

UM MODELO PARA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE MANUFATURA BASEADO NA TECNOLOGIA DE FEATURES

A MODEL FOR SIMULATION OF MANUFACTURING SYSTEMS BASED ON FEATURES TECHNOLOGY

Heráclito Lopes Jaguaribe Pontes¹; Arthur José Vieira Porto²

¹Universidade Federal do Ceará – UFC – Fortaleza – Brasil

hjaguaribe@ufc.br

²Universidade de São Paulo – EESC-USP – São Carlos – Brasil

ajvporto@sc.usp.br

Resumo

Este artigo apresenta a utilização de Features geométricas como referência na simulação de sistemas de manufatura. O trabalho foi estruturado a partir de revisões das literaturas sobre os conceitos de Sistemas de Manufatura, Simulação e Tecnologia de Features. O objetivo do trabalho foi propor um modelo para simulações de sistemas de manufatura baseado na tecnologia de Features. A partir dessas simulações, o usuário poderá tomar decisões baseadas em indicadores como: custo e tempo total de manufatura; custo e tempo de fabricação por Features; custo e tempo de movimentação entre recursos de fabricação; tempo de fila e; taxa de utilização dos recursos no sistema de manufatura específico sem alterar o cotidiano da empresa. Com relação à metodologia de pesquisa, o trabalho é de natureza aplicada, a forma de abordar é a quantitativa, é uma pesquisa descritiva e os procedimentos técnicos utilizados nessa pesquisa foram a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso. Para experimentação do modelo proposto foi desenvolvida uma aplicação num sistema de manufatura real que mostra as potencialidades do modelo. Os resultados da aplicação mostram a redução entre o cenário atual e proposto no tempo médio de produção de uma peça de 20,53 minutos para 17,35, o que significa uma redução 15,49%. Esses resultados foram obtidos devido o modelo proposto possibilitar um melhor balanceamento do sistema de produção a partir da interligação entre Features e recursos de fabricação.

Palavras-chave: sistemas de manufatura; simulação; tecnologia de *features*.

1. Introdução

A crescente busca pela vantagem competitiva nas empresas gera a necessidade de ter sistemas de manufatura que atendam fatores como o aumento do número e variedade de produtos; a queda do tamanho do lote de produção; minimização de estoques; menores tolerâncias a erros; aumento na quantidade de materiais complexos; aumento dos custos de materiais; e a diminuição entre o tempo de concepção do projeto e o produto fabricado.

A função da manufatura, na maior parte das empresas, representa a maior parte do seu ativo e do seu pessoal. A manufatura são os ossos, os nervos e os músculos da empresa. Uma função de manufatura saudável dá à empresa a força para suportar a concorrência, mantém o melhoramento no desempenho competitivo e proporciona a versatilidade operacional que pode responder aos mercados crescentemente voláteis (SLACK, 1993).

Para se obter sistemas de manufatura competitivos é necessário que as empresas conheçam muito bem seus sistemas. Para isso a simulação computacional pode ser utilizada como ferramenta. De acordo com Perera e Lyanage (2000), a simulação é uma ferramenta de suporte à decisão na indústria de manufatura. Ela é muito utilizada em sistemas de manufatura para realizar projeções sem alterar o cotidiano da empresa. Através da simulação é possível ter uma visão geral do sistema, assim como obter respostas para questões do tipo “o que aconteceria se...?”. Complementa O’kane et al, (2000) dizendo que a simulação é uma das técnicas mais populares para se analisar problemas em ambientes da manufatura.

A partir da simulação é possível projetar cenários e analisar qual é a melhor forma (roteiros de produção e recursos) de fabricar os produtos demandados. A partir dessas análises, os gestores podem tomar decisões mais acuradas, acarretando em menores erros e possíveis melhorias no sistema de manufatura. Esses cenários podem ser desenvolvidos 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 *Features* constantes nas peças a serem fabricadas. As *Features* relacionam um conjunto de informações referentes aos aspectos do projeto de um produto com a manufatura.

As *Features* correspondem a uma forma de representar o significado de engenharia (projeto) numa peça através de entidades geométricas. Shah e Mantyla (1995) afirmam que as *Features* são formas geométricas definidas por um conjunto de parâmetros que têm significado especial para engenheiros de projeto e fabricação.

O objetivo deste artigo é propor um modelo para simulações de sistemas de manufatura baseado na tecnologia de *Features*. A partir dessas simulações, o usuário poderá tomar decisões baseadas em indicadores como: custo e tempo total de manufatura; custo e tempo de fabricação por *Features*, custo e tempo de movimentação, tempo de fila e taxa de utilização entre recursos no sistema de manufatura específico sem alterar o cotidiano da empresa.

Este artigo está estruturado em seis seções. A primeira seção busca prover informações para a compreensão do trabalho realizado, onde são definidos o contexto em que está inserido o trabalho e a justificativa, além do objetivo. A segunda seção apresenta o aporte teórico necessário à discussão do tema em estudo. São abordados os temas: Sistemas de Manufatura, Simulação e Tecnologia de *Features*. A terceira seção é apresentada a metodologia da pesquisa detalhando sua

classificação. A quarta seção detalha o modelo proposto no trabalho, assim como seu funcionamento e desenvolvimento. A quinta seção apresenta um estudo de caso a partir da aplicação do modelo num sistema de manufatura real. Na sexta seção são apresentadas as conclusões obtidas com o estudo, buscando responder o objetivo proposto.

2. Revisão da Literatura

2.1 Sistemas de Manufatura

De acordo com Stair e Reynolds (2008), sistema é um conjunto de elementos ou componentes que interagem para atingir objetivos. Os elementos em si e as relações entre eles determinam como funciona os sistemas. Complementa Mattos (2005) dizendo que um sistema é constituído de dois elementos: uma coleção de objetos e uma relação lógica entre eles. Esses elementos físicos e lógicos fazem com que o sistema se comporte como um organismo.

De acordo com Guerrini e Coelho (2005), manufatura vem do latim (*manus + factus*) que significa “feito a mão”, mas passou ao longo da história, a designar todo processo intensivo em mão-de-obra para geração de produtos.

A junção de sistema com manufatura é segundo Passos (1986) definida como sendo um conjunto de máquinas e/ou equipamentos, interligados por um sistema de transporte e manuseio de materiais, com o auxílio ou não de trabalhadores.

Para Moreira (2008) um sistema de manufatura 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.

Um sistema de manufatura é composto de vários subsistemas como transportadores, células de produção, máquinas operatrizes, inspeção de controle da qualidade no qual cada subsistema realiza uma determinada operação produtiva, a qual pode ser uma transformação física ou um deslocamento físico ou uma inspeção. 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).

Nas próximas seções são discutidos os principais conceitos relacionados aos subsistemas de fabricação e movimentação de materiais que compõem um sistema de manufatura.

2.1.1 Processos de Fabricação

Um procedimento ou atividade dedicada à produção de uma ou de um grupo de peças denomina-se processo de fabricação. De acordo com 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.

Para Magalhães (2008), processos de fabricação são modificações sucessivas na matéria-prima, desde um bloco de material ou pré-forma até assumir todas as exigências geométricas e tecnológicas definidas.

De acordo com Halevi e Weill (1995), aproximadamente 80% dos processos efetuados nas indústrias são processos de redução de massa de materiais sólidos, ou seja, processos de usinagem. Além disso, esses processos têm uma grande flexibilidade, permitindo ao usuário conseguir uma larga escala de aplicações, com um número muito grande de soluções possíveis.

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 partir das condições expostas anteriormente, tem-se os principais parâmetros de usinagem utilizados neste trabalho para análise de desempenho dos processos de fabricação que são relacionados ao custo e ao tempo.

Ferraresi (1985) e Diniz et al, (2001) dividem os custos de usinagem em três parcelas que são os custos relativos à mão-de-obra, à máquina-ferramenta e à ferramenta. O custo de usinagem por peça pode ser calculado por meio da Equação 1.

$$K_p = K_{us} + K_{um} + K_{uf} \quad (1)$$

Onde:

K_p - custo de produção por peça (R\$/peça)

K_{us} - custo de mão-de-obra envolvida na usinagem (R\$/peça)

K_{um} - custo da máquina-ferramenta (R\$/peça)

K_{uf} - custo da(s) ferramentas (R\$/peça)

O custo de mão-de-obra pode ser calculado por meio da Equação 2.

$$K_{us} = t_t \frac{S_h}{60} \quad (2)$$

Onde:

T_t - tempo total de confecção da peça (min)

S_h - salário do operador (R\$/hora)

Para calcular o custo da máquina-ferramenta, utiliza-se o salário máquina de acordo com as equações abaixo.

$$K_{um} = \frac{t_t}{60} S_m \quad (3)$$

Onde:

S_m - salário máquina (R\$/hora)

Com relação ao tempo da usinagem, Ferraresi (1985) definiu como sendo o tempo gasto em todas as etapas da usinagem de uma peça ou de um lote de peças, que se constituem nas seguintes fases:

- Colocação e fixação da peça em bruto ou semi-acabada na máquina-ferramenta;
- Aproximação ou posicionamento da ferramenta para o início do corte;
- Corte propriamente dito;
- Afastamento da ferramenta;
- Inspeção (se necessária) e retirada da peça usinada.

A Equação 4 evidencia, outra forma de calcular o tempo total de usinagem de uma peça, que pode ser dividido em duas partes (DINIZ et al., 2001):

$$T_t = T_c + T_i + \left(\frac{T_c}{T} - \frac{1}{Z} \right) T_{ft} \quad (4)$$

Onde:

T_t – tempo total de usinagem de uma peça (min)

T_c – tempo de corte propriamente dito (min)

T_i – tempo improdutivo (min)

T – tempo de vida da ferramenta (min)

Z – número de peças do lote (unid)

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

Segundo Ferraresi (1985), define-se como tempo de corte (T_c) de uma operação de usinagem o espaço de tempo em que as ferramentas em avanço de usinagem trabalham na remoção de cavacos da peça. Complementa Diniz et al, (2001) dizendo que, o tempo de corte (T_c) resume a totalidade dos tempos ativos, pois ele representa o tempo em que os movimentos de corte e ou avanço estão efetivamente ocorrendo.

$$T_c = \frac{\pi \cdot d \cdot I_f}{1000 \cdot f \cdot V_c} \quad (5)$$

Onde:

T_c – tempo corte (min)

d – diâmetro da ferramenta (mm)

I_f – movimento do avanço (mm)

f – avanço (mm/volta)

V_c – velocidade de corte (m/min)

De acordo com Diniz et al, (2001) tempos improdutivos (T_i) estão divididos em duas parcelas:

– Tempo improdutivo referente à colocação, inspeção e retirada da peça, aproximação e afastamento da ferramenta, substituição 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 substituição da mesma. Portanto, maior também esta parcela.

2.1.2 Processos de Movimentação de Material

A movimentação interna na manufatura é responsável por toda movimentação dos produtos ou peças dentro do sistema de manufatura. Essa movimentação corresponde desde o local de armazenamento de matéria-prima até o armazenamento do produto acabado, passando pelas várias operações de fabricação.

Para Pozo (2007), os principais objetivos do manuseio de materiais são: otimizar a utilização cúbica das edificações de produção e armazenagem; otimizar a eficiência operacional; reduzir os custos de movimentação; otimizar a carga de cada transporte; melhorar o atendimento ao mercado.

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 rapidez e eficiência com flexibilidade e custo relativamente baixo. Exemplos: guindastes, elevadores, guinchos, esteiras transportadoras e empilhadeira mecânica e suas variações.

– Equipamento Mecanizado: são equipamentos controlados por computadores, códigos de barras e tecnologia de escaneamento. Exemplo: veículos guiados automaticamente (AVGs).

De acordo com Bowersox *et al*, (2006) e Ballou (2006), os principais equipamentos de movimentação interna são:

– Paleteiras: equipamento versátil e de baixo custo, mas com capacidade limitada. São muito utilizados na transferência de pequenas cargas em maiores distancias dentro do sistema de manufatura.

– Esteiras Transportadoras: método convencional bastante utilizado. As esteiras são classificadas de acordo com o tipo de acionamento (energia ou gravidade) e o tipo de movimentos (roletes ou correias).

– Empilhadeiras: podem movimentar produtos horizontalmente e verticalmente. Utilizada em conjunto com palete podem empilhar vários produtos para uma melhor eficiência do transporte. Há vários tipos de empilhadeiras como: de longo alcance, com garras laterais e trilaterais.

– Veículos Guiados Automaticamente (AVGs): os trilhos podem ser visíveis ou por produtos químicos; podem ser inteligentes e neste caso possuem um microcomputador de bordo, evitando um contato constante com os sistemas de controle; a comunicação com o sistema de controle pode ser feita através de dispositivos ópticos ou magnéticos.

2.2 Simulação

Simulação é um termo amplo e pode ser definido como o processo de elaboração de um modelo de um sistema real/hipotético e a condução de experimentos com a finalidade de entender o comportamento de um sistema ou avaliar sua operação (SHANNON, 1998).

A maioria dos modelos são implementados num computador, com isso Pritsker (1986), define que simulação computacional ou simulação é o processo de projetar um modelo lógico matemático de um sistema real e fazer experimentos deste sistema no computador.

De acordo com Freitas Filho (2008), “a simulação computacional de sistemas”, ou simplesmente simulação, consiste na utilização de determinadas técnicas matemáticas, empregadas em computadores digitais, as quais permitem imitar o funcionamento de praticamente qualquer tipo de operação ou processo (sistemas) do mundo real.

Para Prado (1999), simulação é a técnica de solução de um problema pela análise de um modelo que descreve o comportamento do sistema usando um computador digital. Complementa Banks et al, (2009) dizendo que a simulação é a imitação de uma operação de um sistema real.

Segundo Harrel e Tumay (1997), simulação é uma atividade por meio da qual se pode tirar conclusões sobre o comportamento de um dado sistema pelo estudo do comportamento do seu modelo correspondente no qual as relações de causas e efeitos são similares do sistema real.

Conforme Shannon (1998), simulação consiste no processo de desenvolver um modelo de um sistema real e realizar experimentos com este modelo com o propósito de entender o comportamento do sistema e/ou as evoluções das várias estratégias para a operação do mesmo. Pidd (1998) complementa dizendo que a simulação é utilizada devido a seu baixo custo, maior segurança e rapidez em comparação com a realização de experimentações na realidade.

2.2.1 Quando usar Simulação

Segundo Freitas Filho (2008), a simulação permite ao analista realizar estudos sobre os correspondentes sistemas para responder questões do tipo “O que aconteceria se”. O principal apelo ao uso desta ferramenta, é que tais questões podem ser respondidas sem que os sistemas sob investigação sofram qualquer perturbação, uma vez que os estudos são realizados no computador.

A simulação é utilizada especialmente para sistemas mais complexos, onde métodos algébricos, teorias de probabilidade e cálculo diferencial não são suficientes para solucionar problemas matematicamente (BANKS et al, 2009).

De acordo com Pidd (1998), a utilização da simulação é recomendável para sistemas ou ambientes com as seguintes características:

- Quando são dinâmicos: o comportamento do sistema varia ao longo do tempo. Esta variação pode estar associada a fatores que não se pode controlar, mas que podem ser determinados via análise estatística;
- Quando são interativos: os sistemas em questão possuem um número de componentes que interagem entre si e esta interação afeta o comportamento de todo o sistema;
- Quando são complicados: quando existem inúmeras variáveis que interagem no sistema e sua dinâmica precisa ser considerada e analisada.

Segundo Lopes et al, (2011), simulação é uma abordagem para o estudo de problemas complexos, para os quais a solução analítica é excessivamente complexa ou restritiva em relação às características do problema real. Num contexto mais amplo, a simulação refere-se à construção de modelos de qualquer natureza (físicos, matemáticos, lógicos, idealizados) e na condução de experimentos com estes modelos para o estudo de uma ou mais variáveis de interesse.

2.2.2 Simulação de Sistemas de Manufatura

De acordo com Banks et al, (2009), 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.

Através da simulação pode-se prever o comportamento de sistemas de manufatura ou o efeito da mudança de um parâmetro em seu regime de funcionamento. Para Harrel 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) a maioria dos sistemas de manufatura são complexos e difíceis no que tange ao seu entendimento e a 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.

Segundo Law e Mccomas (1999) a manufatura é uma das maiores aplicações da simulação, tendo como benefícios, destacar a necessidade e quantidade de maquinário e/ou funcionários extras, avaliação de desempenho e avaliação dos procedimentos operacionais.

Segundo Porto e Palma (2000) algumas vantagens da aplicação da simulação na manufatura são: novas políticas, procedimentos operacionais, regras de projetos, fluxo de informação, procedimentos organizacionais podem ser explorados sem perturbar a continuidade das operações do sistema real; hipóteses de “como” e “por que” certos fenômenos ocorrem podem ser testadas para verificar a viabilidade; tempo pode ser comprimido ou expandido permitindo o aumento ou a redução da velocidade do fenômeno da investigação; estudo da simulação pode ajudar o entendimento de como o sistema opera em vez de como os indivíduos pensam que o sistema opera.

Abdul-Kader e Gharbi (2002) utilizaram a simulação para estimar a capacidade de linhas produtivas que produzem diversos produtos diferentes. A simulação permitiu a representação no modelo de fatores como tempo de *setup*, tempo de reparo de falhas, tempo entre falhas.

Braghirolli (2009), desenvolveu um estudo comparativo entre a aderência do comportamento linear da mão-de-obra para as células de manufatura previsto na literatura e o comportamento observado nas implementações em empresas do setor metal-mecânico, através do uso da simulação computacional.

Miranda et al, (2010), desenvolveram um projeto de simulação com o objetivo de responder qual o melhor método de trabalho para a realização de *setup* (preparação) em uma célula de manufatura de uma empresa de autopeças do sul de Minas Gerais.

2.3 Tecnologias de *Features*

Para transformar uma peça bruta em uma peça acabada são necessários processos de fabricação que podem ser definidos a partir de informações contidas na peça. Esse conjunto de informações pode ser armazenado no projeto da peça em forma de *Features*.

O conceito de *Features* assume várias definições cada uma formulada com base em conceitos de uma área específica. Segundo Lee (2004), uma *Feature* pode ser definida de diversos pontos de vista tais como, projeto, análise, montagem, ou diversas funções relativas à manufatura.

De acordo com Zhang et al, (1999), pesquisadores fornecem definições diferentes para *Features* através do estudo de diversos ângulos desde o desenvolvimento inicial do conceito de *Features* em 1976. Complementa Gao et al, (2004) dizendo que 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.

Através de *Features*, pode-se compor uma estrutura de dados para representar uma peça ou uma montagem em termos dos seus constituintes, onde (BENAVENTE, 2007):

- Cada *Feature* tem uma identidade única;
- A forma pode ser expressa em termos de: parâmetros dimensionais; enumeração geométrica; entidades topológicas; etapas de construção para produzir a geometria da *Feature*.

Bhandarkar et al, (2000) afirmam que as *Features* permitiram o sucesso na ligação entre os sistemas CAD/CAM que foi um passo fundamental para a automatização do desenvolvimento do produto desde o estágio de projeto até à manufatura.

2.3.1 *Features* de Manufatura

De acordo Farias (2008), entende-se por *Features* de manufatura aquelas características geométricas extraídas do sistema CAD e que possam ser fabricadas com recursos disponíveis, como máquinas e ferramentas. Complementam Han e Reguicha (1998) dizendo que uma *Feature* de manufatura é tipicamente uma *Feature* negativa associada às características do processo de usinagem.

Segundo Lui e Wang (2007), *Features* de manufatura são definidas como um volume que é 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 as ferramentas que serão necessárias para fabricar a *Feature*.

Segundo Alvares e Ferreira (2005), as *Features* de manufatura são mapeadas a partir das *Features* de projeto disponíveis no banco de dados, através da decomposição volumétrica baseada em critérios geométricos, *setup* da peça e nas operações de fabricação.

2.3.3 Aplicações de *Features* na Manufatura

Ao longo dos anos foram desenvolvidas aplicações com *Features* com o objetivo de automatizar a interface entre Projeto Assistido por Computador (CAD) e a Manufatura Assistida por Computador (CAM) e com isso conseguir a total integração de um processo produtivo.

Vários autores como Kumar e Sing (2007), Sudarsan et al, (2005) e Zhou et al, (2007) desenvolveram trabalhos com enfoque na utilização de sistemas especialistas baseados em regras de produção em conjunto com a representação geométrica a partir de *Features*.

Yingjie e Ai (2008) desenvolveram uma modelo para realização do planejamento do processo baseado nas *Features* em sistemas de manufatura complexos. Os diferenciais desse modelo foram a divisão em *Features* de alto (poucas informações) e baixo nível (muitas informações) e a possibilidade de reuso de planejamentos anteriores. Para mostrar o funcionamento do modelo foi desenvolvido um protótipo e aplicado numa empresa no noroeste da China.

Hayasi e Asiabanpour (2009) desenvolveram uma plataforma para traduzir características de projeto em informações para fabricação, como por exemplo, região para remoção de material, dados geométricos e topológicos das *Features*. A abordagem proposta tem algumas simplificações como a não utilização das *Features* filetes e a desconsideração das interseções das *Features* de projeto.

Hoque e Szecsi (2008) desenvolveram uma aplicação para utilizar *Features* de geometrias parametrizadas para descrever o processo de manufatura buscando mostrar as limitações geométricas do produto durante o seu desenho num sistema CAD.

Álvares (2005) desenvolveu um sistema para o projeto e fabricação de peças rotacionais à distância via Internet, através do qual se propõe uma metodologia que utiliza a modelagem baseada na síntese da peça pelas *Features* de projeto, a fim de permitir as atividades de projeto (CAD), planejamento do processo (CAP.) e fabricação (CAM) utilizando como referência o modelo de *Features* de manufatura.

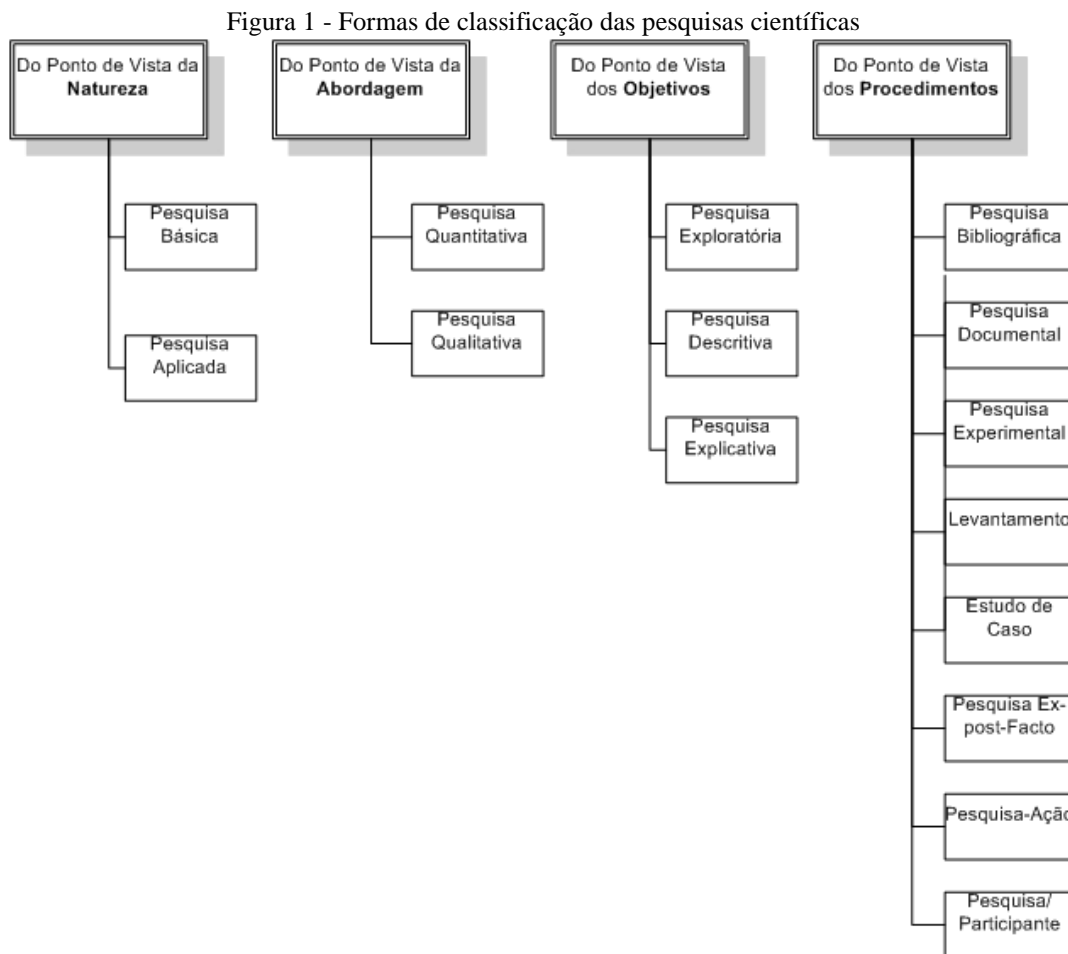
3. Metodologia de Pesquisa

Metodologia é o conjunto de técnicas e processos utilizados pela ciência para formular e resolver problemas de aquisição objetiva do conhecimento de maneira sistemática (JUNG, 2003).

Segundo Gil (2008), a pesquisa tem um caráter pragmático, é um processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico. O objetivo fundamental da pesquisa é descobrir respostas para problemas mediante o emprego de procedimentos científicos.

Complementa Jung (2003) dizendo que a pesquisa é o processo através do qual as pessoas adquirem um novo conhecimento sobre si mesmo ou sobre o mundo em que vivem, com as finalidades de: responder a um questionamento, resolver um problema ou satisfazer uma necessidade.

Silva e Menezes (2005) unem os termos metodologia e pesquisa resultando na metodologia de pesquisa que tem a função de mostrar como andar no “caminho das pedras” na elaboração de um projeto de pesquisa, baseado em planejamento cuidadoso, reflexões conceituais sólidas e alicerçados em conhecimentos já existentes.



Fonte: Adaptado de Silva e Menezes (2005)

A partir da pesquisa realizada nesse trabalho foi desenvolvido um modelo para sistemas de manufatura que auxilia na tomada de decisões. De acordo com a Figura 1, classifica-se essa pesquisa da seguinte forma:

- É de natureza aplicada, pois tem como objetivo gerar conhecimentos para aplicação prática em sistemas de manufatura;
- A forma de abordagem é a quantitativa devido utilizar equações matemáticas para descrever o funcionamento de sistemas de manufatura e os resultados da simulação são obtidos a

partir do cálculo de indicadores baseados em custo e tempo, além do percentual de utilização de cada recurso;

- É uma pesquisa descritiva, pois propõe uma nova abordagem para realização da simulação de sistemas de manufatura. Para o desenvolvimento da pesquisa foram levantados os principais componentes (recursos e processos) de diferentes tipos de sistemas de manufatura;

- Os procedimentos técnicos utilizados foram a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso. Inicialmente realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre os temas envolvidos no trabalho (sistemas de manufatura, simulação e tecnologia de *Features*). Além da pesquisa bibliográfica foi identificado e estudado um sistema de manufatura real buscando projetar e analisar um cenário baseado no modelo proposto.

4. Modelo para Simulação de Sistemas de Manufatura baseado em Tecnologia de *Features*

4.1 Caracterização do Modelo Proposto

O modelo foi proposto a partir da constatação da inexistência de trabalhos acadêmicos anteriores que utilizem a técnica da simulação para construir cenários com sistemas de manufatura e analisar sua dinâmica a partir das *Features* contidas na peça.

O modelo utiliza a peça como referência para simulação de sistemas de manufatura. A peça é composta de *Features* que são características geométricas que dão forma à peça. Cada *Feature* possui um volume e uma área que são utilizados como base para os cálculos de tempos e custos de fabricação da peça. O volume da *Feature* é utilizado como base para o cálculo do tempo de debaste e a área da *Feature* como base para o tempo de acabamento. Os custos são calculados baseados nos tempos de processamento de cada recurso.

Além dos recursos de fabricação responsáveis pelas *Features*, o modelo considera os recursos de transporte de materiais que são responsáveis por movimentar a peça de um recurso de fabricação para outro e a dinâmica das filas em cada recurso do sistema.

O modelo possui a flexibilidade e a versatilidade da simulação computacional com a coerência da descrição detalhada da geometria fornecida pelas *Features*. Ela possibilita realizar simulações a partir do projeto da peça com as *Features*, o que torna confiável a simulação, porém não tira a possibilidade de desenvolvimento de diferentes cenários para uma melhor tomada de decisão.

Os diferenciais do modelo proposto são:

- É um paradigma diferente para realizar a simulação de sistema de manufatura definindo o roteiro de produção e os processos (recursos) a partir das *Features* da peça. O modelo tradicional

considera a peça como um todo e no modelo proposto são considerados todas as *Feature* contidas na peça separadamente;

- É uma forma diferente de calcular tempo e custo de usinagem. A forma tradicional utiliza a peça como base para os cálculos e na abordagem proposta utiliza o volume e a área das *Features* como base para os cálculos;

- É voltada para a simulação do sistema da manufatura como um todo considerando a dinâmica do sistema, porém são calculados indicadores gerais do sistema e também específicos dos recursos;

- É uma abordagem genérica podendo ser usada para diferentes tipos de sistemas de manufatura;

- Não utiliza base de conhecimento ou regras específicas para a tomada de decisão. Busca a flexibilidade para realização de testes e experimentos.

As limitações do modelo são:

- Os recursos de fabricação têm que ser máquinas que realizam os processos de usinagem convencional (Torneamento, Fresamento, Furação, Retificação, Mandrilamento, Brochamento, Aplainamento, Alargamento);

- As *Features* devem ser do tipo (Rotacional, Prismática, Cavidade ou Circular);

- Não é possível simular dois recursos de fabricação ou transporte paralelamente. Cada recurso é único e pode ter sua capacidade alterada de acordo com o cenário proposto;

- Somente um tipo de peça por vez pode ser simulado para cada sistema de manufatura modelado.

4.2 Funcionamento do Modelo Proposto

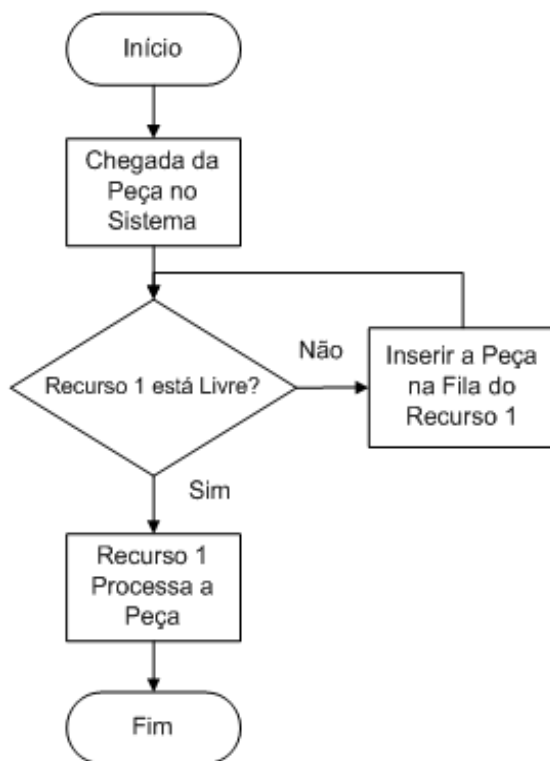
Para um melhor detalhamento, o funcionamento do modelo proposto foi dividido em quatro partes: chegada de peça no sistema de manufatura; execução da simulação; processamento das filas e cálculo dos tempos e dos custos dos recursos. Nas próximas seções são apresentadas cada uma dessas etapas.

4.2.1 Chegada de Peça

As peças entram no sistema de manufatura a ser simulado de acordo com o tempo de chegada de peças (TCP). A primeira peça entra no instante zero. A segunda peça entra no processo no instante igual ao TCP. É verificado se o recurso está livre. Caso o recurso (fabricação ou transporte) esteja livre, a peça entra no recurso para ser atendida. Caso o recurso esteja ocupado, a

peça é encaminhada para uma fila do recurso e após é liberada para o processamento. As atividades descritas são realizadas para todas as peças a serem simuladas. A Figura 2 detalha essa estrutura.

Figura 2 - Chegada de peças no sistema de manufatura



Fonte: Autoria própria (2013).

4.2.2 Execução da Simulação

Essa etapa inicia-se com o cálculo do passo da simulação (incremento). O sistema calcula o tempo que cada recurso leva para produzir uma *Feature* ou para transportar uma peça. O passo é igual ao menor tempo dentre todos os tempos dos recursos calculados, ou seja, a simulação será atualizada a cada passo de tempo que é igual ao mínimo tempo dos recursos. Em seguida, iguala o tempo de simulação ao passo.

A cada novo passo da simulação são atualizados os status de cada recurso (Livre e Ocupado) e calculados os tempos de processamento e os tempos de espera (fila) em cada recurso. A simulação termina quando o tempo da soma dos passos da simulação atingir o tempo total de simulação predeterminado ou quando simula a quantidade de peças predeterminada. A Figura 3 detalha essa estrutura.

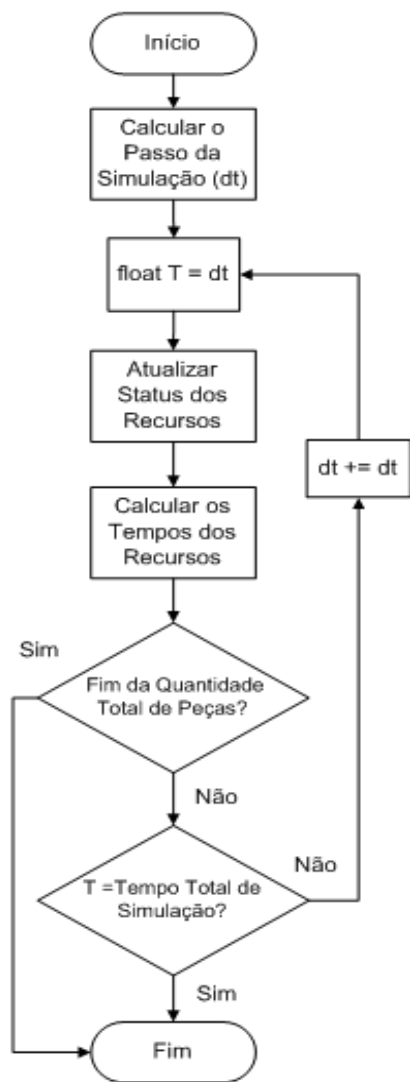
4.2.3 Processamento das Filas

Cada recurso tem um local de espera (fila) antes de seu processamento. A prioridade adotada na fila é o FIFO (*First In, First Out*). A cada passo da simulação o sistema verifica o status de cada

recurso. Caso não tenha peça na fila o sistema passa para o próximo passo. Caso tenha peça na fila, verifica se o recurso está livre.

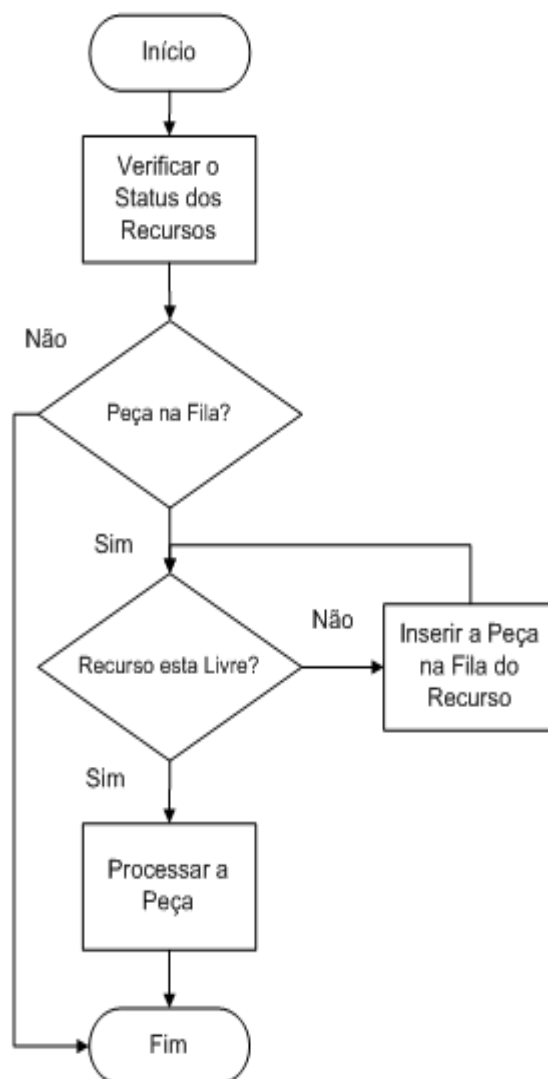
Caso o recurso esteja livre, processa a peça. Caso o recurso esteja ocupado, insere a peça na fila e depois processa a peça de acordo com a prioridade adotada. A Figura 4 detalha essa estrutura.

Figura 3 - Execução da simulação



Fonte: Autoria própria (2013).

Figura 4 - Processamento das filas



Fonte: Autoria própria (2013).

4.2.4 Cálculo dos Tempos e dos Custos dos Recursos

As peças ao longo da simulação sofrem alterações geométricas com inserção das *Features* na sua estrutura pelos recursos de fabricação ou podem ser transportadas pelos recursos de transporte.

Para cada uma dessas atividades são calculados um tempo e um custo. O tempo e o custo de fabricação das *Features* variam conforme o tipo da *Feature*. As fórmulas de calcular o tempo e o custo de transporte foram às mesmas para todos os tipos de equipamentos ou operários.

1. Cálculo do Tempo de Fabricação

$$T_f = T_c + T_a + T_i + T_{fr} \quad (6)$$

Onde:

T_f – tempo de fabricação por recurso (min)

T_c – tempo de corte (desbaste) da *Feature* (min)

T_a – tempo de acabamento da *Feature* (min)

T_i – tempo de improdutivo (min)

T_{fr} – tempo de troca da ferramenta (min)

1.2 Cálculo do Tempo de Corte (desbaste):

$$T_c = \frac{V_r}{MRR} \quad (7)$$

a. *Feature* Tipo Rotacional (Passo, Chanfro e Arredondamento)

$$MRR_r = d \times f \times s \quad (8)$$

b. *Feature* Tipo Prismática (Plano, Degrau e Ranhura)

$$MRR_p = D \times d \times s \quad (9)$$

c. *Feature* Tipo Cavidade (Entalhe, Depressão e Rasgo)

$$MRR_{ca} = l \times d \times s \quad (10)$$

d. *Feature* Tipo Circular (Furo)

$$MRR_{ci} = d \times D \times v \quad (11)$$

Onde:

T_c – tempo de corte (desbaste) da *Feature* (min)

V_r – volume da *Feature* (mm³)

MRR – taxa de remoção do material (mm³/min)

d – profundidade do corte (mm)

D – diâmetro do corte (mm)

l – comprimento do corte (mm)

f – avanço por revolução (mm)

s – velocidade de corte (mm/min)

v – velocidade de avanço (mm/min)

Tabela 1 - Cálculo do volume das principais *features*

| Tipos de <i>Features</i> | Volume (mm ³) |
|--------------------------|---|
| Passo | $\pi \times (\text{DiametroMaior}^2 - \text{DiametroMenor}^2) \times (\text{Largura}/4)$ |
| Chanfro | $\pi \times ((\text{DiametroMaior}^2 \times \text{DiametroMenor}^2/4) - (\text{DiametroMenor}^2/12)) \times \text{Largura}$ |
| 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 | $\pi \times (\text{Diametro}^2 \times (\text{Altura}/4))$ |

Fonte: Adaptado de Jung (2002)

1.3 Tempo de Acabamento da *Feature*:

$$T_a = \frac{A_f}{R_t} \quad (12)$$

Onde:

T_a – tempo de acabamento da *Feature* (min)

A_f – área da *Feature* (mm²)

R_t – taxa de remoção da área da *Feature* (mm²/min)

Tabela 2 - Cálculo da área das principais *features*

| Tipos de <i>Features</i> | Área (mm ²) |
|--------------------------|--|
| Passo | $\pi \times \text{DiametroMenor} \times \text{Largura} + \pi \times (\text{DiametroMaior}^2 - \text{DiametroMenor}^2)/4$ |
| Chanfro | $\pi \times (\text{RaioMaior} + \text{RaioMenor}) \times \sqrt{\text{Largura}^2 \times (\text{RaioMaior} - \text{RaioMenor})^2}$ |
| 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 + 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 | $\pi \times \text{Diâmetro} \times \text{Altura}$ |

Fonte: Adaptado de Jung (2002)

1.4 Tempo Improdutivo:

$$T_i = T_c \times \left(\frac{P_i}{100} \right) \quad (13)$$

Onde:

T_i – tempo improdutivo (min)

P_i – percentual de tempo improdutivo (%)

1.5 Tempo de Troca de Ferramenta:

$$T_{fr} = \left(\frac{T_c}{T} - \frac{1}{Z} \right) T_{ft} \quad (14)$$

Onde:

T_{fr} – tempo de troca da ferramenta (min)

T_c – tempo de corte (desbaste) da feature (min)

T – tempo de vida da ferramenta (min)

Z – número de peças do lote (unid)

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

2. Cálculo do Custo de Fabricação

$$C_f = \left(\frac{S_h}{60} \right) \times T_f + \left(\frac{S_m}{60} \right) \times T_f + C_{fr} \quad (15)$$

Onde:

C_f – custo de fabricação (R\$)

T_f – tempo de fabricação por recurso (min)

S_h – salário do operador (R\$/hora)

S_m – salário da máquina (R\$/hora)

C_{fr} – custo da(s) ferramenta(s) (R\$)

3. Cálculo do Tempo de Transporte

$$T_{to} = T_t + T_i \quad (16)$$

$$T_t = \frac{D_t}{V_t} \quad (17)$$

$$T_i = T_t \times \left(\frac{P_i}{100} \right) \quad (18)$$

Onde:

T_{to} – tempo total de transporte (min)

T_t – tempo de transporte (min)

D_t – distância do percurso do transporte (m)

V_t – velocidade do transportador (m/min)

T_i – tempo improdutivo (min)

P_i – percentual de tempo improdutivo (%)

4. Cálculo do Custo de Transporte

$$C_t = C_m \times T_{to} \quad (19)$$

Onde:

C_t – custo de transporte (R\$)

C_m – custo de movimentação por minuto (R\$)

T_{to} – tempo total de transporte (min)

4.3 Desenvolvimento do Modelo Proposto

Para utilização do modelo proposto foi desenvolvido um programa computacional composto por quatro módulos que são interligados e interdependentes:

– Módulo Banco de Dados: corresponde ao armazenamento dos dados relativos às peças, às *Features* e aos recursos (máquinas e operadores). Para isso foram desenvolvidas três tabelas principais chamadas de Peça, *Features* e Recursos. Para o desenvolvimento do banco de dados foi utilizado o *software Sqlite*.

– Módulo Simulador: planeja a simulação com a definição da peça a ser simulada, da quantidade de peças e o lote de fabricação, assim como o roteiro de produção. O módulo é responsável também pela sequência de atividades que ocorrerão ao longo da simulação. Para o desenvolvimento do programa escolheu-se o programa *Qt* que é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE). A programação foi realizada a linguagem de programação C++.

– Módulos Relatórios: responsável por fornecer ao usuário os resultados relativos à simulação realizada. Esses resultados podem ser do sistema de manufatura como um todo ou particular de recursos e *Features* integrantes do sistema. Os principais resultados consistem nas seguintes informações: Tempo Total de Produção; Custo Total de Produção; Tempo e Custo de Fabricação por *Features*; Tempo e Custo de Movimentação; Tempo e Custo de uma Peça, Tempo de Fila e; Taxa de Utilização dos Recursos.

– Módulo de Interface Gráfica com Usuário (GUI): corresponde à interface gráfica de relacionamento com o usuário baseada em botões, ícones e menus. As interfaces foram desenvolvidas utilizando também o *software Qt*.

5. Aplicação do Modelo Proposto

O estudo de caso foi desenvolvido a partir da aplicação do modelo proposto num sistema de manufatura de uma empresa fabricante de máquinas para embalagem plásticas. A empresa atua neste mercado a dezessete anos tendo no seu portfólio máquinas para embalagens do tipo sacoleira, laminadora e blocadora.

A principal máquina manufaturada pela empresa em estudo é a blocadora. Ela produz sacos e sacolas de plástico de diferentes tamanhos e larguras. O processo produtivo da blocadora consiste no corte e na soldagem dos sacos a partir de bobinas de tamanhos variados. O corte pode ser do tipo solto ou serrilhado e a soldagem pode ser do tipo de fundo, de beira lateral ou lateral convencional.

Apesar de ser uma máquina complexa composta por diversos componentes, alguns componentes tem uma maior relevância devido à função exercida. A peça em estudo é desses componentes essenciais para uma máquina blocadora, pois tem como função estabilizar o eixo da máquina. Sem essa peça uma máquina blocadora não executa suas atividades básicas de corte e soldagem com sucesso. Ela é chamada de travessa do eixo do blocador e a Figura 5 mostra uma amostra da peça. O material da peça é o aço SAE 1020. Esse tipo de aço é muito utilizado em componentes mecânicos devido às suas características como a boa plasticidade, usinabilidade e soldabilidade.

Figura 5 - Peça em estudo

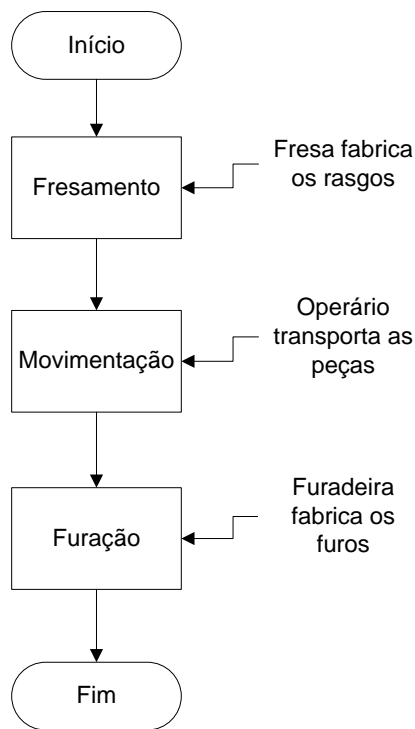


Fonte: Pesquisa de campo (2013).

A peça é produzida a partir de um projeto mecânico desenvolvido num sistema CAD. A peça que é composta de seis *Features* que são: dois rasgos e quatro furos. Apesar de na Figura 5 ser possível ver somente dois furos, existem também dois furos sobrepostos sendo assim necessário fabricar quatro furos. Esses furos são do tipo cego com o diâmetro maior e altura menor ou do tipo passante que são os de diâmetro menor e altura maior. Com relação ao rasgo, devido ao arredondamento das laterais, a sua fabricação consiste na confecção de um rasgo quadrado seguidos de dois semi-círculos nas laterais.

Para a fabricação das *Features* o sistema de manufatura da empresa é composto de uma fresa (fabrica os rasgos) e uma furadeira (fabrica os furos). A movimentação das peças entre as máquinas é realizada por um operário. A Figura 6 apresenta os processos do sistema de manufatura.

Figura 6 - Sistema de man



Fonte: Autoria própria (2013).

A peça em estudo foi escolhida devido a um problema observado na visita técnica à empresa. O sistema de manufatura apresenta um desbalanceamento de tempo entre os seus processos. A máquina fresa responsável pela fabricação das *Features* rasgo têm um tempo de processamento muito maior do que os outros processos (movimentação e furação) gerando uma fila de peças nesse recurso. Além do tempo, o processamento também apresenta um alto custo em relação ao processo de furação. Para minimizar esse problema a empresa inseriu um estoque pulmão produzido num turno extra de trabalho da máquina fresa. Porém essa solução gera altos custos devido ao pagamento de horas extras diariamente. Com isso, gerou-se uma dúvida com relação aos ganhos com a mudança na alocação da máquina furadeira para produzir os semi-furos que compõem os rasgos reduzindo assim o tempo e o custo do processo de fresamento.

Após a definição do problema realizou-se a coleta de dados e informações que são mostrados nas Tabelas 3, 4, 5 e 6. Os dados coletados são: as dimensões da peça; as dimensões e as localizações das *Features*; os parâmetros de tempo e de custo do recurso de fabricação e movimentação; a quantidade de peças produzidas por mês e; o tempo entre chegada de peças no sistema.

Tabela 3 - Parâmetros de entrada

| Tempo Entre Chegada de Peças (min) | Quantidade de Peças Produzidas (mês) |
|---|---|
| 5,0 | 125 |

Fonte: Autoria própria (2013).

Tabela 4 - Parâmetros da peça

| PEÇA | | | | |
|------------------|-----------------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| Descrição | Material | Comprimento (mm) | Largura (mm) | Altura(mm) |
| Travessa do Eixo | Aço SAE 1020 | 210 | 25,40 | 25,40 |

Fonte: Autoria própria (2013).

Tabela 5 - Parâmetros das features

| FEATURES | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|
| Rasgo | | | | | | | |
| Comprimento (mm) | Largura (mm) | Altura (mm) | Diametro (mm) | Pos. X | Pos. Y | Pos. Z | Orientação |
| 10,00 | 10,00 | 24,50 | 10,00 | 0,50 | 0,00 | 0,04 | 1 (Face XZ) |
| 10,00 | 10,00 | 24,50 | 10,00 | 0,50 | 0,00 | 0,50 | 1 (Face XZ) |
| Furo | | | | | | | |
| Diâmetro(mm) | Altura (mm) | | | Pos. X | Pos. Y | Pos. Z | Orientação |
| 15,00 | 13,00 | | | 0,50 | 0,00 | 0,65 | 1 (Face XZ) |
| 15,00 | 13,00 | | | 0,50 | 0,00 | 0,94 | 1 (Face XZ) |
| 10,00 | 25,40 | | | 0,50 | 0,00 | 0,65 | 1 (Face XZ) |
| 10,00 | 25,40 | | | 0,50 | 0,00 | 0,94 | 1 (Face XZ) |

Fonte: Autoria própria (2013).

Tabela 6 - Parâmetros dos recursos atuais

| FABRICAÇÃO | | | | TRANSPORTE | |
|---|--------------|------------------|-------------|-----------------------------------|-----------------|
| Parâmetros | Fresa | Furadeira | | Parâmetros | Operário |
| | | D=10 | D=15 | | |
| Salário Operador (R\$/hora) | 16,00 | 16,00 | 16,00 | Velocidade (m/min) | 30,00 |
| Salário Máquina (R\$/hora) | 60,00 | 30,00 | 30,00 | Distância (m) | 3,00 |
| Custo Ferramenta (R\$/mm ³) | 1,60 | 1,20 | 1,20 | Per.Tempo Improdutivo (%) | 30,00 |
| Diâmetro Corte (mm) | 10,00 | 15,00 | 10,00 | Custo Unidade por Tempo (R\$/min) | 0,20 |
| Profundidade Corte (mm) | 26,00 | 13,00 | 26,00 | | |
| Comprimento Corte (mm) | 10,00 | 0,00 | 0,00 | | |
| Velocidade de Corte (mm/min) | 8,00 | 0,00 | 0,00 | | |
| Velocidade de Avanço (mm/min) | 4,00 | 8,00 | 8,00 | | |
| Per.Tempo Improdutivo (%) | 25,00 | 15,00 | 15,00 | | |
| Tempo Vida Ferramenta (min) | 5,00 | 6,00 | 6,00 | | |
| Tempo Troca Ferramenta (min) | 1,20 | 0,55 | 0,55 | | |

Fonte: Autoria própria (2013).

O próximo passo desenvolvido foi a construção do modelo. Os dados coletados foram inseridos no banco de dados seguido da modelagem da simulação. A modelagem da situação atual foi mostrada ao responsável pelo sistema de manufatura para validação do modelo.

O próximo passo foi a experimentação a partir da implementação de um novo cenário do sistema de manufatura em estudo. Nesse cenário foi determinado que o recurso furadeira ficaria

responsável pela produção dos semi-furos dos rasgos, reduzindo assim as responsabilidades do recurso fresa que é o recurso restrição do sistema de manufatura.

Com essa alteração, busca-se reduzir os custos com estoques pulmões e horas extras, além de balancear os tempos e custos do sistema de manufatura. Esse cenário foi sugerido pelo responsável do sistema de manufatura que não tinha uma ferramenta para realizar essa análise.

O último passo desenvolvido foi a análise dos resultados da simulação do cenário atual e do proposto. As Tabelas 7 e 8 detalham o comparativo dos resultados específicos por recurso e geral do sistema entre os cenários atual e o proposto para a produção de 125 peças por mês. Já a Tabela 9 detalha o tempo e o custo de fabricação para cada *Feature* nos dois cenários simulados.

Tabela 7 - Resultados da simulação por recurso

| Recurso / Feature | Indicadores | Cenário Atual | Cenário Proposto |
|---|---------------------------|----------------------|-------------------------|
| Recurso Fresa / Feature Rasgo | Tempo Processamento (min) | 1.282,50 | 927,50 |
| | Custo Processamento (R\$) | 2.225,00 | 1.575,00 |
| | Tempo de Fila (min) | 518,75 | 327,50 |
| Recurso Operário | Tempo Processamento (min) | 16,25 | 16,25 |
| | Custo Processamento (R\$) | 3,75 | 3,75 |
| | Tempo de Fila (min) | 0,00 | 0,00 |
| Recurso Furadeira / Feature Furo | Tempo Processamento (min) | 750,00 | 897,50 |
| | Custo Processamento (R\$) | 1.172,50 | 1.435,00 |
| | Tempo de Fila (min) | 0,00 | 0,00 |

Fonte: Autoria própria (2013).

Tabela 8 - Resultados da simulação gerais

| Indicadores | Cenário Atual | Cenário Proposto |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| Tempo Médio Processamento (min) | 2.048,50 | 1.841,25 |
| Custo Médio Processamento (R\$) | 3.401,25 | 3.013,75 |
| Tempo Médio Fila (min) | 4,15 | 2,62 |
| Tempo Total Produção (min) | 2.567,75 | 2.168,75 |
| Tempo Médio Produção por Peça (min) | 20,53 | 17,35 |

Fonte: Autoria própria (2013).

Tabela 9 - Resultados por features

| Recurso / Feature | Features | Cenário Atual | | Cenário Proposto | |
|------------------------------|-----------------|----------------------|------------|-------------------------|-------------|
| | | Tempo(m) | Custo(R\$) | Tempo(m) | Custo (R\$) |
| Fresa / Rasgo | Rasgo | 7,42 | 12,60 | 7,42 | 12,60 |
| | Semi-Furo | 2,84 | 5,20 | | |
| Furadeira / Furo | Furo (D=15) | 3,64 | 5,18 | 3,64 | 5,18 |
| | Furo (D=10) | 2,36 | 4,20 | 2,36 | 4,20 |
| | Semi-Furo | | | 1,18 | 2,10 |
| | | | | | |

Fonte: Autoria própria (2013).

A partir dos resultados das Tabelas 7, 8 e 9 foi realizada uma análise da aplicação. Os resultados mostram que o cenário proposto gerou uma redução de tempo e custo em relação ao cenário atual da empresa.

A Tabela 7 detalha que os processos de fresamento (927,50 min) e de furação (897,50 min), no cenário proposto, ficaram com os tempos de processamento mais balanceados em relação ao cenário atual que tem os tempos de fresamento (1.282,50 min) e a furação (750,00 min). A tabela ainda mostra que houve uma redução no tempo de fila do recurso restrição fresa de 518,75 minutos para 327,50 minutos.

Já a Tabela 8 mostra a redução entre o cenário atual e proposto no tempo e no custo de processamento em torno de 10,11% e 11,39 %, respectivamente. Tal tabela também detalha a redução do tempo médio de fila por peça no sistema de manufatura de 36,86% e, conseqüentemente, a redução do tempo médio de produção de uma peça de 20,53 minutos para 17,35, o que significa uma redução 15,49%.

Prosseguindo, a Tabela 9 detalha o porquê das melhorias do cenário proposto em relação ao cenário atual. O recurso furadeira produz as *Features* semi-furo em um menor tempo e custo do que o recurso fresa. Essa redução foi de 58,45% no tempo e 59,61% no custo de fabricação dos semi-furos. No cenário proposto o recurso fresa produz somente os rasgos num tempo de 7,42 minutos ao custo de R\$12,60 enquanto o recurso furadeira produz as *Features* circulares (furos e semi-furos) num tempo de 7,18 minutos ao custo de R\$11,48. Portanto, no cenário proposto, os tempos e os custos ficaram balanceados reduzindo assim o tempo de fila e, conseqüentemente, o tempo de produção de uma peça.

A solução proposta nessa aplicação não necessita de investimento para ser implantada. A implantação depende somente de um treinamento dos operários do recurso furadeira para produzir os semi-furos nas laterais dos rasgos com a mesma qualidade que eram fabricados no recurso fresa.

6. Conclusões Finais

O presente trabalho aplicou a tecnologia de *Features* como base para o desenvolvimento de um modelo para simulação de sistemas de manufatura. As *Features* apresentam-se como uma vantagem competitiva no desenvolvimento da simulação, 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.

Entre os diferenciais e contribuições do modelo apresentado neste trabalho pode-se destacar:

1. A união de tecnologias de diferentes áreas como *Features*, simulação computacional e para análise de desempenho de sistemas de manufatura existentes ou não.
2. Flexibilidade na experimentação de sistemas de manufatura. O sistema permite ao usuário realizar as mais diversas combinações de recursos e *Features* para a fabricação de uma peça.
3. Facilidade para a realização de mudanças nas condições de simulação do sistema.

4. Possibilidade de ampliação da biblioteca de *Features*, recursos e, conseqüentemente, da quantidade de peças a serem simuladas.

Com o desenvolvimento do estudo de caso foi alcançado o objetivo proposto no trabalho. Foi proposto um para simulações de sistemas de manufatura baseado na tecnologia de *Features*. Esse modelo foi modelado, desenvolvido e testado mostrando que sua utilização é um diferencial na tomada de decisão. A partir do cenário simulado pode ser ver os ganhos obtidos nos principais indicadores baseados em tempo e custo pela empresa a partir de uma melhor utilização dos seus recursos de acordo com a *Feature* a ser fabricada.

Abstract

This paper presents the use of Features as a reference in the simulation of manufacturing systems. The work was structured based on reviews of literature on the concepts of Manufacturing Systems, Simulation and Features. The objective of this study is to propose a model for simulations of manufacturing systems base on Features technology. From these simulations, the user can make decisions based on indicators such as total cost and manufacturing time, cost and time for features and transportation of resources, queue time and utilization rate of resources in specific manufacturing system without changing the daily life of the company. Regarding research methodology, the work is based in an applied nature, how to approach is quantitative, descriptive research and is a technical procedures used in this study were a literature review and case study. To experimentation the proposed model was developed an application in a real manufacturing system which shows the potential of the model. The results of application show the reduction between the current and proposed scenario in median time to produce a piece of 17.35 to 20.53 minutes, which means a reduction 15.49%. These results were obtained because the proposed model enables a better balancing of the production system from the interconnection between Features and manufacturing capabilities.

Key-words: manufacturing systems, simulation, features.

Referências

ABDUL-KADER, W.; GHARBI, A. Capacity estimation of a multi-product unreliable production line. **International Journal of Production Research**, v.40, n.18, 4815-4834. 2002.



AGOSTINHO, L. O.; VILELLA, R. C.; BUTTON, S. T. **Processos de fabricação e planejamento de processos**. Apostila da Disciplina Introdução à Engenharia de Fabricação da Engenharia Mecânica da Unicamp. 2004.

ÁLVARES, A. J. **Uma metodologia para integração CAD/CAP./CAM voltada para manufatura remota de peças rotacionais baseada na internet**. 2005. 303 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos**. 2 ed. São Paulo: Bookman. 2006.

BANKS, J.; CARLSON, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-event system simulation**. 5a.ed New Jersey: Prentice-Hall, 2009.

BENAVENTE, J. C. T. **Um sistema para o projeto e fabricação remota de peças prismáticas via internet**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

BHANDARKAR, M. P.; DOWNIE, B.; HARDWICK, M.; NAGI, R. Migrating from IGES to STEP: one to one translation of IGES drawing to STEP drafting data. **Computers in Industry**, v. 41, n.3, p.261–277, 2000.



BLACK, J. T. **Projeto da fábrica com futuro**. Porto Alegre: Bookman. 1998.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. **Gestão Logística de Cadeias de Suprimentos**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BRAGHIROLI, L. F. **Estudo da linearidade da produção em células de manufatura através de simulação a eventos discretos**. 2009. 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COP.INI, N. L. **Tecnologia de usinagem dos materiais**. 3ª ed. São Paulo: MM editora. 2001.

FARIAS, J. B. S. **Desenvolvimento de um sistema semi-generativo para planejamento de processo auxiliado por computador para ambiente de usinagem**. 2008. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blucher. 1985.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicação em Arena**. Florianópolis: Visual Books. 2008.

GAO, J.; ZHENG, D.; GINDY, N. Mathematical representation of feature conversion for CAD/CAM system integration. **Computational Integration Manufacturing**, v.20, n.5, p. 457–467, 2004.



GUERRINI, F. M.; COELHO, R. T. **Tecnologias avançadas de manufatura: Coleção Fábrica do Milênio -volume I**. Jaboticabal: Novos talentos. 2005.

HAYASA, M.; ASIABANPOUR, B. Extraction of manufacturing information from design-by-features solid model through feature recognition. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, v. 44, p.1191-1203, 2009.



HALEVI, G.; WEILL, R. D. **Principles of process planning: a logical approach**. Chapman & Hall, 1995.



HAN J.; REQUICHA, A. A. G. Feature recognition from CAD models. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 18, n.2, p. 80–94. 1998.



HARREL, C.; TUMAY, K. Simulation made easy. **IIE Solutions**, p.39-41, July. 1997.

HARREL, C. R.; GHOSH, B. K.; BOWDEN, R. **Simulation Using Promodel**. McGraw-Hill. 2000.

YINGJIE, Z.; AI, X. New Approach to process planning using feature-based techniques. **IEEE International Conference on Industrial Technology**, p. 1-6, 2008.



KUMAR, S.; SINGH, R. A short note on an intelligent system for selection of materials for progressive die components. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v.182, p.456–461, 2007.



LAW A. M.; MCCOMAS, M. G. **Simulation of manufacturing systems**. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. 1999.

LEE, H. Rule-based process planning by grouping features. **KSME International Journal**, v.18, n.12, p.2095-2103. 2004.

LOPES, H. S.; CARMO, B. B. T.; DUTRA, N. G. S.; PONTES, H. L. J. Simulação do transporte de minério de ferro na hidrovía do Araguaia-tocantins. **Revista Gestão Industrial**, v. 7, n.1, p.43-71, 2011.



LUI, Z.; WANG, L. Sequencing of interacting prismatic machining features for process planning. **Computers in Industry**, n.58, p. 295-303. 2007.



MAGALHÃES, J. S. F. **Sistema variante para seleção de máquinas-ferramenta**. 2008. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

MATTOS, M. A. C. **Sistemas de informação: uma visão executiva**. São Paulo: Saraiva. 2005.

MIRANDA, R. C.; FERNANDES, B. C.; RIBEIRO, J. R. MONTEVECHI, A. B.; PINHO, A. F. Avaliação da operação de setup em um célula de manufatura de um indústria de autopeças através da simulação a eventos discreto. **Revista Gestão Industrial**, v.6, n. 3, p.01-21, 2010.



MOREIRA, D. A. **Administração da produção e operações**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

O'KANE, J. F. SPENCELEY, J. R. TAYLOR, R. Simulation as an essential tool for advanced manufacturing technology problems. **Journal of Materials Processing Technology**, v.107, p.412-424, 2000.



PALOMINO, R. C. **Um modelo baseado em redes de petri para o planejamento e a programação da produção em ambientes do tipo job shop**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

PASSOS, C. A. S. **Simulação de sistemas de manufatura**. 1986. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1986.

PERERA, T.; LIYANAGE, K. Methodology for rapid identification and collection of input data in the simulation of the manufacturing systems. **Simulation Practice and Theory**, n.7, p.645–56. 2000.



PIDD, M. **Modelagem empresarial: ferramentas para tomada de decisão**. Porto Alegre: Artes Médicas. 1998.

PORTO, A. J. V.; PALMA, J. G. **Da Manufatura Virtual à Simulação e à Realidade Virtual**. In: *Fábrica do Futuro: entenda hoje como sua indústria vai ser amanhã*, ed. Banas, 2000.

POZO, H. **Administração de recursos materiais e patrimoniais: uma abordagem logística**. 4ª ed, São Paulo: Atlas, 2007.

PRADO, D. S. **Teoria das filas e da simulação**. 2ª vol. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1999.

PRITSKER, A. A. B. **Introduction to simulation and SLAM II**. New York: John Wiley & Sons, 1986.

RYAN, J.; HEAVEY, C. Process modeling for simulation. **Computers in Industry**, v.57, p.437-450, 2006.



SHAH, J. J.; MANTYLA, M. **Parametric and Feature-Based CAD/CAM: Concepts, Techniques, and Applications**. New York: John Wiley Sons Inc. 1995.

SHANNON, R. E. **Introduction to the art and science of simulation**. In: *Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference*. P.07-14. 1998.

SLACK, N. **Vantagem Competitiva em Manufatura**: atingindo competitividade nas operações industriais. São Paulo: Atlas, 1993.

STAIR, R. M.; REYNOLDS, G. W. **Princípios de sistemas de informação**. 6^a ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

SUDARSAN, R.; FENVES, S. J.; SRIRAM, R. D.; WANG, F. A product information modeling framework for product lifecycle management. **Computer Aided Design**, v.37. p. 1399-1411. 2005.



ZHOU, X.; QIU, Y.; HUA, G.; WANG, H.; RUAN, X. A feasible approach to the integration of CAD and CAP. **Computer-Aided Design**, Elsevier. v. 39, p.324–338. 2007.



Dados dos autores:

Nome completo: **Heráclito Lopes Jaguaribe Pontes**

Filiação institucional: Universidade Federal do Ceará

Departamento: Engenharia Mecânica e de Produção

Função ou cargo ocupado: Professor

Endereço completo para correspondência (bairro, cidade, estado, país e CEP): Rua Fonseca Lobo 601, Apt: 502. Bairro: Aldeota, Fortaleza-Ceará

Telefones para contato: (85) 9981-7639

e-mail: hjaguaribe@ufc.br

Nome completo: **Arthur José Vieira Porto**

Filiação institucional: Universidade de São Paulo

Departamento: Engenharia Mecânica

Função ou cargo ocupado: Professor

Endereço completo para correspondência (bairro, cidade, estado, país e CEP): Av. Trabalhador São-Carlense 400, Centro, 13560-250 - Sao Carlos, SP – Brasil

Telefone para contato: (16) 3273-9432 Fax: (16) 3273-9402

e-mail: ajvporto@sc.usp.br

Enviado em: 02/10/2012

Aprovado em: 28/02/2013