

SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE MANUFATURA BASEADA NA GEOMETRIA DA PEÇA

Resumo: Atualmente com a diversificação dos produtos demandados, os sistemas de manufatura têm se tornado cada vez mais complexos e de difícil operacionalização. Dificilmente o responsável pela manufatura tem toda a informação necessária para antever os detalhes necessários a sua execução. Por outro lado, as empresas não dispõem de tempo nem recursos para testar alternativas de manufatura no sistema real. Com isso, a simulação baseada na geometria da peça se torna importante, pois retrata fielmente as características do produto a ser manufaturado, facilitando a gestão da manufatura. O objetivo deste trabalho é mostrar como simular sistemas de manufatura a partir da geometria da peça composta pelas Features. A partir dessas simulação, o usuário pode tomar decisões relacionada aos tempos e aos custos de manufatura sem alterar o cotidiano da empresa. Para o desenvolvimento do trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica das áreas de Sistemas de Manufatura, Simulação e Features. A metodologia de pesquisa do trabalho é de natureza aplicada, a forma de abordar é a quantitativa, é uma pesquisa exploratória e o procedimento técnico utilizado na pesquisa foi a simulação. Para analisar as vantagens e as limitações da abordagem proposta no trabalho foi realizada a simulação de um sistema de manufatura específico.

Palavras-chave: sistema de manufatura, simulação, features.

1. INTRODUÇÃO

Com a globalização dos mercados e a diversificação de produtos demandados, os sistemas de manufatura têm se tornado cada vez mais complexos e de difícil operacionalização. Dificilmente o responsável pela produção tem toda a informação necessária para antever todos os detalhes necessários a sua execução. Por outro lado, as empresas não dispõem de tempo nem recursos para testar alternativas de produção no sistema real, pois acarreta em paradas de máquinas e operários, gerando assim um alto custo.

Para atender a demanda de produtos dos mercados, as organizações precisam analisar qual é a melhor forma (roteiros de produção, recursos e arranjos físicos) de fabricar tais produtos. A partir dessas análises, os gestores podem tomar decisões mais acuradas, acarretando menores erros e possíveis melhorias nos sistemas de manufatura.

Para analisar e propor melhorias para sistemas de manufatura a ferramenta simulação computacional pode ser utilizada. Com a simulação podem ser desenvolvidos cenários baseados em diversos tipos de variáveis como, por exemplo, tipos de processos e produtos e tipos de layouts.

Nesse artigo a premissa utilizada para o desenvolvimento da simulação são as geometrias das peças a serem fabricadas. As peças são compostas pelas features que são responsáveis por relacionar um conjunto de informações referentes aos aspectos do projeto de um produto com a manufatura. Por exemplo, na usinagem de uma peça, as features são volumes a serem removidos da peça.

O objetivo deste trabalho é abordar a simulação de sistemas de manufatura a partir da geometria da peça composta pelas features. A partir dessas simulações, o usuário poderá analisar cenários com indicadores como: custo e tempo total de manufatura; custo e tempo de fabricação por features e de movimentação entre recursos de fabricação num sistema de manufatura específico e; o tempo de fila em cada recurso do sistema sem alterar o cotidiano da empresa.

O processo de desenvolvimento deste trabalho com relação à metodologia de pesquisa é classificado da seguinte forma: é de natureza aplicada, pois tem como objetivo gerar conhecimentos para aplicação prática em sistemas de manufatura; a forma de abordar é a quantitativa devido ao fato de utilizar equações matemáticas para calcular os indicadores da simulação; é uma pesquisa exploratória, pois visa uma maior familiaridade com o problema de gestão de sistemas de manufatura, além de envolver um levantamento bibliográfico da área. O procedimento técnico utilizado nessa pesquisa foi a simulação.

Para analisar as vantagens e as limitações da abordagem proposta no trabalho foi realizada a simulação de um sistema de manufatura específico. Essa abordagem consistiu na simulação de três cenários de um sistema hipotético e após foi realizada uma análise dos seus resultados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistema de Manufatura

Segundo Moreira (2008), um Sistema de Manufatura (SM) é um conjunto de atividades e operações necessárias para a produção de produtos envolvendo os seguintes elementos: insumos, o processo de transformação e os produtos fabricados. Já Black (1998) afirma que SM é um arranjo complexo de elementos físicos caracterizados por parâmetros mensuráveis. Dentre os elementos físicos importantes destacam-se: pessoas, processos, equipamentos, estoque e manuseio de materiais. Dentre os parâmetros mensuráveis destacam-se: taxa de produção, estoque em processo, tempo de atravessamento, custo total ou unitário, entre outros.

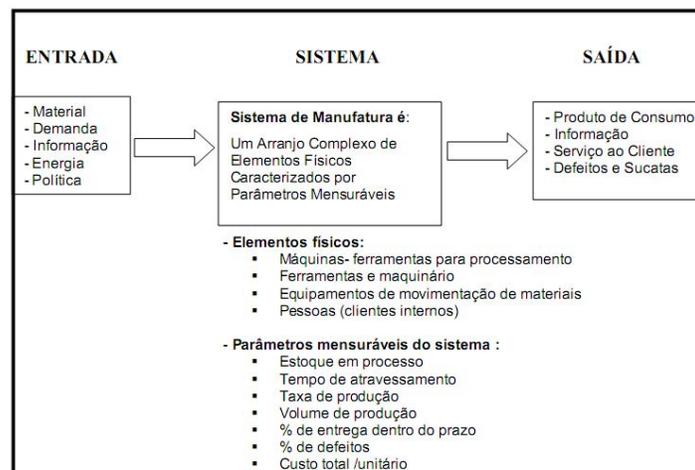


Figura 1. Sistema de manufatura. Fonte: Black (1998)

Os sistemas de manufatura são compostos basicamente por dois subsistemas principais que são: fabricação e movimentação de materiais. Uma característica básica destes subsistemas é que por eles fluem diversos itens como peças, materiais, que passam seqüencialmente pelos subsistemas, onde transformações apropriadas são realizadas até obter o produto final requerido de acordo com especificações da qualidade (PALOMINO, 2001).

Conforme Agostinho *et al.* (2004), os processos de fabricação têm como objetivo a modificação de um material, com o fim de lhe conferir uma forma definida. Cada processo de fabricação possui características específicas que o torna particular no que concerne às formas como trata os materiais.

De acordo com Resende (1993), os principais processos para fabricação de peças brutas ou acabadas podem ser divididos em dois grupos: processos com remoção de material (usinagem) e processos sem remoção de material (fundição, metalurgia do pó, conformação mecânica e soldagem).

Este trabalho aprofundou-se nos processos de usinagem convencional. Segundo Ferraresi (1985), os processos de usinagem convencional compreendem aqueles que, ao conferir à peça a forma, as dimensões, o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco. Entende-se por cavaco a porção de material da peça retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar, em geral, uma forma geométrica irregular.

A movimentação interna na manufatura é responsável por toda a movimentação dos produtos ou peças dentro do sistema de manufatura. De acordo com Arnold (1999), o manuseio de materiais consiste no transporte à curta distância que ocorre no interior ou em torno de uma edificação como um centro de distribuição ou uma fábrica. Equipamentos ou métodos de movimentação interna ineficientes podem acarretar altos custos para a organização devido ao fato de que as atividades de movimentação são repetidas muitas vezes ao longo de um período de tempo e envolvem a segurança e integridade dos produtos e dos operários participantes do sistema de manufatura.

Segundo Ballou (2006), o equipamento de movimentação ou manuseio de material é diferenciado pelo seu grau de uso especializado e pela extensão da força manual para operá-lo. Existem três categorias principais de equipamentos:

- Equipamento Manual: são equipamentos de baixo custo e com grande flexibilidade. No entanto, a utilização desses equipamentos é limitada em função da capacidade física dos operadores. Exemplos: carrinhos de duas rodas e as paleteiras de quatro rodas;
- Equipamento Misto: são equipamentos que unem a rapidez, eficiência com flexibilidade e custo relativamente baixo. Exemplos: guindastes, elevadores, guinchos, esteiras transportadoras e empilhadeira mecânica;
- Equipamento Mecanizado: são equipamentos controlados por computadores, códigos de barras e tecnologia de escaneamento. Exemplos: Veículos Guiados Automaticamente (AVGs).

2.2. Simulação de Sistemas de Manufatura

O uso de simulação em sistemas de manufatura tem aumentado significativamente nos últimos anos. Existem várias razões para este crescimento, dentre elas, a busca para aumentar a qualidade e produtividade, reduzindo, conseqüentemente, os custos. Outro fator importante é a popularização da utilização da simulação nas empresas, assim como o aumento da capacidade de recursos (*hardware e software*) para realização da simulação.

De acordo com Banks *et al.* (1996), a simulação é uma das ferramentas mais amplamente utilizada em sistemas de manufatura do que em qualquer outra área. O'Kane *et al.* (2000) afirmam que a simulação tem se tornado uma das técnicas mais populares para se analisar problemas complexos em sistemas de manufatura.

Conforme O'Kane *et al.* (2000), os sistemas de manufatura modernos consistem em muitas operações que ocorrem aleatória e não linearmente, dessa forma, a modelagem por simulação torna-se um dos mais populares e eficientes meios de análise desses sistemas.

Através da simulação pode-se prever o comportamento de sistemas de manufatura ou o efeito da mudança de um parâmetro em seu funcionamento. Para Harrell *et al.* (2000), a simulação fornece um meio para validar se as melhores decisões estão sendo tomadas e evita técnicas de tentativa e erro.

De acordo com Ryan e Heavey (2006), os sistemas de manufatura são complexos e difíceis no que tange ao seu entendimento e à sua operacionalização de forma eficiente. Devido à sua grande versatilidade, flexibilidade e poder de análise, a simulação é uma das técnicas mais amplamente utilizadas nestes tipos de sistemas.

Para Pegden (1990), a simulação é utilizada na manufatura de três formas distintas:

- Como ferramenta de projeto e análise de *layouts*, de compra de máquinas, de avaliação de políticas alternativas;
- Como ferramenta de planejamento, pois o seu uso permite ao tomador de decisão explorar, planejar e avaliar mudanças no planejamento a fim de obter a otimização do mesmo;
- Como parte de sistemas em tempo real com ou sem a intervenção humana.

2.3. Features de Manufatura

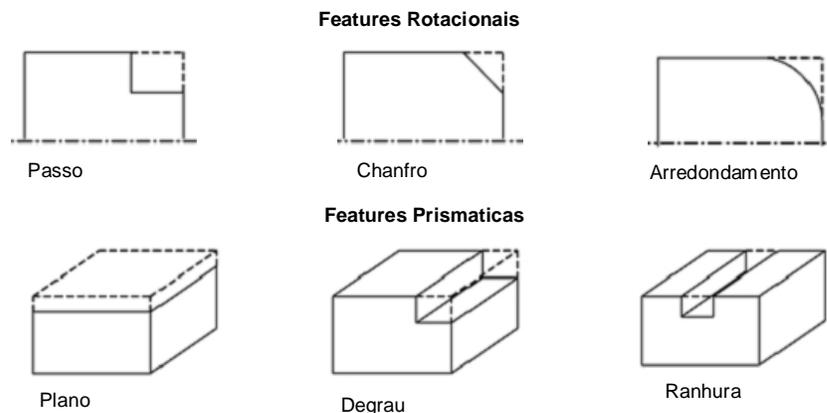
Segundo Lee (2004), a *feature* pode ser definida de diversos pontos de vista, tais como, projeto, análise, montagem, ou diversas funções relativas à manufatura. Para Gao *et al.* (2004), as *features* são usadas para dar um significado ao produto com relação aos seus atributos e sua geometria e melhoram a comunicação entre o projeto e a fabricação. As *features* correspondem a uma forma de representar o significado de engenharia numa peça, ou de um processo de manufatura, através de entidades geométricas.

De acordo com Maziero (1998), a principal vantagem da utilização das *features* num sistema de manufatura é a maior rapidez em produzir uma interligação do projeto com a fabricação, havendo, conseqüentemente, redução do custo final do produto. Outras vantagens são: não induz a erros ou distorções de interpretação pelo sistema, pois o objeto modelado sempre corresponderá a uma representação validada pelo próprio usuário e possibilita o desenvolvimento de aplicações que verificam as condições de manufatura, de forma a validar o modelo geométrico antes da manufatura.

Neste trabalho foram utilizadas *features* de manufatura. De acordo Farias (2008), entende-se por *features* de manufatura aquelas características geométricas extraídas do sistema CAD (*Computer-Aided Design*) e que possam ser fabricadas com recursos disponíveis, como máquinas. Complementam Han e Reguicha (1998) dizendo que uma *feature* de manufatura é tipicamente uma *feature* de forma negativa associada às características do processo de usinagem.

Segundo Lui e Wang (2007), *features* de manufatura são definidas como o volume retirado na operação de manufatura. Esse volume corresponde ao material que é removido na operação de usinagem. Essas *features* de manufatura têm uma forma padrão a partir de um conjunto de informações sobre como fabricar, ou seja, fornecem uma indicação quanto ao tipo de operação e às máquinas que serão necessárias para fabricar a *feature*.

Jung (2002) classifica as *features* de manufatura em quatro classes que são: rotacional; prismática; cavidade e; rotativa. Para cada classe de *features* utiliza-se processos de usinagem deferentes, por exemplo, na *feature* rotativa furo utiliza-se o processo de fabricação furação ou alargamento. A Figura 2 mostra os diferentes tipos de *features*.



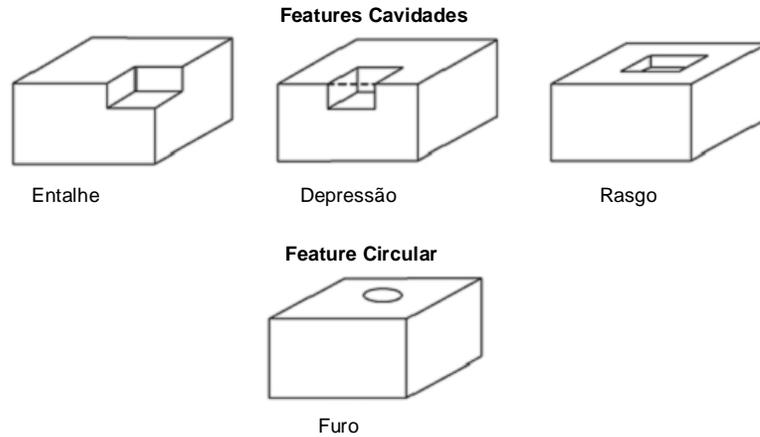


Figura 2. Tipos de features. Fonte: Jung (2002)

Segundo Jung (2002), a vantagem de calcular o custo de fabricação/manufatura baseado na tecnologia de *features* é a possibilidade de lidar com um número infinito de formas geométricas da peça manufaturada a partir das informações fornecidas pelas *features*. O cálculo do custo é baseado no tempo de usinagem e no custo do material. O tempo de usinagem é composto pelo tempo de *setup*, tempo de operação e tempo de não operação. O tempo de operação e de não operação são proporcionais à quantidade de produção. O tempo de *setup* é proporcional ao tamanho do lote, ou seja, o tempo de *setup* por peça é o tempo de *setup* dividido pelo tamanho do lote. O cálculo do tempo e custo de manufatura são realizados de acordo com as equações 1 e 2.

$$T_m = T_{su} + T_{ot} + T_{no} \quad (1)$$

$$C_m = (R_o + R_m) \left(\frac{T_{su}}{Q} T_{ot} + T_{no} \right) + C_{ma} \quad (2)$$

Onde:

- T_m – tempo de manufatura (min)
- T_{su} – tempo de *setup* (min)
- T_{ot} – tempo total de operação (min)
- T_{no} – tempo total de não-operação (min)
- C_m – custo de manufatura (R\$/peça)
- R_o – salário do operador (R\$/hora)
- R_m – salário da máquina (R\$/hora)
- Q – tamanho do lote de produção (unid)
- C_{ma} – custo do material (R\$/peça)

O tempo total de *setup* de um lote de peças é o somatório do tempo de *setup* das máquinas utilizadas e do tempo de *setup* de cada ferramenta utilizada na máquina (JUNG, 2002).

$$T_{su} = \frac{\sum_i ta_i + \sum_i \sum_j tb_{ij}}{Q} \quad (3)$$

Onde:

- ta_i – tempo de *setup* da máquina (min)
- tb_{ij} – tempo de *setup* das ferramentas (min)
- i – quantidade total de máquinas (unid)
- j – quantidade total de ferramentas (unid)

De acordo com Jung *et al.* (2000), o tempo total de operação é composto pelo tempo de corte (desbaste), o tempo de acabamento e o tempo de aproximação da ferramenta de acordo com a equação 4.

$$T_{ot} = \sum_{i=0}^n Tr_i + \sum_{i=0}^n Tf_i + \sum_{j=0}^m Ta_j \quad (4)$$

Onde:

Tr_i – tempo de corte (desbaste) da *feature* (min)

Tf_i – tempo de acabamento da *feature* (min)

Ta_j – tempo de aproximação da ferramenta (min)

n – quantidade de *features* na peça (unid)

m – quantidade de ferramentas utilizadas (unid)

Conforme Jung (2002), o tempo de corte (desbaste) é proporcional ao volume removido na usinagem da peça. O volume de usinagem removido é diretamente proporcional ao volume das *features* de manufatura que pode ser obtido através de cálculos matemáticos de acordo com a Tabela 1 e equação 5. Assume-se que o tempo de corte é calculado para a máxima potência da máquina e que a máquina possui força suficiente para cortar o material.

$$T_r = \frac{V_r}{MRR} \quad (5)$$

$$MRR_r = d \times f \times s \quad (6)$$

$$MRR_p = D \times d \times s \quad (7)$$

$$MRR_{ca} = l \times d \times s \quad (8)$$

$$MRR_{ci} = A \times f \quad (9)$$

Onde:

V_r – volume do material removido (mm^3)

MRR_r – taxa de remoção do material de *features* rotacionais (mm^3/min)

MRR_p – taxa de remoção do material de *features* prismáticas (mm^3/min)

MRR_{ca} – taxa de remoção do material de *features* cavidades (mm^3/min)

MRR_{ci} – taxa de remoção do material de *features* circulares (mm^3/min)

d – profundidade do corte (mm)

D – diâmetro do corte (mm)

l – comprimento do corte (mm)

f – avanço (mm)

s – velocidade de corte (mm/min)

A – capacidade da broca (mm^2/min)

Tabela 2. Cálculo do volume das principais *features*. Fonte: Jung (2002)

Tipos de <i>Features</i>	Volume (mm^3)
Passo	$\pi \times (\text{DiâmetroMaior}^2 - \text{DiâmetroMenor}^2) (\text{Largura}/4)$
Chanfro	$\pi \times ((\text{DiâmetroMaior}^2 \times \text{DiâmetroMenor}^2)/4 - (\text{DiâmetroMenor}^2/12)) \times \text{Largura}$
Arredondamento	$\pi \times \text{RaioMaior}^2 \times (\text{RaioMaior} - \text{RaioMenor}) - \pi \times [(\text{RaioMaior} - \text{RaioMenor}) \times \text{RaioMenor}^2 + (\text{RaioMaior} - \text{RaioMenor})^2 \times \text{RaioMenor} \times \pi/2 + (\text{RaioMaior} - \text{RaioMenor})^3 \times 2/3]$
Plano	Altura x Comprimento x Largura
Degrau	Altura x Comprimento x Largura
Ranhura	Altura x Comprimento x Largura
Entalhe	Altura x Comprimento x Largura
Depressão	Altura x Comprimento x Largura
Rasgo	Altura x Comprimento x Largura
Furo	$\pi \times (\text{Diâmetro}^2 (\text{Altura}/4))$

Além da operação de desbaste outro tipo de operação realizada na usinagem é o acabamento. Esta operação não está fortemente associada à remoção de material da peça, mas à precisão dimensional e à rugosidade da superfície. O tempo de acabamento é proporcional à área de corte das *features*, que pode ser obtida por equações matemáticas de acordo com a Tabela 2. O tempo de acabamento é obtido a partir da equação 10 (JUNG, 2002).

$$T_f = \frac{A_f}{R_t} \quad (10)$$

Onde: A_f – área da *feature* (mm^2); R_t – taxa de remoção da área da *feature* (mm^2/min)

Tabela 3. Cálculo da área das principais *features* Fonte: Jung (2002)

Tipos de Features	Área (mm ²)
Passo	$\pi \times \text{DiametroMenor} \times \text{Largura} + \pi \times (\text{DiametroMaior}^2 - \text{DiametroMenor}^2)/4$
Chanfro	$\pi \times (\text{RaioMaior} + \text{RaioMenor}) \times \sqrt{\text{Largura}^2 + (\text{RaioMaior} - \text{RaioMenor})^2}$
Arredondamento	$\pi^2 \times (\text{RaioMaior} - \text{RaioMenor}) \times \text{RaioMenor} + 2 \times \pi \times [(\text{RaioMaior} - \text{RaioMenor})^2]$
Plano	Comprimento x Largura
Degrau	Altura x Comprimento + Comprimento x Largura
Ranhura	Altura x Comprimento + Comprimento x Largura
Entalhe	Altura x Comprimento x+ Comprimento x Largura + Altura x Largura
Depressão	Altura x Comprimento + 2 Comprimento x Largura + Altura x Largura
Rasgo	Altura x Comprimento + 2 Comprimento x Largura + 2 Altura x Largura
Furo	$\pi \times \text{Diâmetro} \times \text{Altura}$

Segundo Jung *et al.* (2000), o tempo de aproximação da ferramenta varia de acordo com o tipo de máquina, o diâmetro da peça e localização de repouso da ferramenta. Geralmente, o tempo de aproximação é muito pequeno comparado com o tempo de corte, sendo em muitas situações estimado baseado no tempo de corte.

O tempo de não operação ou tempo improdutivo (T_i) de acordo com Diniz *et al* (2001) estão divididos em duas parcelas de acordo com as equações 11 e 12:

- Tempo improdutivo referente à colocação, inspeção e retirada da peça, aproximação e afastamento da ferramenta e preparo da máquina para usinagem de um lote, que é independente da velocidade de corte;
- Tempo relacionado com a troca da ferramenta. Quanto maior a velocidade de corte, menor a vida da ferramenta e maior é o número de paradas da máquina para sua substituição.

$$T_i = T_{im} + T_{fr} \quad (11)$$

$$T_{fr} = \left(\frac{T_c}{T} - \frac{1}{Z} \right) T_{ft} \quad (12)$$

Onde:

T_{im} – tempo improdutivo independente da velocidade de corte (min)

T_{fr} – tempo improdutivo para a troca da ferramenta (min)

T – tempo de vida da ferramenta (min)

Z – número de peças do lote (unid)

T_{ft} – tempo de troca de ferramenta (min)

3. SIMULAÇÃO DE SISTEMA DE SISTEMA DE MANUFATURA BASEADO NA GEOMETRIA DA PEÇA

3.1. Introdução

Para a realização da simulação de sistemas de manufatura a partir das *features* da peça foi desenvolvido um programa composto de quatro módulos que são: banco de dados, planejamento, simulação e interface gráfica com o usuário. Esses módulos estão interligados entre si e cada um desempenha uma função específica:

- Banco de dados: armazena os dados relativos às peças, às *features* e aos recursos que compõem o sistema;
- Planejamento: defini a sequência de produção a partir dos objetos armazenados na base de dados;
- Simulação: executa as atividades que ocorrerão ao longo da simulação. Esse módulo funciona como um núcleo da simulação e é responsável pela coordenação da simulação, controlando as relações entre os componentes do sistema ao longo da simulação;
- Interface Gráfica com Usuário: corresponde à interface gráfica que permite a interação amigável entre o usuário e o programa gerando acesso aos outros módulos.

Este trabalho detalha o módulo de simulação, porém é importante definir os outros módulos do programa, pois eles são fornecedores de dados para o funcionamento da simulação. Esses dados ou parâmetros necessários para simulação que são armazenados no banco de dados ou definidos no módulo de planejamento são:

- Parâmetros relacionados à simulação: tempo de chegada de peças no sistema de manufatura e a quantidade de peças a serem simuladas;
- Parâmetros relacionados às peças: comprimento, largura e altura;
- Parâmetros relacionados às *features*: comprimento, largura, altura, diâmetro, raio maior e raio menor;

- Parâmetros relacionados aos recursos de fabricação: o custo de mão-de-obra, o custo da máquina-ferramenta, o custo da(s) ferramenta(s), o diâmetro do corte, à profundidade do corte, o comprimento do corte, o avanço, à velocidade de corte, à capacidade da broca, a taxa de acabamento, percentual do tempo improdutivo de corte, o tempo de vida da ferramenta e o tempo de troca da ferramenta;
- Parâmetros relacionados aos recursos de transporte das peças: à velocidade, à distância, o percentual do tempo improdutivo de transporte e o custo por unidade de tempo.

3.2. Lógica da Simulação

A simulação inicia após a especificação das configurações (sequência de produção) do sistema de manufatura a ser simulado bem como o conjunto de parâmetros de cada objeto que compõem o banco de dados do sistema.

No instante zero inicia-se o processamento da primeira peça no primeiro recurso da sequência de produção. Essa peça será processada de acordo com o cálculo de tempo de processamento do recurso. Nos recursos de fabricação esse cálculo é realizado de acordo com o tipo da *feature* (prismática, rotacional, cavidade e circular) detalhado na seção 2.3. Nos recursos de transporte o tempo de processamento é obtido pela razão da distância entre os recursos de fabricação pela velocidade do transportador. A cada processamento na peça os indicadores relativos aos recursos são atualizados.

As peças são inseridas no sistema de manufatura de acordo com o tempo de chegada de peças. Se o recurso estiver ocupado, a peça espera numa fila do recurso até a próxima atualização da simulação. A simulação é atualizada de acordo com o passo de simulação. Esse passo é igual ao menor tempo dentre o tempo de chegada de peças no sistema e o menor tempo de processamento dentre os recursos de fabricação e transporte. A cada atualização o sistema verifica o status (livre ou ocupado) de cada recurso do sistema e atualiza a localização da peça. O passo da simulação é incrementado até o final da produção da última peça a ser simulada.

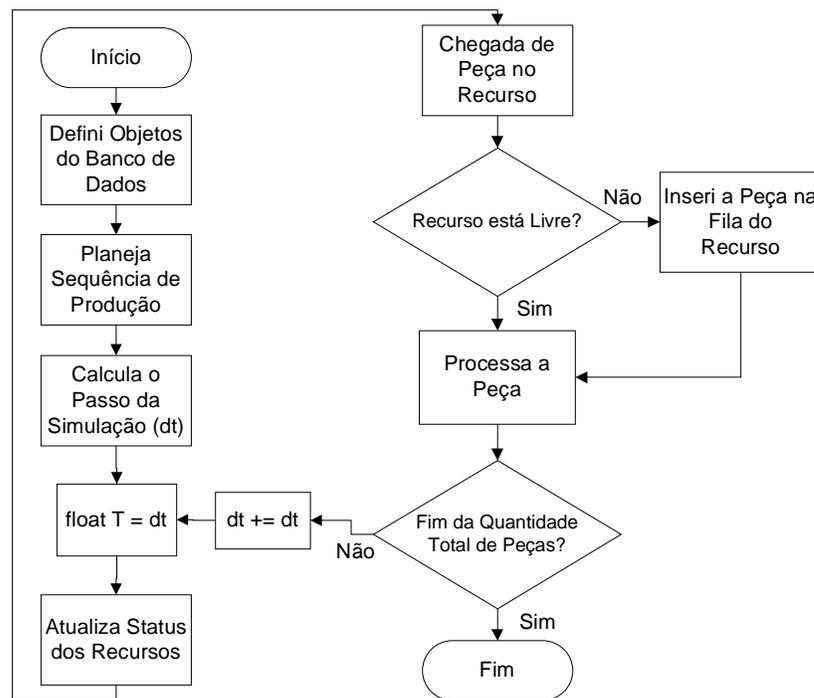


Figura 3. Resumo da lógica de simulação do sistema

3.3. Cenários Propostos

Para uma melhor análise da abordagem proposta neste trabalho foram construídos três cenários a serem simulados. Os três cenários são compostos por três recursos de fabricação e dois recursos de transporte. Cada recurso de fabricação produz uma *feature* e o recurso de transporte movimenta as peças entre os recursos de fabricação. Os objetos participantes dos cenários são detalhados na Tabela 3. Os parâmetros de entrada da simulação, das peças, das *features* e dos recursos de fabricação e transporte são detalhados nas Tabelas 4, 5, 6 e 7.

Tabela 3. Objetos dos cenários simulados

Peça	Tipos de <i>Feature</i>	Recurso de Fabricação	Recurso de Transporte
Platô	Degrau, Entalhe e Furo	Fresa, Torno e Furadeira	Esteira e Operário

Tabela 4. Parâmetros de entrada

Tempo Entre Chegada de Peças (min)	Quantidade de Peças (und)
6,0	100

Tabela 5. Parâmetros da peça

Descrição	Material	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura(mm)
Platô	Aço ABNT 1040	350,00	160,00	90,00

Tabela 6. Parâmetros das features

Feature	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)
Degrau	80	160	20	
Entalhe	100	60	40	
Furo			90	25

Tabela 7. Parâmetros dos recursos de fabricação e transporte

FABRICAÇÃO				TRANSPORTE		
Parâmetros	Fresa	Torno	Furad.	Parâmetros	Esteira	Operário
Salário Operador (R\$/hora)	4,00	4,00	4,00	Velocidade (m/min)	15,00	50,00
Salário Máquina (R\$/hora)	10,00	9,00	6,00	Distância (m)	3,00	4,00
Custo Ferramenta (R\$/mm ³)	0,60	0,70	0,30	Per.Tempo Improdutivo (%)	2,00	20,00
Diâmetro Corte (mm)	120,00	90,00	0,00	C. Unid. Tempo (R\$/min)	0,20	0,08
Profundidade Corte (mm)	20,00	40,00	0,00			
Comprimento Corte (mm)	80,00	100,00	0,00			
Avanço (mm/v)	0,00	0,00	5,00			
Velocidade de Corte (mm/min)	30,00	28,00	0,00			
Per.Tempo Improdutivo (%)	12,00	24,00	17,00			
Tempo Vida Ferramenta (min)	15,00	8,00	20,00			
Tempo Troca Ferramenta (min)	0,80	1,10	0,90			
Capacidade Broca (mm ² /min)	0,00	0,00	3.000			
Taxa Acabamento (mm ² /min)	5.000	10.000	0,00			

O primeiro cenário foi utilizado como base para a análise da simulação em que a máquina Fresa produz a *feature* degrau, a máquina Torno produz a *feature* entalhe, a máquina Furadeira produz a *feature* furo e os transportadores Esteira e Operário movimentam as peças entre as máquinas. Em seguida foi modelado o segundo cenário alterando a ordem dos recursos de fabricação de acordo com a Figura 4. Esse cenário foi proposto para a análise do impacto na mudança do recurso restritivo de localização.

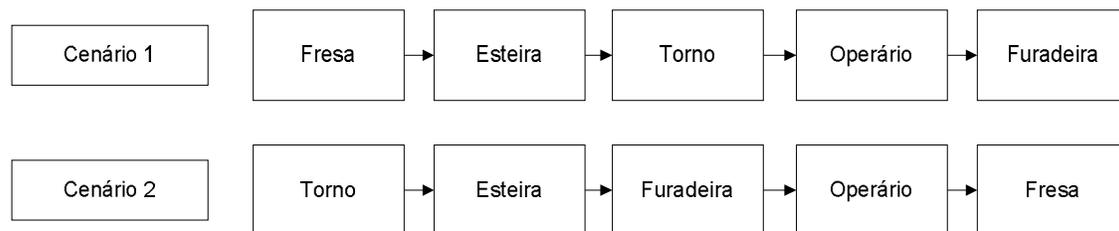


Figura 4. Sequência de produção dos cenários 1 e 2

O terceiro cenário proposto tem a mesma sequência de produção do primeiro cenário, porém a máquina Fresa passou a produzir a *feature* entalhe e a máquina Torno passou a produzir a *feature* degrau. Essa mudança foi proposta para a análise da melhor máquina para produzir cada *feature*.

3.4. Resultados Obtidos

Os resultados da simulação podem ser do sistema de manufatura como um todo ou particular de partes integrantes do sistema. Os indicadores utilizados na análise dos cenários propostos consistem em:

- Tempo Processamento por Recurso: é o tempo por recurso para a fabricação ou o transporte da quantidade de peças simuladas;

- Custo Processamento por Recurso: é o custo por recurso para produção da quantidade de peça simulada. O cálculo do custo no recurso de fabricação foi mostrado na seção 2.3. No recurso de transporte é igual ao tempo de processamento multiplicado pelo custo por unidade de tempo;
- Tempo de Espera/Fila por Recurso: é o tempo improdutivo das peças paradas na fila dos recursos;
- Tempo Médio de Processamento: é a divisão da soma dos tempos de processamento de todos os recursos utilizados na produção das peças pela quantidade de peças produzidas;
- Custo Médio de Processamento: é a divisão da soma dos custos de processamento de todos os recursos utilizados na produção das peças pela quantidade de peças produzidas;
- Tempo Médio de Fila: é a divisão da soma dos tempos de esperas nas filas de todos os recursos pela quantidade de peças produzidas;
- Tempo Total de Produção: é a soma dos tempos de processamento e de espera de todos os recursos do sistema;
- Tempo Médio de Produção: é o tempo total de produção dividido pela quantidade de peças produzidas.

As Tabelas 8 e 9 mostram os comparativos entre os resultados da simulação dos três cenários propostos.

Tabela 8. Comparativo dos resultados da simulação por recurso dos três cenários

Recurso	Indicador	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Recurso Fresa	Tempo Processamento (min)	704,38	704,38	594,85
	Custo Processamento (R\$)	224,35	224,35	198,79
	Tempo de Fila (min)	69,70	62,34	0,00
Recurso Esteira	Tempo Processamento (min)	20,40	20,40	20,40
	Custo Processamento (R\$)	4,08	4,08	4,08
	Tempo de Fila (min)	0,00	0,00	0,00
Recursos Torno	Tempo Processamento (min)	418,07	418,07	492,74
	Custo Processamento (R\$)	160,58	160,58	176,76
	Tempo de Fila (min)	0,00	0,00	0,00
Recurso Operário	Tempo Processamento (min)	9,60	9,60	9,60
	Custo Processamento (R\$)	0,76	0,76	0,76
	Tempo de Fila (min)	0,00	0,00	0,00
Recurso Furadeira	Tempo Processamento (min)	356,93	356,93	356,93
	Custo Processamento (R\$)	89,48	89,48	89,48
	Tempo de Fila (min)	0,00	0,00	0,00

Tabela 9. Comparativo dos resultados da simulação geral dos três cenários

Indicadores	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Tempo Médio de Processamento (min)	15,09	15,09	14,74
Custo Médio de Processamento (R\$)	4,79	4,79	4,69
Tempo Médio de Fila (min)	0,69	0,62	0,00
Tempo Total de Produção (min)	1.579,11	1.571,74	1.474,53
Tempo Médio de Produção (min)	15,79	15,71	14,74

A partir dos resultados das Tabelas 8 e 9 foi realizada uma análise detalhada da simulação:

- Comparação entre o cenário 1 e 2: a mudança de posição dos recursos na sequência de produção gerou uma alteração no tempo de fila do sistema e conseqüentemente nos tempos total e médio de produção. Quanto mais no final do processo se localizou o recurso “restrição Fresa”, menor resultou o tempo de fila que passou de 0,69 minutos para 0,62 minutos, que significa uma redução de 10,14%;
- Comparação entre o cenário 1 e 3: as alterações realizadas reduziram o tempo de processamento na máquina Fresa de 704,38 minutos para 594,85 minutos, que significa uma redução de 15,54%. Já na máquina Torno as alterações resultaram no aumento do tempo de processamento de 418,07 minutos para 492,74 minutos, que significa um acréscimo de 17,86%. Apesar do aumento no tempo de processamento na máquina Torno se maior percentualmente que a redução na máquina Fresa, o sistema de manufatura se mostrou melhor balanceado no terceiro cenário, onde todos os indicadores do comparativo dos resultados da simulação geral tiveram reduções de tempo ou custo, como por exemplo, no tempo médio de produção de uma peça que passou de 15,79 minutos para 14,74 minutos, que significa uma redução de 6,64%.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho propôs uma abordagem para realização da simulação de sistemas de manufatura que é simular a partir das *features* contidas nas peças. As *features* apresentam-se como uma vantagem competitiva no desenvolvimento

da simulação devido a sua grande confiabilidade, pois quando se está modelando um sistema de manufatura existente ou não, baseia-se nas necessidades a partir de informações geométricas constantes nas peças que o sistema fabrica.

O trabalho mostrou que a abordagem proposta facilita a comunicação do projeto com a manufatura e permite aos responsáveis por sistemas de manufatura tomar decisões baseadas em indicadores de desempenho do sistema com relação ao tempo e ao custo sem alterar o dia-a-dia da empresa.

Foi proposta uma aplicação na forma de três cenários que permitiu mostrar a flexibilidade da abordagem na experimentação de sistemas de manufatura. Foram testadas diferentes utilizações de recursos para a fabricação de uma *feature*, assim como de uma sequência de produção. A flexibilidade está diretamente relacionada com a possibilidade de ampliação da biblioteca de *features* e de recursos e conseqüentemente da quantidade de peças a serem simuladas.

Algumas limitações dessa abordagem são: o desenvolvimento de modelos de sistemas de manufatura dependente da biblioteca de *features* e de recursos; a necessidade de conhecimentos na interpretação de projetos mecânicos de peças e de conhecimento do sistema de manufatura (recursos) a ser simulado; e na simulação foram considerados os tempos de *setup* e os tempos de falhas dos recursos de fabricação e de transporte como tempo improdutivo não fazendo distinção entre eles.

5. REFERÊNCIAS

- Agostinho, L. O.; Villela, R. C.; Button, S. T., 2004, "Processos de fabricação e planejamento de processos", Apostila da disciplina Introdução à Engenharia de Fabricação do Curso do Engenharia Mecânica. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- Arnold, J. R. T., 1999, "Administração de materiais", São Paulo: Atlas.
- Ballou, R. H., 2006, "Gerenciamento da cadeia de suprimentos", São Paulo: Bookman.
- Banks, J.; Carlson, J. S.; Nelson, B. L., 1996, "Discrete-event system simulation", 2ª.ed, New Jersey: Prentice-Hall.
- Black, J. T., 1998, "Projeto da fábrica com futuro", Porto Alegre: Bookman.
- Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L., 2001, "Tecnologia de usinagem dos materiais", 3ª Ed, São Paulo: MM Editora, 2001.
- Farias, J. B. S., 2008, "Desenvolvimento de um sistema semi-generativo para planejamento de processo auxiliado por computador para ambiente de usinagem", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Ferraresi, D., 1985, "Fundamentos da usinagem dos metais", São Paulo: Edgard Blucher.
- Gao, J.; Zheng, D.; Gindy, N., 2004, "Mathematical representation of feature conversion for CAD/CAM system integration", Computer Integrated Manufacturing, 20, 457-467.
- Han, J.; Reguicha, A. A. G., 1998, "Feature recognition from CAD models", IEEE Computer Graphics and Applications, pp. 80-94.
- Harrel, C. R.; Ghosh, B. K.; Bowden, R., 2000, "Simulation using promodel", McGraw-Hill.
- Jung, J. Y., 2002, "Manufacturing cost estimation for machined parts based on manufacturing features", Journal of Intelligent Manufacturing, pp. 227-238.
- Jung, J. Y.; Choi, S. J.; Moon, D. H., 2000, "Cost estimating system for machined parts", Proceedings of International Conference on Production Research, Bangkok, Thailand.
- Lee, H., 2004, "Rule-based process planning by grouping features", KSME International Journal, v.18, n.12, pp. 2095-2103.
- Lui, Z.; Wang, L., 2007, "Sequencing of interacting prismatic machining features for process planning", Computers in Industry, n.58, pp. 295-303.
- Maziero, N. L., 1998, "Um sistema computacional inteligente de suporte ao projeto, manufatura e montagem de peças baseado em features: uma abordagem com sistemas especialistas", Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.
- Moreira, D. A., 2008, "Administração da produção e operações", 2ª ed. São Paulo: Cengage Learning.
- O'Kane, J. F.; Spenceley, J. R.; Taylor, R., 2000, "Simulation as an essential tool for advanced manufacturing technology problems", Journal of Materials Processing Technology, v.107, p.412-424.
- Palomino, R. C., 2001, "Um modelo baseado em redes de petri para o planejamento e a programação da produção em ambientes do tipo job shop", Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina.
- Pegden, C. D.; Shannon, R. E.; Sadowski, R. P., 1990, "Introduction to simulation using siman", New York: McGraw-Hill.
- Resende, M. O., 1993, "Princípios de processos de produção", Volume 1 e 2. Apostila do Departamento de Engenharia Mecânica, São Carlos: Universidade de São Paulo.
- Ryan, J.; Heavey, C., 2006, "Process modeling for simulation", Computers in Industry, v.57, p.437-450.

6. DIREITOS AUTORAIS

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

SIMULATION OF MANUFACTURING SYSTEMS BASED ON GEOMETRY PART

Resumo: Currently, with the diversification of products demanded, manufacturing systems have become increasingly complex and difficult operation. Hardly responsible for manufacturing has all the information necessary to anticipate the details necessary for its implementation. On the other hand, companies don't have the time or resources to evaluate alternative manufacturing the real system. Thus, the simulation based on part geometry becomes important, as accurately portrays the characteristics of the product being manufactured, making management of manufacturing easy. The objective of this work is to show how to simulate manufacturing systems from the geometry of the piece composed by Features. From the simulation, the user can make decisions related to the times and costs of manufacturing without changing the routine of business. For the development work was carried out a bibliographic review of the areas of Manufacturing Systems, Simulation and Features. With respect to research methodology, the work was an applied nature, the approach is quantitative, it is an exploratory research and the technical procedure used in this study was the simulation. To analyze the advantages and limitations of the approach proposed in this work was performed the simulation of a manufacturing system specific.

Palavras-chave: *manufacturing system, simulation, feature.*