features* por peça corresponde a uma maior complexidade da peça, resultando num tempo de fabricação e num estoque em processo mais elevado..

Um efeito semelhante ao do fator *features* por peça seria esperado para o fator *features* duplicadas, porém o efeito obtido foi inverso. Embora o aumento do nível do fator *features* duplicadas esteja relacionado ao aumento do tempo de fabricação, o aumento no nível desse fator causou uma ligeira redução no estoque em processo. Acredita-se que o efeito na redução de *set-ups*, obtido no nível alto do fator *features* duplicadas, tenha ocasionado essa diferença.

De um modo geral, o efeito de cada fator no gráfico é aproximadamente o mesmo em ambos os sistemas de manufatura, e para ambas as penalidades consideradas, à exceção do fator tipo de plano. No caso do fator tipo de plano o efeito mostra-se mais proeminente n sistema de manufatura desbalanceado, evidenciando que o uso de alternativas nos sistema desbalanceado possibilita uma redução do estoque em processo. Tal resultado é observado mesmo quando a penalidade no uso de alternativas é de 40%.

Analisando os gráficos de interação, ilustrados nas Fig. 5.14, 5.17, 5.20 e 5.22, verifica-se que os fatores de maior efeito são os que mais influenciam os demais. Assim, as interações observadas envolvem os seguintes fatores: tempo de chegada e quantidade do lote, tempo de chegada e lotes simulados, tempo de chegada e *features* por peça, quantidade do lote e lotes simulados, quantidade do lote e *features* por peça, quantidade do lote e *features* duplicadas.

O efeito das interações envolvendo o fator tempo de chegada e os fatores quantidade do lote, lotes simulados ou *features* por peça, consiste no aumento do estoque em processo, quando o nível do tempo de chegada aumenta. Isto mostra que, quando aumenta a ociosidade no sistema, no caso do aumento no nível do fator tempo de chegada, o efeito dos fatores presentes nessa interação passa a ser mais significativos.

A interação entre os fatores quantidade de lotes e lotes simulados mostra que o efeito do fator quantidade do lote sobre o estoque em processo é maior quando o nível do fator lotes simulados é alto. Isto porque o nível alto do fator lotes simulados corresponde à redução da probabilidade de um recurso ficar ocioso à espera de uma ordem. Dessa forma, o aumento da quantidade de lotes, em razão do aumento do nível do fator quantidade de lotes, conduz a um maior estoque em processo porque gera uma sobrecarga de ordens no sistema.

Algumas interações adicionais foram verificadas no sistema desbalanceado, sendo que as maiores envolvem o fator tipo de plano e os seguintes fatores: tempo de chegada, quantidade do lote, lotes simulados e *features* por peça, respectivamente. O efeito dessas interações consiste numa redução maior do estoque em processo quando o nível alto do fator tipo de plano é considerado, ou seja, quando alternativas são utilizadas. Nesse contexto, a redução do estoque foi mais proeminente quando o nível do fator tempo de chegada é baixo, o nível do fator quantidade do lote é alto, o nível do fator lotes simulados é alto ou o nível do fator quantidade de *features* é alto. Em geral, isso mostra que a utilização de alternativas em planos de processo beneficia a redução do estoque em processo ainda mais no caso de aumento da ociosidade dos recursos, aumento da quantidade de peças no sistema e aumento da incerteza quanto à chegada de uma ordem (a qual está indiretamente associada à ociosidade).

As análises realizadas a partir dos gráficos de efeito e interação entre dois fatores podem ser confirmadas com base no valor da soma dos quadrados (SS) obtidos nas tabelas de

análise de variância, como mostram as Tabelas 5.3, 5.6, 5.9 e 5.12. De acordo com essas tabelas, além dos efeitos evidenciados nos gráficos de efeito e interação entre dois fatores, outras interações relacionado até cinco fatores ainda são relevantes. Isso pode ser evidenciado comparando o valor da SS dessas interações com o valor da SS de outros fatores cujo efeito é significativo como o fator tipo de plano. Assim, as interações entre dois até cinco fatores são consideradas significativas, o que pode ser explicado pela combinação do efeito dos seguintes fatores: tempo de chegada, quantidade do lote, lotes simulados *features* por peça e tipo de plano.

5.2.3 Efeito dos fatores em relação à taxa de utilização

Os gráficos de efeito dos fatores em relação à taxa de utilização, mostrados nas Fig. 5.3, 5.6, 5.9 e 5.12, destacam principalmente o efeito do fator tempo de chegada, embora outros efeitos também se verifiquem para os seguintes fatores: *features* por peça, lotes simulados e quantidade do lote e tipo de plano, respectivamente.

A influência do fator tempo de chegada é negativo, assim o aumento do nível desse fator está relacionado com a redução da utilização dos recursos, pois o aumento do tempo de chegada impõe uma maior ociosidade no sistema, pelo fato do nível aumento do desse fator permitir que eventualmente alguns recursos estejam aguardando a chegada de novas ordens. Evidentemente, a taxa de utilização dos recursos sob essa condição é menor.

Já o fator *features* por peça produz um efeito positivo sobre a taxa de utilização. A razão disso é que o aumento do nível do fator *features* por peça aumenta a complexidade das peças, o que irá demandar um tempo de fabricação maior, e conseqüentemente os recursos serão mantidos ocupados por mais tempo, aumentando a taxa de utilização.

Quanto ao fator lotes simulados, pode-se observar que o mesmo produz um efeito positivo na taxa de utilização. A explicação para isso é que o aumento do fator lotes simulados reduz as chances do sistema ficar ocioso, pois reduz a incerteza quanto à chegada de uma ordem, levando ao aumento da taxa de utilização.

Uma interpretação análoga ao efeito do fator *features* por peça pode ser dada ao efeito produzido pelo fator quantidade do lote, o qual também possui um efeito positivo sobre a taxa de utilização. Isso porque o aumento no nível desse fator está relacionado ao aumento do tempo de fabricação, por isso os recursos serão mantidos ocupados por mais tempo, aumentando a taxa de utilização.

Em relação ao fator tipo de plano, verifica-se que o mesmo influencia positivamente a taxa de utilização. A explicação para esse fato é que o uso de alternativas possibilita selecionar um recurso de menor taxa de ocupação para a fabricação de uma peça.

O efeito dos fatores na taxa de utilização é praticamente o mesmo em ambos os sistemas de manufatura e para ambas as penalidades consideradas. A única exceção

ocorre para o fator tipo de plano, cuja influência é maior no sistema de manufatura desbalanceado, quando comparado ao sistema balanceado. Isso ocorre porque no sistema desbalanceado a possibilidade de existência de recursos ociosos é maior, e dessa forma a seleção de um recurso alternativo permite que haja maiores incrementos na taxa de utilização.

Com base nos gráficos de interação, mostrados nas Fig. 5.15, 5.18, 5.21 e 5.23, observa-se que as maiores interações envolvem todos os fatores relacionados com o tempo de chegada, tendo em vista que o efeito desse fator é bem maior que os demais. Porém percebe-se que a interação entre os fatores tempo de chegada e tipo de plano é mais evidente, sobretudo no sistema desbalanceado, em comparação com o sistema balanceado. Esse fato se deve à maior influencia do fator tipo de plano no sistema desbalanceado.

Outra interação significativa envolve os fatores *features* por peça e tipo de plano, onde o aumento do fator tipo de plano, ou seja, o uso de alternativas, produz um aumento maior na taxa de utilização quando o nível do fator *features* por peça é alto. Essa evidência foi verificada apenas no sistema balanceado, considerando ambas as penalidades. Assim, o aumento da complexidade da peça favorece os ganhos obtidos com o uso de alternativas, em relação à taxa de utilização.

As demais interações são pouco expressivas, e foram verificadas apenas no sistema balanceado. Essas interações envolvem os seguintes fatores: *features* por peça, lotes simulados e quantidade do lote.

Considerando a análise de variância para a taxa de utilização, como mostra as Tabelas 5.4, 5.7, 5.10 e 5.13, verifica-se que os valores da SS apontam os mesmos efeitos evidenciados nos gráficos de efeito e interação, sendo que o efeito das interações mais significativas envolve até quatro fatores. Isso pode ser evidenciado comparando-se o valor da SS de cada interação com o valor do SS dos fatores mais significativos no gráfico de efeito, tais como: tempo de chegada, *features* por peça, lotes simulados, quantidade do lote e tipo de plano.

Uma possível interação entre quatro fatores no sistema desbalanceado seria entre os fatores tempo de chegada, *features* por peça, lotes simulados e quantidade do lote. Essa interação seria semelhante no sistema desbalanceado, entretanto ela iria envolver o fator tipo de plano ao invés do fator *features* por peça. Isso se deve ao fato do fator tipo de plano possuir um efeito mais significativo que o fator *features* por peça no sistema desbalanceado, com efeito inferior apenas ao tempo de chegada.

CAPÍTULO 6
CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e recomendações no uso de alternativas em planos de processo. Assim, inicialmente são descritas algumas conclusões gerais, relativas à análise dos resultados apresentada no capítulo anterior. Essas conclusões são detalhadas para cada um dos critérios de desempenho considerados, nos itens 6.2, 6.3 e 6.4. Depois disso, faz-se uma síntese das conclusões sobre cada critério de desempenho, o que levou à elaboração das recomendações acerca da utilização de alternativas. Essas recomendações podem ser admitidas como diretrizes na implantação de alternativas. O capítulo encerra considerando as possibilidades para realização de trabalhos futuros, contemplando as limitações do estudo.

6.1 Considerações gerais

De um modo geral, a análise dos resultados evidenciou que os fatores tempo de chegada, *features* duplicadas e *features* por peça, lotes simulados, quantidade do lote e tipo de plano, são os que mais influenciam a produtividade, o estoque em processo e a taxa de utilização. No entanto, dentre esse fatores apenas dois são de fato controláveis por sistema de manufatura na prática, esses fatores são: a quantidade do lote e o tipo de plano.

Na maioria dos casos, os demais fatores estão ligados ao ambiente externo do sistema de manufatura. Por exemplo, a complexidade da peça a ser produzida, expressa pelos fatores *features* duplicadas e *features* por peça, é definida pelo cliente, e não pelo sistema de manufatura. Uma exceção é o caso onde o sistema de manufatura engloba o a atividade de projeto, e dessa maneira a peça a ser produzida pode ser alterada visando uma maior adequação aos recursos do sistema.

Já os fatores tempo de chegada e lotes simulados estão relacionados às demandas solicitadas pelos clientes e à variação nessa demanda, respectivamente. Embora a emissão de ordens seja controlada pelo próprio sistema de manufatura, no setor de planejamento e controle da produção (PCP) sua influência é limitada, pois, em última instância, a emissão de ordens pelo PCP reflete a demanda dos clientes. Portanto, esses dois fatores também não são controláveis de fato.

Logo, dos fatores analisados, os fatores realmente controláveis pelo sistema de manufatura são: a quantidade do lote e o tipo de plano. Como a utilização de alternativas em planos de processo não é considerada na maioria das empresas, boa parte dos esforços na melhoria do desempenho se concentra na determinação da quantidade de lote mais adequada.

A determinação do tamanho do lote envolve a produtividade e o estoque em processo. A produtividade é considerada em função do tempo de *set-up*, pois quanto maior o lote menor a quantidade de *set-ups* a serem realizados. Porém, quanto maior o tamanho do lote, maior o estoque em processo.

Assim, a utilização de planos de processo com alternativas propicia mais uma opção para gerir os recursos no chão de fábrica. Para facilitar a compreensão de como essa estratégia pode ser utilizada, a análise do desempenho da utilização de alternativas será detalhada em relação aos três indicadores analisados: produtividade, estoque em processo e taxa de utilização dos recursos.

6.2 Desempenho de alternativas na produtividade

Em relação à produtividade, pode-se verificar uma diferença com relação à influência do uso de alternativas em função do sistema de manufatura considerado, uma vez que o efeito considerando a variação dos demais fatores resultou num ganho de produtividade apenas no sistema de manufatura desbalanceado.

Para se ter uma idéia, a variação da produtividade no uso do plano de processo com alternativas em relação ao sem alternativas, considerando a combinação de todos os fatores, corresponde a um ganho de 12,7% no sistema de manufatura desbalanceado, enquanto que no sistema balanceado houve uma perda de 4,3% na produtividade. Essa conclusão mostra que existe uma grande diferença em relação aos ganhos propalados acerca do uso de alternativas, com relação ao sistema de manufatura considerado. Assim, as suspeitas iniciais que motivaram a simulação do dois sistemas de manufatura estavam corretas.

Considerando as duas diferentes penalidades impostas ao uso de alternativas em planos de processos, pode-se verificar que o sistema desbalanceado apresenta um ganho de produtividade de 14,5% e 10,9% considerando uma penalidade de 20% e 40%, respectivamente. No caso do sistema balanceado, houve perdas de 3,3% e 5,3%, considerando as penalidades de 20% e 40%, respectivamente.

Embora no gráfico de efeito a influência do fator tipo de plano não tenha sido tão expressiva como dos fatores tempo de chegada, *features* por peça e *features* duplicadas, do ponto de vista prático o fator tipo de plano é relevante pois os demais, muitas vezes, não podem ser controlados pelo sistema.

6.3 Desempenho de alternativas no estoque em processo

Quanto ao estoque em processo, o desempenho do uso de alternativas apresentou diferenças em função do sistema de manufatura considerado. No sistema de manufatura balanceado a utilização de alternativas no plano de processo aumentou o estoque em processo em 16,0% em média em relação ao plano sem alternativas. Esse resultado foi

obtido considerando a variação média do efeito da combinação dos demais fatores. Analogamente, no sistema de manufatura desbalanceado, o estoque em processo foi em média 19,0% menor com a utilização de alternativas em planos de processo.

O efeito do aumento da penalidade de 20% para 40% aumentou o estoque em processo no sistema balanceado de 11,3% para 20,7%, enquanto no sistema de manufatura desbalanceado a redução do estoque em processo foi menor com aumento da penalidade. Isto é, a redução de estoque na utilização de alternativas passou de 22,3%, considerando uma penalidade de 20%, para 15,7%, tendo em vista uma penalidade de 40%.

Portanto, tanto do ponto de vista da produtividade como do estoque em processo, num sistema balanceado, mesmo havendo a possibilidade de utilizar um recurso alternativo para a fabricação de uma peça, é desaconselhável sua utilização (tanto considerando um rendimento de 20% ou 40% inferior ao que seria obtido no recurso originalmente proposto).

No caso do sistema desbalanceado, os gráficos de interação mostraram que a redução do estoque em processo com a utilização de alternativas é maior quanto maior for a quantidade do lote, a ociosidade dos recursos, a quantidade de *features* duplicadas ou a incerteza na chegada de ordens (esta associada à ociosidade). Isso ocorre porque o aumento da ociosidade, favorece a seleção de um recurso alternativo. Já o aumento da quantidade do lote garante que o recurso selecionado seja utilizado ininterruptamente. Por outro lado, o aumento da quantidade de *features* duplicadas possibilita o aproveitamento de *set-ups*, embora o sequenciamento das ordens não tenha sido realizado.

6.4 Desempenho de alternativas na utilização dos recursos

A taxa de utilização dos recursos consiste no critério de desempenho mais afetado pela utilização de alternativas em planos de processos, pois em todos os cenários analisados, o uso de alternativas trouxe benefícios com relação a esse critério.

No sistema balanceado, houve um incremento médio de 4,5% na taxa de utilização em relação ao plano de processo sem alternativas, considerando todas as combinações dos demais fatores. Já no sistema desbalanceado, o aumento da taxa de utilização com uso de alternativas em plano de processo foi de 21,3%. Logo, no sistema desbalanceado a vantagem proporcionada pelo uso de alternativas aumenta, pelo fato da probabilidade da existência de eventuais ociosidades ser maior também.

As penalidades consideradas também influenciam o ganho obtido com a utilização de alternativas em relação à utilização. Assim, considerando uma penalidade de 20% nos sistema balanceado, o aumento na taxa de utilização é de 3,4%, já para a penalidade de 40% o aumento da taxa de utilização é de 5,5%. De forma semelhante, no sistema de manufatura desbalanceado, o incremento na taxa de utilização na penalidade de 20% e 40%, corresponde a 20,3% e 22,2%, respectivamente.

Portanto, o aumento da taxa de utilização decorrente do uso de alternativas no plano de processo é favorecido por uma penalidade maior, o que parece evidente já que uma penalidade maior conduz a um aumento no tempo de usinagem. Conseqüentemente, isso ocasiona uma diferença maior na utilização dos recursos, já que a penalidade só é considerada no plano de processos com alternativas.

6.5 Recomendações referentes à utilização de alternativas

Diante das considerações realizadas acerca dos critérios de desempenho considerados, foram definidas algumas recomendações com relação ao uso de alternativas em planos de processo.

A primeira recomendação é com relação ao sistema de manufatura, o qual preferencialmente deve ser desbalanceado. Entretanto, do ponto de vista prático, quase a totalidade dos sistemas de manufatura são desbalanceados, devido à dificuldade encontrada pelo PCP em organizar as tarefas de modo que o fluxo de peças pelo sistema seja o mesmo durante um dado intervalo de tempo. Essa dificuldade advém principalmente da influência de fatores externos, tais como: mudanças na variedade (mix) das peças a serem produzidas, abstenção da mão de obra, realocação de tarefas, indisponibilidade de recursos, etc. Além disso, o sistema considerado como balanceado estava num nível de balanceamento dificilmente alcançado por um sistema real, pois foi definida uma configuração do sistema (operadores e máquinas) que pudesse atender exatamente a demanda de peças geradas.

Quanto à estratégia adotada para definir a utilização de um recursos alternativo, recomenda-se selecionar um recurso com base no estoque em processo. Assim, o recurso com a menor quantidade de lotes aguardando para serem fabricados deve ser preferencialmente selecionado. A vantagem em utilizar essa estratégia é que ela pode ser facilmente implementada no chão de fábrica, pois, em alguns casos, até mesmo visualmente pode-se identificar os recursos com maior estoque. Assim, a adoção dessa estratégia não irá depender da compra de sistemas de controle sofisticados.

É importante reconhecer que a estratégia utilizada também pode ter prejudicado o uso de alternativas no sistema balanceado, isto porque considerando a existência de dois recursos diferentes selecionados num plano de processo com alternativas, se a diferença de estoque em processo entre eles fosse de apenas um lote, era selecionado o recurso definido como alternativo. Nesse caso, o recurso alternativo, que em função das penalidades consideradas detinha uma eficiência menor, era preferido na fabricação de um lote de peças pela diferença de apenas um lote no estoque em processo. Possivelmente em razão disso o uso de alternativas foi prejudicado em relação aos critérios de produtividade e estoque em processo, nos sistemas balanceados.

Recomenda-se também a utilização de poucas alternativas, de preferência apenas duas. Esta conclusão é a mesma apresentada por Usher (2003) e Corti (2004), os quais têm mostrado que é melhor uma baixa quantidade de poucas alternativas do que uma grande quantidade de alternativas de baixa eficiência.

Outra sugestão é priorizar a implementação das alternativas nos planos de processo. Isto significa adotar alternativas num baixo número de planos de processo, mas que possibilite obter elevados ganhos (CORTI, 2004). Essa etapa pode ser executada definindo quais os recursos predominantemente gargalos, e em seguida listar os tipos de peças fabricadas nesses recursos, e suas respectivas demandas. Assim, pode-se priorizar a implantação de alternativas nas peças de maior influência sobre os recursos gargalos.

Da mesma forma que os benefícios na utilização de alternativas varia de um sistema de manufatura para o outro, acredita-se que a penalidade máxima a ser adotada na seleção de uma alternativa também deve variar de um sistema para o outro. Neste trabalho considero-se as penalidades de 20% e 40% atuando sobre o tempo de usinagem, o que corresponde a um percentual idêntico em relação à redução da eficiência no recurso alternativo.

Desse modo, baseado nos resultados obtidos, recomenda-se utilizar uma alternativa cuja eficiência seja no máximo 40% inferior à eficiência do recurso originalmente selecionado, ao menos que haja estudos comprovando que uma penalidade maior possa ser adotada.

Acredita-se também que penalidades maiores que 40% poderão quase anular os ganhos em produtividade. Além do mais, tendo em vista os gastos na implementação das alternativas, ganhos menores poderão conduzir a um maior tempo de retorno sobre o investimento (*return on investment* - ROI).

Deve-se considerar também que o uso de alternativas poderia ser benéfico no sistema balanceado caso não houvesse penalidade no uso de um recurso alternativo, ou seja, que um recurso de eficiência análoga ao originalmente selecionado no plano de processos estivesse disponível.

Enfim, ficou evidenciado que o uso de alternativas ajuda a corrigir algumas distorções existente no sistema de manufatura desbalanceado, sobretudo com relação ao estoque em processo e a utilização dos recursos.

6.6 Recomendações para a realização de estudos futuros

A simulação de dois sistemas de manufatura, sujeitos a duas penalidades diferentes e levando-se em conta sete fatores e três variáveis de resposta, produziu uma quantidade de informações cuja análise seria impraticável sem a utilização das técnicas de projeto de experimentos. Portanto conclui-se que tal técnica é adequada em trabalhos envolvendo uso de modelos de simulação como já evidenciaram alguns autores (NAYLOR et al., 1971; BANKS, 1999; FREITAS FILHO, 2001).

O ambiente computacional utilizando o aplicativo Arena para o desenvolvimento do modelo e realização das simulações também se mostrou adequado, possibilitando compartilhar informações entre outros programas, como o Excel®, durante a execução das simulações. Entretanto, verificou-se que isso acarretou um aumento significativo do tempo de processamento, sendo que cada teste realizado na simulação consumiu um tempo de execução que varia de dez segundos a três minutos, o que é bastante significativo, visto que, para cada cenário simulado, num total de quatro, foram realizadas três replicações com 384 testes em cada uma.

A análise de variância (ANOVA) mostrou que a influência de interações entre mais de dois fatores é relevante. Portanto, embora tais interações sejam pouco comuns acredita-se que elas eventualmente possam existir na simulação de outros sistemas de manufatura.

É importante esclarecer que a estratégia adotada para a seleção de um recurso alternativo foi baseada no estoque em processo. Assim, dentre dois recursos diferentes selecionados para fabricação de um lote de peças, aquele que tivesse a menor quantidade de lotes aguardando para serem fabricados era preferencialmente selecionado. Porém, na hipótese de inexistência de estoque em processo, ou estoques iguais, o recurso previamente selecionado como primeira alternativa era utilizado. Assim, as conclusões apresentadas neste trabalho são válidas para adoção dessa estratégia.

Mesmo assim, acredita-se que pode-se melhorar a estratégia adotada considerando a estratégia de seleção dos recursos alternativos, baseada numa diferença superior a um lote. Por exemplo, um recurso alternativo poderia ser selecionado se a diferença existente entre o estoque em processo, considerando dois recursos previstos para a fabricação da peça fosse de pelo menos dois.

A estratégia de seleção de alternativas baseada no aproveitamento de *set-ups* também deve ser analisada. Essa estratégia pode ser avaliada em termos do número de *features* iguais existentes nos lotes de peças aguardando para serem fabricados em cada recurso. Basicamente, ao invés de selecionar uma alternativa apenas considerando o estoque em processo em dois recursos selecionados, como foi feito nesse trabalho, seria considerada ainda a semelhança entre os lotes no estoque em processo. Assim, poder-se-ia comparar os resultados de ambas as estratégias.

Dessa forma, se uma estratégia de utilização de alternativas no aproveitamento de *set-ups* se mostrar vantajosa, a mesma poderia ser proposta como um procedimento para realização do sequenciamento fino da produção.

Outra oportunidade de extensão deste trabalho consiste em realizar uma análise das recomendações propostas baseada na sua implementação. Dessa maneira, poderia ser selecionado sistema de manufatura que apresentasse as características propostas para implementação de alternativas. Com isso, após a implementação das alternativas, seria

possível avaliar se os resultados esperados foram de fato atingidos e quais as adequações necessárias.

O uso de alternativas neste trabalho foi proposto para utilização em processos industriais do setor metal-mecânico. Entretanto, a proposta deste trabalho poderia ser viabilizada para implementação em sistemas produtivos de outros setores, tais como: alimentos, remédios, móveis, etc.

Neste trabalho utilizaram-se máquinas como recursos alternativos. No entanto, outros tipos de recursos, como ferramentas, poderiam ser utilizados. Assim, poderia ser desenvolvido um trabalho comparando o tipo de recurso alternativo utilizado.

O arranjo utilizado nos sistemas de manufatura considerados neste trabalho foi do tipo funcional (*job shop*). Assim, não foram avaliadas ainda outras possibilidades de arranjo (por exemplo, em linha e posicional), e a sua influência no desempenho de alternativas. Isto porque a hipótese adotada foi de que, para a reduzida quantidade de recursos considerados, o arranjo funcional não difere significativamente dos arranjos em linha ou posicional. Mas seria válido considerar possíveis variações no arranjo e avaliar essa influência no uso e alternativas.

Outra influência da utilização de alternativas talvez possa ser evidenciada em função do maior ou menor grau de desbalanceamento do sistema de manufatura. O sistema de manufatura desbalanceado neste trabalho foi obtido considerando um recurso adicional num sistema balanceado. Por isso, acredita-se que o nível de desbalanceamento considerado seja baixo, comparando o sistema balanceado com o desbalanceado. No entanto tal hipótese poderia ser comprovada, e sua influência compreendida através de um estudo adicional a este respeito.

Do ponto de vista dos critérios de desempenho, outros estudos poderiam contemplar um a utilização do atraso na entrega das ordens como outro possível critério a ser avaliado. Dessa forma, poder-se-ia avaliar o uso de alternativas do ponto de vista da programação da produção.

REFERÊNCIAS

ALTIOK, Tayfur. **Performance Analysis of Manufacturing Systems.** New York: Springers series in operation research, 1996. 355 p.

AMCHAMRIO - Câmara de Comércio Americana. **O Brasil na dinâmica da economia mundial**, Abril 2004. Disponível em: <http://www.amchamrio.com.br/publicacoes/bb/2004/bb_09_04/editorial.htm>. Acesso em: 26 out. 2004.

AZEVEDO, José Carlos. **Acredite, se quiser**. Jornal do Brasil, 06 fev. 2003. Disponível em: <http://www.mre.gov.br/portugues/noticiario/internacional/selecao_detalhe.asp?ID_RESENHA=556>. Acesso em: 26 out. 2004.

BANKS, Jerry, CARSON, John S., NELSON, Barry L., **Discrete-Event System Simulation.** 2.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 548 p.

CAMPOS, Vicente F. **TQC: Controle da Qualidade Total (no estilo japonês).** 7.ed. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Ottoni, 1992. 229 p.

CAPRIHAN, Rahul.; WADHWA, Subhash. **Impact of Routing Flexibility on the Performance of an FMS – A Simulation Study**, International Journal of Flexible Manufacturing Systems, v.9, p. 273-298, 1997.

CARPINETTI, Luiz C. R. **Planejamento e Análise de Experimentos.** São Carlos: Universidade de São Paulo – USP. Escola de Engenharia de São Carlos. Apostila da disciplina, 2000.

CHAN, F. T. S. **Effects of Dispatching and Routeings Decisions on the Performance of a Flexible Manufacture Systems**, International Journal of Advanced Manufacture Technology, v.21, 328-338, 2003.

CHANG, H. C.;CHEN, F. F. **A Dynamic Programming Based Process Planning Selection Strategy Considering Utilization of Machines**, International Journal of Advanced Manufacture Technology, v.19, p.97-105, 2002.

CHANG, Tien-Chien; WYSK, Richard A.; WANG, Hsu-Pin. **Computer-Aided Manufacturing.** 2.ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1998. 748 p.

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.

CORTI, A. Portioli-Staudacher D. **A concurrent engineering approach to selective implementation of alternative processes.** Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, v.20, p.265-280, 2004.

DODGE, M.; KINATA, C.; STINSON, C. **Microsoft Excel 97: guia autorizado Microsoft.** São Paulo: Makron Books, 1998. 1069 p.

FERRARI, Lívia. **Brasil retoma o crescimento no comércio mundial**. Gazeta Mercantil, 19 abril 2004. Disponível em: <http://www.iberoamericaempresarial.com/edicion/noticia/0,2458, 472620,00.html>. Acesso em: 16 out. 2004.

FERREIRA, J. C. E. **Planejamento de Processos**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Apostila da disciplina,1996.

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, 2001a.

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, 2001b.

FREITAS FILHO, Paulo. **Introdução a Modelagem e Simulação de Sistemas: com aplicações em Arena**. Florianópolis: Visual Books, 2001. 322p.

FUNCEX - Fundação Centro de Estudos do Comércio Exterior. **Boletim FUNCEX de Comércio Exterior**, ano VIII, n.10, out. 2004. Disponível em: <http://www.funcex.com.br/ bases/BCE0410.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2005.

GRABOIS, Ana Paula. **Após recorde em abril, taxa de desemprego recua para 12,2% em maio**. Folha Online, 24 junho 2004. Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/folha/ dinheiro/ ult91u85942.shtml>. Acesso em: 16 out. 2004.

IEDI - Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial. **Radiografia das Exportações Brasileiras.** Estudos - Comércio Exterior, 8 de abril de 2003. Disponível em: < http://www.iedi.org.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?UserActiveTemplate=iedi&from_info_index =6&sid=54>. Acesso em: 19 jan. 2005.

KELTON, David, W.; SADOWSKI, Randall P.; SADOWSKI, Deborah A. **Simulation with Arena**. 2. ed. New York: McGraw-Hill series in industrial engineering and management science, 2002. 631p.

KRUTH, J. P. DETAND, J. **A CAPP system for non linear process planning.** Annals of the CIRP, v.41, n.1, p. 489-492, 1992.

LARSEN, N. E.; ALTING, L. **Dynamic Planning Enriches Concurrent Process and Production Planning**, International Journal of Production Research, v.30, n.8, p.1861-1876, 1992.

LAW, Averill M.; KELTON, W. David. **Simulation Modeling and Analysis**. 3.ed. McGraw-Hill, 2000, 760p.

LEE, H.; KIM, S.S. **Integration of Process Planning and Scheduling Using Simulation Based Genetic Algorithms.** International Journal of Advanced Manufacture Technology, v.18, p.586-590, 2001.

MAHMOODI, F.; MOSIER, C. T. **The effects of Scheduling Rules and Routings Flexibility on the Performance of a Randon Flexible Manufacturing Systems**, International Journal of Flexible Manufacturing Systems, v.11, p.271-289, 1999.

MELLO, M. H.; FERREIRA, J. C. E. **Um estudo sobre o uso de alternativas em planos de processo utilizando técnicas de simulação e projeto de experimentos.** In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA - CONEM, 2004, Belém. Anais... Belém: UFPA, 2004.

MRE - Ministério das Relações Exteriores. **Índices de PIB (total e per capita) e Produção Industrial 1970 - 1998**. 2003. Disponível em: <http://www.mre.gov.br/cdbrasil/itamaraty/web/port/economia/industri/produt/q-prod2.htm>. Acesso em: 16 out. 2004.

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of experiments**. 4.ed. John Wiley & Sons, 1997, 704p.

NAYLOR, T. H.; BALANTFY, J. L.; BURDICK, D. S.; CHU, K. **Técnicas de Simulação em Computadores**. Tradução: Edmundo M. Teixeira. Petrópolis: Vozes, 1971, 402 p.

NIEBEL, Benjamin W.; DRAPER, Alan B.; WYSK, Richard **A. Modern Manufacturing Process Engineering**. McGraw-Hill series in industrial engineering and management science, 1998, 986p.

PAULINO, L. A.. **O Brasil, seus sócios e seus negócios**. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/spp/v16n2/12114.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2005.

RAJAMANI, D.; SINGH, N.; ANEJA, Y. P. **Integrated design of cellular manufacturing systems in the presence of alternative process plan.** International Journal of Production Research, v.28, n.8, p.1541-1554, 1990.

REHG, James A., **Computer-Integrated Manufacturing**. Prentice Hall Career & Technology, 1994. 460 p.

SAYGYN, C; CHEN, F. F.; SINGH, J. **Real-Time Manipulation of Alternative Routeings in Flexible Manufacture Systems: A Simulation Study**, International Journal of Advanced Manufacture Technology, v.18, p.755-763, 2001.

SHIMIZU, T. **Simulação em computador digital**, São Paulo: Edgard Blücher. Universidade de São Paulo, 1975. 107p.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. Tradução: Maria Teresa C. Oliveira e Fábio Alher. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 747 p.

STAMM, Harro. **Simulação industrial: uma avaliação de sua utilização no sudeste e sul do Brasil.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Dissertação de mestrado, 1998.

TITEX. **Catálogo de ferramentas**, 1998.

USHER, John M. **Evaluating the impact of alternative plans on manufacturing performance**, Computers & Industrial Engineering, v.45, p.585-596, 2003.

WEINTRAUB, A.; CORMIER, D.; HODGSON, T.; KING, R., WILSON, J. **Scheduling with alternatives: a link between process planning and scheduling**, IEE transactions, v.31, p.1093-1102, 1999.

XIROCHAKIS, P.; KIRITSIS, D.; PERSSON, J. G. **A petrinet technique for process planning cost estimation.** Annals of the CIRP, v.47, n.1, 427-430, 1998.

APÊNDICE

Apêndice I – Tabela com alguns resultados da simulação

Tempo de chegada	Quebra de máquina	Lotes simulados	Qde. do lote	*Features* duplicadas	*Features* por peça	Tipo de plano	Produtividade (pçs/h)	Estoque (pçs)	Utilização (%)
-	-	-	-	-	-	-	17,85	312,00	52,68
-	-	-	-	-	-	+	18,89	253,30	54,40
-	-	-	-	-	+	-	4,25	245,30	59,09
-	-	-	-	-	+	+	4,09	347,00	62,49
-	-	-	-	+	-	-	4,80	244,90	59,00
-	-	-	-	+	-	+	4,50	236,90	60,31
-	-	-	-	+	+	-	1,14	264,40	67,63
-	-	-	-	+	+	+	1,03	242,60	68,87
-	-	-	+	-	-	-	17,79	2255,40	62,28
-	-	-	+	-	-	+	15,52	2389,50	57,64
-	-	-	+	-	+	-	4,78	2557,40	59,54
-	-	-	+	-	+	+	4,04	3541,00	68,24
-	-	-	+	+	-	-	4,40	2355,50	65,07
-	-	-	+	+	-	+	4,31	2913,90	67,53
-	-	-	+	+	+	-	1,16	3911,50	65,64
-	-	-	+	+	+	+	1,14	4044,60	70,43
-	-	+	-	-	-	-	18,19	1225,70	60,60
-	-	+	-	-	-	+	16,82	1077,90	62,22
-	-	+	-	-	+	-	4,53	1348,50	63,50
-	-	+	-	-	+	+	4,67	1400,50	68,58
-	-	+	-	+	-	-	5,07	952,70	64,54
-	-	+	-	+	-	+	4,91	1053,50	65,99
-	-	+	-	+	+	-	1,21	892,90	64,82
-	-	+	-	+	+	+	1,15	1228,80	71,43
-	-	+	+	-	-	-	21,40	11019,10	69,54
-	-	+	+	-	-	+	19,04	12483,80	66,89
-	-	+	+	-	+	-	4,66	14237,10	64,71
-	-	+	+	-	+	+	3,89	8680,90	73,45
-	-	+	+	+	-	-	4,96	8689,70	73,02
-	-	+	+	+	-	+	4,26	11408,90	64,89
-	-	+	+	+	+	-	1,22	12181,30	63,99
-	-	+	+	+	+	+	1,12	15048,80	74,29
-	+	-	-	-	-	-	16,46	362,60	51,37
-	+	-	-	-	-	+	18,07	348,40	54,31
-	+	-	-	-	+	-	3,71	292,80	48,39
-	+	-	-	-	+	+	3,71	380,90	63,86
-	+	-	-	+	-	-	4,69	284,30	60,74
-	+	-	-	+	-	+	4,42	272,90	61,10
-	+	-	-	+	+	-	1,22	265,90	66,52
-	+	-	-	+	+	+	1,00	328,40	68,86

Tempo de chegada	Quebra de máquina	Lotes simulados	Qde. do lote	*Features* duplicadas	*Features* por peça	Tipo de plano	Produtividade (pçs/h)	Estoque (pçs)	Utilização (%)
-	+	-	+	-	-	-	19,09	1683,20	62,62
-	+	-	+	-	-	+	16,99	2607,60	63,46
-	+	-	+	-	+	-	4,33	2592,10	57,79
-	+	-	+	-	+	+	4,15	2413,80	69,52
-	+	-	+	+	-	-	4,70	2420,80	68,44
-	+	-	+	+	-	+	4,73	2365,00	67,65
-	+	-	+	+	+	-	1,16	3264,30	63,52
-	+	-	+	+	+	+	1,10	4161,20	69,11
-	+	+	-	-	-	-	15,61	1482,50	55,90
-	+	+	-	-	-	+	16,01	1094,40	51,01
-	+	+	-	-	+	-	4,31	1770,90	62,27
-	+	+	-	-	+	+	3,80	1040,70	66,79
-	+	+	-	+	-	-	5,16	1043,70	62,81
-	+	+	-	+	-	+	4,79	992,90	62,48
-	+	+	-	+	+	-	1,15	1051,40	64,07
-	+	+	-	+	+	+	1,08	1106,30	71,32
-	+	+	+	-	-	-	20,76	10589,60	65,57
-	+	+	+	-	-	+	18,52	11935,40	64,86
-	+	+	+	-	+	-	5,25	13533,60	66,93
-	+	+	+	-	+	+	4,84	14317,80	73,20
-	+	+	+	+	-	-	5,12	9464,90	72,88
-	+	+	+	+	-	+	4,81	9963,70	65,59
-	+	+	+	+	+	-	1,22	11813,00	65,61
-	+	+	+	+	+	+	1,18	14558,00	73,20
+	-	-	-	-	-	-	15,55	33,80	43,71
+	-	-	-	-	-	+	15,41	44,60	44,89
+	-	-	-	-	+	-	3,36	33,20	50,35
+	-	-	-	-	+	+	3,24	47,40	49,57
+	-	-	-	+	-	-	3,55	32,10	47,34
+	-	-	-	+	-	+	3,45	34,00	46,30
+	-	-	-	+	+	-	0,79	23,00	46,56
+	-	-	-	+	+	+	0,80	29,00	47,47
+	-	-	+	-	-	-	13,03	397,00	44,21
+	-	-	+	-	-	+	13,20	536,80	48,93
+	-	-	+	-	+	-	3,38	293,00	48,10
+	-	-	+	-	+	+	3,38	319,90	46,71
+	-	-	+	+	-	-	3,06	234,20	44,64
+	-	-	+	+	-	+	3,18	420,00	47,81
+	-	-	+	+	+	-	0,81	264,10	48,13
+	-	-	+	+	+	+	0,82	299,90	48,55
+	-	+	-	-	-	-	13,70	84,40	50,17
+	-	+	-	-	-	+	14,00	62,10	52,57
+	-	+	-	-	+	-	3,54	34,80	48,86
+	-	+	-	-	+	+	3,46	54,70	49,92
+	-	+	-	+	-	-	3,61	37,20	47,77
+	-	+	-	+	-	+	3,63	40,70	49,44
+	-	+	-	+	+	-	0,83	24,40	46,60
+	-	+	-	+	+	+	0,82	36,90	48,08