

## **CENÁRIO DE MANUFATURA INTEGRADA: Engenharia Reversa e *Redesign* de Produtos.**

Wanderson de Oliveira Leite, wandersonol@uai.com.br<sup>1</sup>

Eduardo Romeiro Filho, romeiro@ufmg.br<sup>1</sup>

Paulo Eustáquio de Faria, paulofaria@ufmg.br<sup>1</sup>

Juan Carlos Campos Rubio, juan@ufmg.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Av. Antônio Carlos, 6.627, Pampulha, Belo Horizonte, MG - Brasil. CEP. 31270-901

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Mecânica, Av. Antônio Carlos, 6.627, Pampulha, Belo Horizonte, MG - Brasil. CEP. 31270-901

**Resumo:** *o presente trabalho tem como objetivo apresentar a proposta de um cenário em um ambiente acadêmico para o desenvolvimento de produtos parametrizados ou customizados, tendo como ponto de partida o uso da engenharia reversa. Assim, a identificação e mensuração de parâmetros a partir de produtos de referência demandaram ações de natureza técnica distintas das ações usualmente previstas nos processos tradicionais de desenvolvimento de produto integrados à manufatura. Ao mesmo tempo, vislumbrando um ambiente de engenharia integrada por computador, a associação de tecnologias como digitalizadores tridimensionais, sistemas CAD modeladores de superfícies, prototipagem rápida, entre outras, faz parte do cenário proposto. Por fim, o estudo da prática desenvolvido, ou seja, o redesign do produto e a adequação de sua manufatura, não se resumiu à simples reprodução do produto atualmente comercializado, pois a partir das ferramentas utilizadas pode-se desenvolver um produto customizado e um processo flexível de desenvolvimento de novos produtos.*

**Palavras-chave:** *Engenharia Reversa, Redesign de Produtos, Sistema integrado de manufatura, Modelagem Parametrizada, Digitalizadores Tridimensionais.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Muitas maneiras de organizar, integrar e gerenciar as corporações foram desenvolvidas na última década. Mesmo assim, as indústrias brasileiras apresentam muita dificuldade na adoção e execução da proposta de desenvolvimento integrado de produtos. Contudo, novas técnicas têm despontado, como a engenharia simultânea (*concurrent engineering*) e a manufatura integrada por computador (*computer integrated manufacturing* - CIM), e nesse ambiente de engenharia integrada destaca-se a engenharia reversa (*reverse engineer* - ER), que inicialmente se restringia ao uso específico da indústria automobilística, de *software* e, também, a propósitos de manutenção (reprodução).

O que se vê, segundo Raja *et al.* (2008), é que a ER vem evoluindo ao longo dos anos, de processo manual para uma ferramenta de engenharia que utiliza sofisticados *softwares* computacionais e modernos instrumentos de medição. Ela expandiu-se rapidamente desde sua origem para áreas de projeto e produção. Essa expansão é o resultado de uma mudança no processo de projeto e manufatura e do desenvolvimento de equipamento específico para dar suporte à engenharia reversa, bem como da constante necessidade de reduzir-se o tempo de desenvolvimento de novos produtos.

Nesse contexto de associação de tecnologias como digitalizadores tridimensionais, sistemas de projeto auxiliado por computador (*computer aided design* - CAD), modelos matemáticos computacionais de refinamento de dados, a prototipagem rápida (*rapid prototyping* - RP), entre outras, é a principal responsável pelo intercâmbio entre as engenharias. No presente artigo será abordada a proposta de um cenário de manufatura integrada em um ambiente acadêmico para o desenvolvimento de produtos, tendo como ponto de partida o uso da engenharia reversa associado às melhorias na manufatura do produto integrando projeto e produção.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Engenharia Reversa

O processo de duplicar uma parte existente, montagem parcial, produto sem desenhos, documentação ou um modelo de computador é conhecido como engenharia reversa. A ER também é definida como o processo de obtenção um modelo de CAD tridimensional (3D) a partir da digitalização de um modelo físico existente por meio de escaneamento de pontos ou nuvem de pontos (Raja *et al.*, 2008). Abella *et al.* (1994) descreveu ER como o conceito básico de produzir um produto inicial em um modelo final ou físico sem o uso de um “desenho de engenharia”. Por outro lado, para Yau *et al.* (1993), a ER é o processo de refazer as geometrias de produtos manufaturados por meio da digitalização e modificando um modelo de CAD existente.

Contemporizando, pode-se definir de forma simplificada a engenharia reversa como o processo de criar um objeto computacional (de duas ou três dimensões) partindo-se de um modelo real (produto completo ou parcial) no qual aplicativos gerenciam os arquivos digitalizados. Entendem-se aqui por aplicativos os *softwares* de desenho, manufatura ou medição. Isso permitirá importar em determinados formatos os dados obtidos por meio de digitalização com apaladores mecânicos ou leitores ópticos com o objetivo de criar um modelo ou protótipo, interfaceando-se ferramentas computacionais (Ferreira *et al.*, 2003 e Volpato, 2007).

Sua principal aplicação está relacionada à atividade industrial e possibilita tornar os sistemas produtivos mais ágeis e flexíveis. Em geral, as empresas que desenvolvem produto investiram na última década em CAD, CAM, RP e em uma gama de novas tecnologias que proveem benefícios financeiros, encurtando o tempo de desenvolvimento de produtos e tornando-se mais competitivas. A engenharia reversa é agora considerada, segundo Raja *et al.* (2008), uma das tecnologias que proveem também tais benefícios, principalmente encurtando o ciclo de desenvolvimento de produto.

### 2.2. Digitalização

O conceito de digitalização abrange principalmente o aspecto de capturar (extrair) informações com base em pontos em um espaço 3D cujo modelo físico é referenciado por um sistema de coordenadas cartesianas. Com a extração da informação em três dimensões, pode-se, então, trabalhar as formas do sólido diretamente num *software* de CAD ou CAM 3D (Zhang *et al.*, 2003).

Os digitalizadores tridimensionais são *scanners* 3D com capacidade para obter as coordenadas tridimensionais de um objeto sólido real. A aquisição dos dados pode ser feita num modelo reduzido ou até mesmo em tamanho normal.

Existem vários métodos com os quais se podem extrair dados de uma superfície, classificados em seis grandes categorias: métodos de digitalização por contato; métodos de digitalização sem contato; métodos de medição manuais; iluminação estruturada e *spot ranging* (Legge, 1996). Quanto ao processo, são utilizados equipamentos compostos basicamente de sensores de alta definição que têm como função a captação, ponto a ponto, do formato de uma peça. Os sensores utilizados podem ser: apaladores, a *laser* e óticos por luz branca ou por ondas magnéticas (Guerreiro, 1999). Ainda, quanto ao aspecto tecnológico utilizado para capturar, existem diferentes sistemas que funcionam integrados ou não a *softwares* CAD, como as máquinas de medir por coordenadas (CMM) e digitalização a *laser* (Zhang *et al.*, 2003).

### 2.3. Prototipagem Rápida

A prototipagem rápida, desenvolvida há cerca de duas décadas, permite a construção de um modelo em poucos dias ou horas a partir da materialização de desenhos ou modelos virtuais projetados em computador, a partir de sistemas CAD, CAM, CAE e outros com alta fidelidade (Volpato, 2007). A primeira técnica comercial de PR, a estereolitografia, surgiu em 1987. Atualmente, existem mais de 30 diferentes processos de RP, nem todos disponíveis comercialmente. Abordagem bastante comum consiste em dividir os processos de PR em dois grupos:

- Prototipagem aditiva: sistemas que trabalham com adição de material como, por exemplo, a esterolitografia e podem ser chamados de *solid freeform fabrication*;
- prototipagem subtrativa ou SRP (*subtractive rapid prototyping*): cujos modelos são obtidos pelo desbaste sucessivo de blocos de diversos materiais, desde metais aos polímeros (*nylon*, ABS, poliacetal, acrílico, etc.) em máquinas *desktops* (equipamentos pequenos) desenvolvidas para escritórios. Esses equipamentos trabalham com baixo nível de ruído, utilizam a rede doméstica de energia elétrica e não empregam refrigeração e filtragem. São fáceis de operar e geralmente adotam *software* CAM integrado e otimizado (Curtis, 2006).

Em geral, as máquinas de RP utilizam dois processos automáticos para conversão do modelo 3D: a) o arquivo 3D é cortado (fatiado) em uma série de arquivos de CAD 2D para utilização posterior das partes; b) arquivo 3D é cortado (fatiado) automaticamente, gerando vetores para processadores de dois eixos e meio, com a possibilidade de ajustes manuais (*software* CAD/CAM). Tais dados são então descarregados para a máquina, que irá processar a sequência sucessiva de camadas ou vetores (coordenadas) até que a peça seja gerada (Hilton *et al.*, 2000).

## 2.4. Sistemas Integrados de Manufatura

A manufatura integrada por computador (CIM) surgiu nas últimas décadas como forma de integrar a engenharia e a produção. É um sistema que envolve todas as etapas da produção, desde a concepção inicial do produto até sua inspeção (*computer aided inspection* – CAI), com a aplicação de programas que integram o projeto do produto e a sua manufatura, oferecendo flexibilidade, integração de dados e apoio durante o ciclo de vida do produto (Lepikson, 2005 e Osiris Júnior, 2007).

Do ponto de vista da tecnologia da informação, a CIM está relacionada ao auxílio de computadores, ao controle e automatização integrada em todos os níveis da fábrica, ligando equipamentos em um sistema de fluxo contínuo. Esses equipamentos e *softwares* automatizados da fabricação incluem máquinas de controle numérico (NC), controle numérico direto (*direct numerical control* - DNC), controle numérico computadorizado (CNC), planejamento de materiais (*material requirement planning* - MRP), planejamento dos recursos (*manufacturing resource planning* - MRP II), CAD, planejamento assistido por computador (CAPP), manufatura assistida por computador (CAM), armazenamento automatizado, aparelho de manutenção controlado por computador, máquinas de medir em três coordenadas (MM3C) ou braços articulados de medição tridimensional associados a *softwares* de qualidade assistida por computador (*computer-aided quality assurance* - CAQ) e robótica (Lepikson, 2005 e Romeiro Filho, 2007).

Assim sendo, a CIM é obtida pela aplicação de ferramentas computacionais na automação de todo o sistema de manufatura, permitindo, a partir da informação, da computação e da automação, a integração de todas as atividades de produção de uma empresa. Esses sistemas prometem muitos benefícios que incluem melhor aproveitamento da capacidade fabril, número reduzido de máquinas-ferramenta, custos de mão-de-obra reduzidos, curto prazo de produção, curto espaço físico e reduzidos custos de instalação (Marri *et al.*, 1998; Pereira *et al.*, 1998 e Yoshimura, 2007). É notório que o avanço tecnológico e a difusão das ferramentas computacionais de auxílio às diversas atividades de desenvolvimento de produto e manufatura possuem muita influência sobre a aplicabilidade e o desenvolvimento do conceito. Para tanto, é necessário gerar, processar e compartilhar informações entre as etapas de processo de manufatura; e nesse ambiente a ER permite fechar o ciclo entre o que é "desenvolvido" e o que é "realmente manufaturado", com utilização compartilhada de informações por meio de sistemas informatizados (Raja *et al.*, 2008).

## 2.5. Engenharia Reversa: no Contexto do Desenvolvimento de Novos Produtos

Apesar de possuir algumas etapas semelhantes, a engenharia reversa difere do processos tradicional de desenvolvimento de produtos, por utilizar como ponto de partida um produto já concebido (na metodologia tradicional, o desenvolvimento inicia-se com a concepção de uma nova ideia). Em um sistema de ER, o ponto de partida está em produtos já existentes e não em ideias concebidas. A Tabela 1 descreve as cinco fases típicas da ER e seu paralelo no processo tradicional de desenvolvimento de produtos (Silva *et al.*, 2005).

**Tabela 1 . Sequência de atividades que caracterizam o desenvolvimento de produtos e a Engenharia Reversa. Adaptado de ( Ingle, 1994 )**

<i>Processo tradicional</i>	<i>Engenharia Reversa</i>
Necessidade	Produto
Ideia de um novo <i>design</i>	Desmontagem
Protótipo & teste	Medição & testes
Produto	Recuperação do <i>design</i>
	Protótipo & teste
	Produto ER

Quanto à utilização da metodologia de engenharia reversa para *redesign* de produtos, existem poucos trabalhos na literatura relacionados ao tema, limitando-se estes à descrição de métodos de aquisição de dados pela digitalização de imagens (Boulanger, 1998; Geiger *et al.*, 1994 e Lee *et al.*, 1998). Ao mesmo tempo, duas abordagens mais abrangentes sobre o assunto podem ser encontradas nos trabalhos de Ingle (1994) e Otto *et al.* (1996 e 1998). A abordagem proposta por Ingle (1994) concentra-se em atividades e tecnologias que permitam a reprodução fiel de uma peça ou sistema, partindo-se do pressuposto de que a mesma não necessita de alterações. Por outro lado, Otto *et al.* (1996 e 1998) apresentam metodologia de *redesign* em que a ER é utilizada como ferramenta de apoio ao desenvolvimento do produto.

## 3. METODOLOGIA

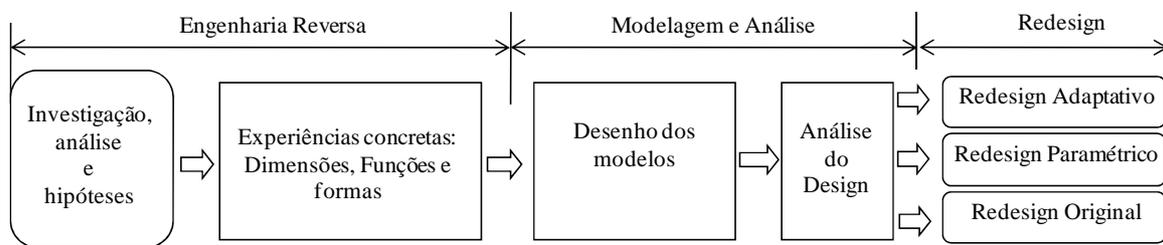
### 3.1. Estudo da Prática

Tendo como referência a aplicabilidade do método em médias e pequenas empresas (MPEs) e no meio acadêmico, este artigo abordou uma proposta de um cenário votado para a fabricação de produtos com baixa complexidade e com o uso de equipamentos de baixo custo e/ou terceirização de etapas. Assim sendo, no meio acadêmico essa experiência

resultou na integração de três laboratórios de pesquisa, sendo dois de Engenharia de Produção e um de Engenharia Mecânica. Quanto à aplicabilidade em MPEs, fica evidente a necessidade de terceirização de parte do serviço relacionado ao projeto, como digitalização da geometria do produto, análise de engenharia (CAE) e prototipagem rápida.

### 3.2. Engenharia Reversa: *Redesign* de Produtos

Então, seguindo a metodologia dos trabalhos de Otto *et al.* (1996 e 1998), a Fig. 1 apresenta sinteticamente a metodologia proposta e adaptada para a pesquisa.



**Figura 1. Metodologia geral da engenharia reversa e redesign. Adaptado de (Otto *et al.*, 1996 e 1998).**

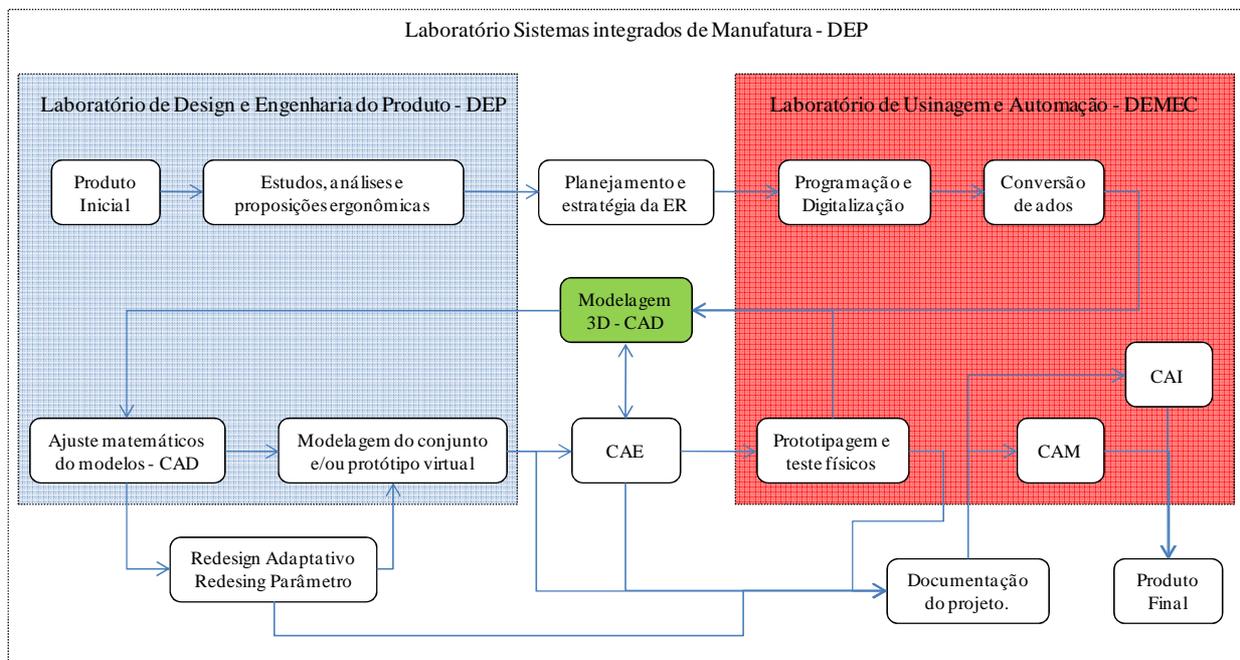
Três etapas distintas são apresentadas nessa metodologia: engenharia reversa, modelagem e análise e *redesign*.

Na primeira, engenharia reversa, o produto é tratado como uma caixa preta a qual precisa ser interpretada quanto às suas funcionalidades e a respeito das necessidades do cliente.

A segunda etapa inclui o estudo formal do produto, desmontagem, projeto para a análise da fabricação, análise funcional e geração de especificações finais do projeto. Nessa etapa também se incluem o desenvolvimento e a execução do projeto, análise e estratégia da digitalização, modelamento, ajustes matemáticos e experimentações.

A etapa final da metodologia inicia-se com o *redesign* do produto, baseado nos resultados dos procedimentos anteriores. O *redesign* paramétrico, nesse caso, pode ser implementado usando-se a análise da otimização matemática (*nurbes surfaces*) dos modelos do projeto e a parametrização das *features* pelo *software* CAD.

Assim sendo, citando os trabalhos de Otto *et al.* (1996) e Nogueira *et al.* (2006), a implementação do método no meio acadêmico, conforme já exposto, e suas relações são apresentadas na Fig. 2. Descrições adicionais podem ser encontradas em seus respectivos trabalhos, bem como orientações sobre ER no trabalho de Raja *et al.* (2008).



**Figura 2. Diagrama da interação e integração dos laboratórios e método de ER integrada à manufatura.**

Apesar de apresentar no diagrama laboratórios separados, entende-se como laboratório de sistemas integrados de manufatura todos os integrantes dos dois laboratórios, formando-se uma equipe multidisciplinar e/ou multidepartamental de pesquisa que integra o projeto e a produção.

## 4. REDESIGN DE PRODUTOS EM UM CENÁRIO INTEGRADO

### 4.1. Metodologia de Implementação do Cenário

A implementação do cenário integrado utilizando-se ER consistiu na integração dos equipamentos de manufatura como máquinas-ferramenta e os equipamentos e acessórios auxiliares empregados nas fases de projeto, como *softwares* de CAD e CAM. Todos esses equipamentos são conectados e controlados por microcomputadores que, por sua vez, operam com os *softwares* necessários ao controle e à troca de informações entre os equipamentos componentes do sistema de manufatura. Fez-se a implementação de acordo com as seguintes etapas:

- Determinação das aplicações do sistema. A partir dos equipamentos disponíveis, determinaram-se as possíveis aplicações do sistema.
- Estudo e determinação das ferramentas computacionais a serem utilizadas no sistema.
- Escolha dos *softwares* necessários ao controle e à troca de dados entre os equipamentos, de forma que o sistema pudesse desempenhar as aplicações estabelecidas no item anterior.
- Implementação do sistema.
- Delimitação de exemplo prático.
- Análise dos resultados, conclusões e melhorias.

### 4.2. Equipamentos Disponíveis

Relação dos equipamentos utilizados no sistema de manufatura e suas especificações principais:

#### A) Centro de Usinagem ROMI *Discovery 560*

Especificações:	Cursos:	Avanços rápidos:
	X = 560 mm	X = 25 m/min
	Y = 406 mm	Y = 25 m/min
	Z = 508 mm	Z = 20 m/min
Motor principal:	12,5 cv	

#### B) Equipamento de usinagem (fresadora) e digitalização 3D *Vertical Mill MAXNC 10 Open Loop*

Especificações: tamanho da mesa	304,8 x 101,6 mm
Área de trabalho	302,26 x 127 x 152,4mm
Função de <i>scanner</i> 3D	Sensor: Piezo Sensor; comprimento da sonda 60 mm, diâmetro da ponta 0,8 mm
	Método de escaneamento: contato; passo de escaneamento: eixo X/Y 0,05 mm a 5,00 mm a cada 0,05 mm e eixo Z 0,025 mm.

#### C) Equipamento Prototipagem Rápida Subtrativa *Roland MDX-20*

Especificações: tamanho da mesa	220 mm x 160 mm
Área de trabalho	203,2 mm x 152,4 mm x 60,5 mm
Motor DC de 10 W;	
Função de parprototipagem rápida subtrativa	Resolução mecânica: 0,00625 mm/ passo; Rotação: 6500 rpm; Avanço: 0,1 a 15 mm/s; Material usinável: madeira, resina, cera de modelagem, cibatoool (r), alumínio, latão etc.

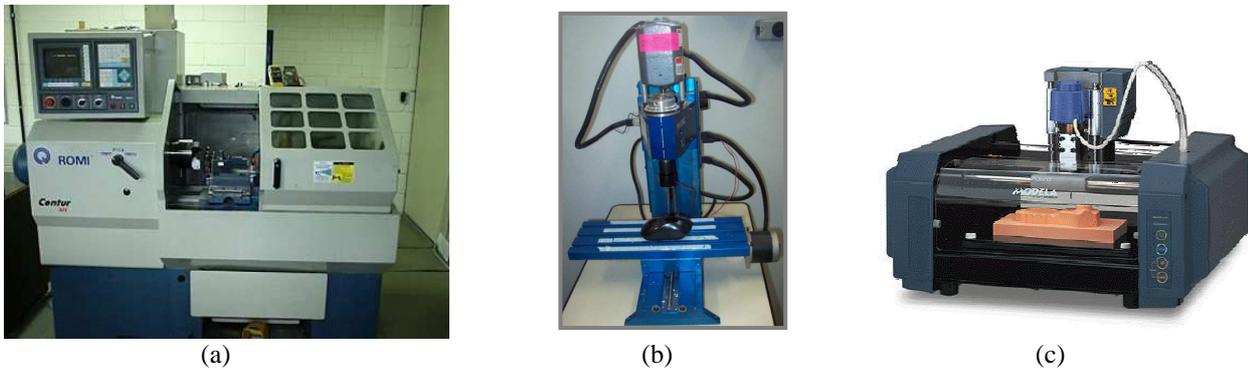
### 4.3. Determinação das Ferramentas Computacionais Utilizadas

Escolheram-se os *softwares* a serem utilizados no sistema de manufatura de maneira que todos pudessem compartilhar informações entre si. Desta forma, todos os sistemas CAD e CAD/CAM escolhidos foram capazes de operar com sistema de arquivos integrado (o arquivo do *software* da fase atual incorpora o arquivo anterior do processo), para que os dados fossem inter-relacionados de uma etapa para outra durante a produção de uma peça.

Sistemas utilizados:

- *Software* CAD para digitalização de imagens *MAXNC Digitalize*. Utilizado para controlar o digitalizador tridimensional e definir os parâmetros de digitalização, converte as coordenadas do objeto digitalizado em uma estrutura de segmento de linhas 3D ou nuvem de pontos.

- *Software* CAD modelador de superfície, edição de imagens e ajuste matemático de superfícies *Rhinoceros 4.0* e *software* de modelamento de sólidos, moldes, montagem e detalhamento *SolidWorks 2009*. Utilizados para ajuste de dados digitalizados (modelo matemático *NURBS*). Posteriormente, integração de dados com *SolidWorks* (integração dual entre softwares) para modelagem do sólido, análises, projeto do molde e CAM.
- Programa CAD/CAM para controle do equipamento de prototipagem *Roland DG MODELA Player 4*. Utilizado para definir os parâmetros de usinagem do equipamento de prototipagem rápida.
- *Software* CAD/CAM para programação do centro de usinagem, *EdgeCAM 2009 by SolidWorks*. Utilizado para gerar, a partir dos arquivos em formato *SolidWorks* da peça a ser usinada, os códigos de programação e os parâmetros do processo.
- Por fim, o *software* CAE de análise por elementos finitos, *Cosmos by SolidWorks 2009*.

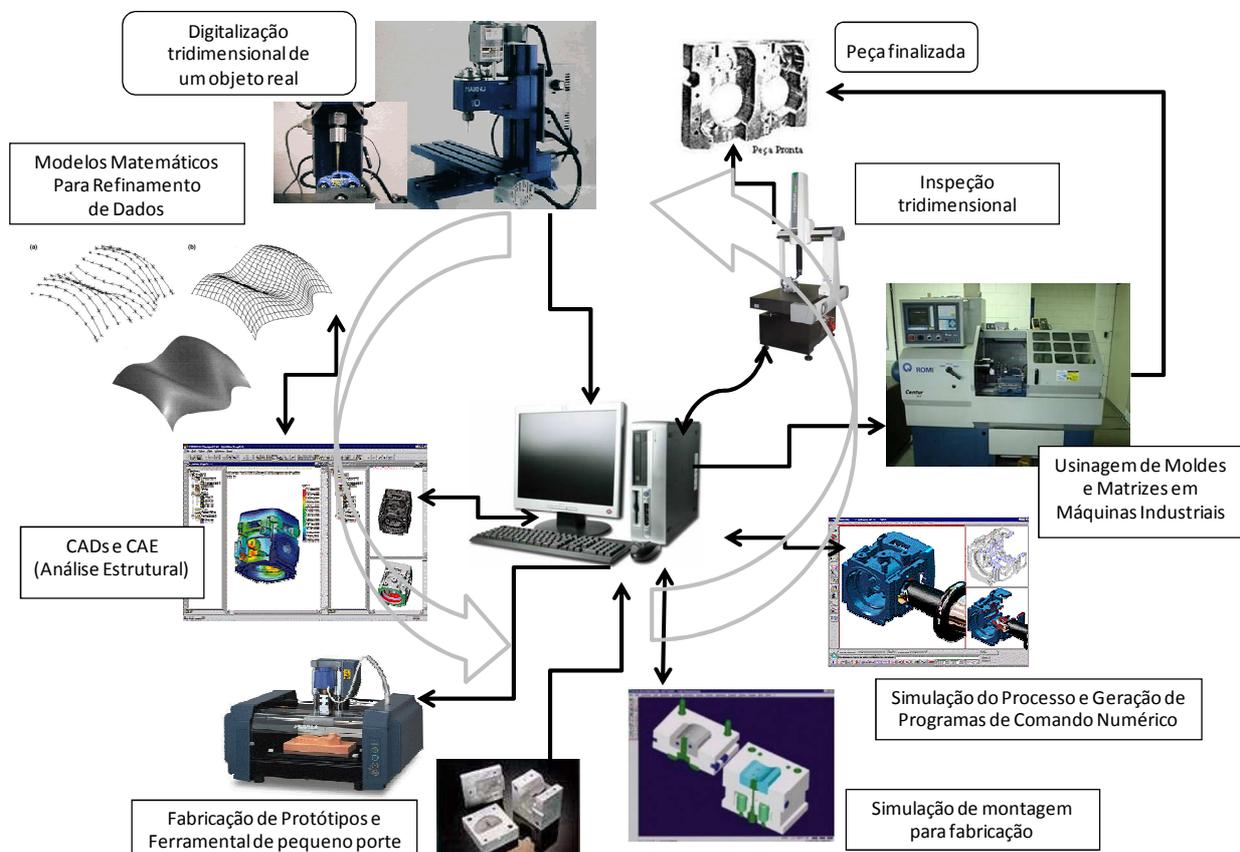


**Figura 3 – Principais equipamentos utilizados.**

**a) Centro de usinagem ROMI Discovery 560; b) Equipamento de ditalização 3D Vertical Mill MAXNC 10 Open Loop e c) Equipamento de prototipagem Roland MDX-2.**

#### 4.4. Implementação do Cenário

O cenário foi implementado com a utilização de um microcomputador no qual todos os *softwares* foram instalados. Nele foram conectados o equipamento e o centro de usinagem, conforme Fig. 4.



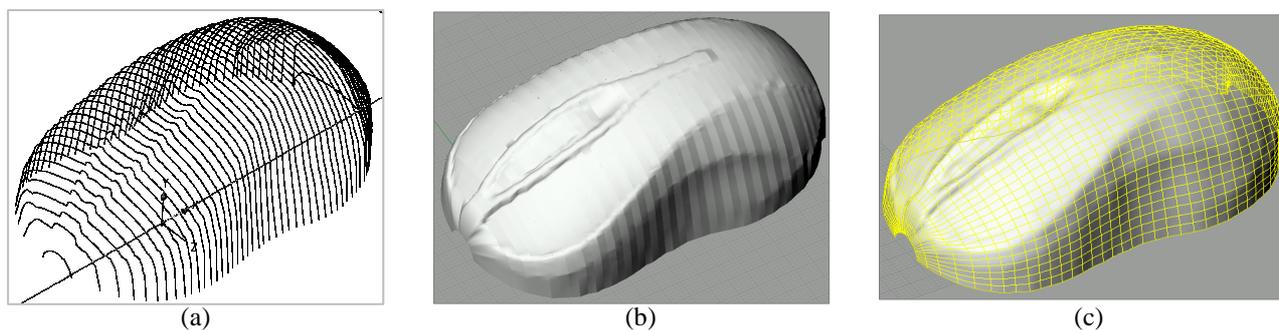
**Figura 4 - Esquema funcional do cenário integrado de manufatura idealizado.**

#### 4.5. Redesign de Ferramental para Peças Plásticas Injetáveis: Caso Prático

O caso prático apresentado a seguir descreve o emprego da metodologia proposta na adaptação de um *mouse*, produzido por um fabricante brasileiro de periféricos de Informática. Melhorias e modificação no produto e em seu processo de fabricação, resultantes da aplicação da ER, foram o objetivo principal. A metodologia proposta, relatada nas seções anteriores, foi implementada em 12 etapas: planejamento do experimento; coleta de dados; verificação da qualidade dos dados; montagem e refinamento 2D; criação da malha e refinamento 3D; criação do sólido e ajustes de contorno; *redesign* do conjunto; análise CAE do conjunto; prototipagem rápida; validação do modelo; desenvolvimento do molde; documentação técnica e implementação.

Após o planejamento dos experimentos, a coleta de dados, ou seja, a realização da digitalização ou escaneamento 3D, foi realizada com o equipamento de digitalização 3D *Vertical Mill MAXNC 10 Open Loop*. A digitalização da parte superior do produto 3D foi definida no planejamento como sendo de forma setorial, ou seja, o produto foi digitalizado em partes para posterior montagem 3D em um *software* CAD, otimizando, assim, o tempo de digitalização. Os dados convertidos foram montados em *software* CAD utilizando o recurso de alinhamento 3D, tomando como referência o ponto zero dos arquivos e planos de referência (*front, top e right*). Esse processo resultou em uma sequência de linhas ligando o conjunto de pontos capturados na digitalização, conforme mostrado na Fig. 5a. Por fim, foi realizada a validação do contorno gerado e o prosseguiu-se para a próxima etapa. Para correção da montagem, foram usadas linhas tridimensionais ligando as partes.

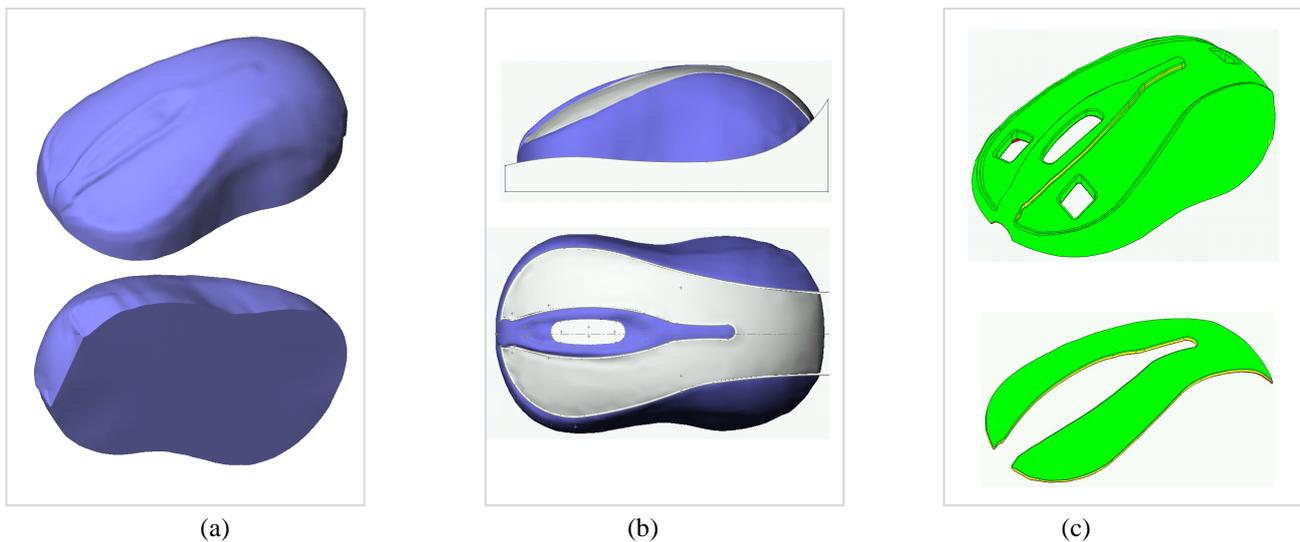
Criadas as linhas de contorno e/ou perfil do produto, deu-se início ao desenvolvimento da criação da malha e refinamento dos dados. Nessa etapa e na anterior - montagem dos dados digitalizado em 3D - foi utilizado o *software Rhinoceros*, ajustando-se as superfícies complexas por *nurbs surfaces*. Primeiramente, foi realizado o ajuste dos segmentos de reta que formam os perfis. Para isso, os segmentos de retas foram convertidos em *splines* cúbicas através dos pontos ou aproximações polinomiais. Para criação da malha inicial, nenhum recurso (*loft surface from of curves e surface from 2 edge curves*) do *software* apresentou solução tecnicamente satisfatória para todo o produto, pois as duas soluções deformaram acentuadamente partes da malha. Optou-se, assim, por utilizar a combinação dos dois recursos, conforme apresentado na Fig. 5b. O refinamento da malha final com base em um modelo matemático de correção foi feito empregando-se o modelo matemático *nurbs*, que “reproduz com exatidão” a forma do modelo físico e ainda possibilita a alteração da forma. A Figura 5c mostra a malha depois finalizada e parametrizada.



**Figura 5 – a) Sequência de linhas geradas pela digitalização, b) Processo de conversão de curvas *Spline* em malhas e, c) Processo de refinamento da malha utilizando o modelo matemático *nurbs*.**

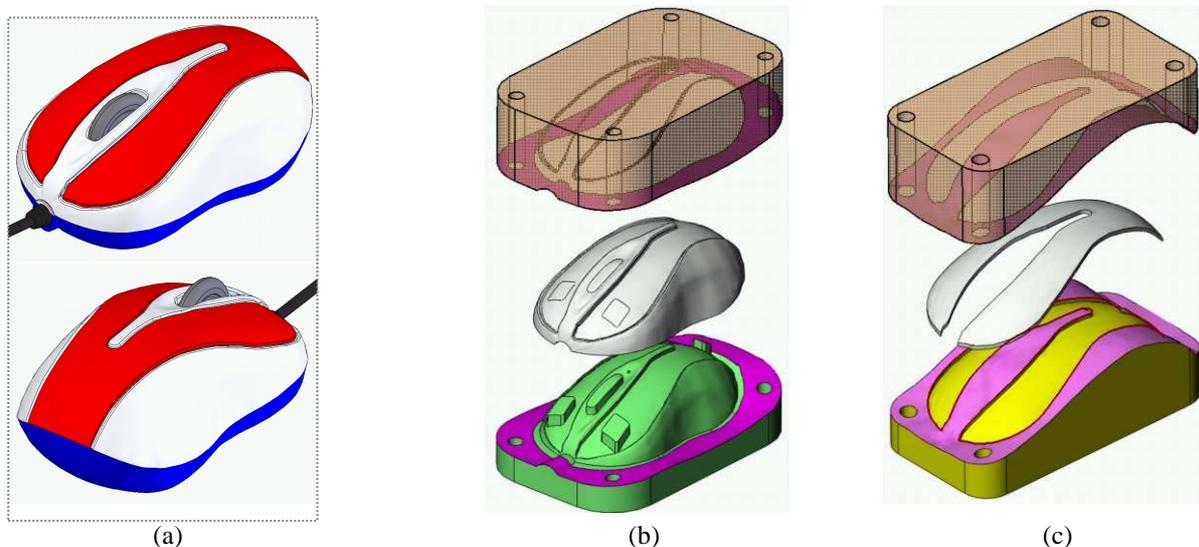
Finalizando a etapa de “modelagem e criação da malha e refinamento de dados digitalizados”, a malha gerada foi integrada computacionalmente no arquivo de modelagem do sólido. O *software* escolhido para essa etapa foi o *SolidWorks*, por apresentar um conjunto de ferramentas satisfatórias para a finalização do projeto, mesmo que com algumas limitações técnicas e também, por trabalhar integrado com *software Rhinoceros* e *EdgeCAM* (*Rhinoceros* integra o *SolidWorks* que, integra o *EdgeCAM*). Assim, o processo de modelagem e análise do conjunto foi dividido em quatro etapas.

- Primeira etapa: modelagem do sólido, conforme apresentado na Fig. 6a. Foi gerado o sólido do corpo do produto a partir da malha anteriormente gerada e com ferramentas computacionais específicas.
- Segunda etapa: ajustes dos perfis, ou seja, utilização das curvas de ajustes (perfis) oriundas do modelamento anterior e que foram utilizadas para ajustes no contorno do produto. O resultado final pode ser visto na Fig. 6b.
- Terceira etapa: análise via CAE da curvatura do produto. Nessa fase foram analisadas as condições técnicas de fabricação pelo processo de moldagem por injeção plástica, ou seja, análise e ajuste das condições de extração do produto no molde. A Figura 6c salienta o resultado final dos testes.



**Figura 6 – a) Modelagem do sólido através da malha, b) Ajustes dos perfis e c) Análise via CAE da curvatura do produto.**

- Quarta etapa: concluindo, na análise e ajuste dos dados parametrizados foi realizado o *redesign* das partes ausentes do conjunto (carcaça inferior e componente do *mouse*) e ajustes de montagem. Essa etapa também foi caracterizada pela parametrização da base em função do projeto do corpo superior. O resultado final do *redesign* do produto pode ser visto na Fig. 7a. Esse procedimento permitiu a otimização do conjunto e a manufatura dos seus respectivos componentes, de forma integrada.



**Figura 7 – a) Resultado final do *redesign*, b) Pré-projeto da base molde central e c) Pré-projeto da base molde superior.**

Concluída a validação do modelo 3D, a prototipagem rápida permite a construção de um modelo em poucos dias ou horas, a partir dos modelos virtuais, com alta fidelidade. Assim, nessa etapa do *redesign* do produto, seriam produzidas as partes que compõem o produto para validação física do projeto, estudo de montagem, interações, dimensional e melhorias. Essa etapa não foi realizada, mas foram testados computacionalmente os arquivos e processos.

Por fim, finalizados os ajustes oriundos dos testes físicos e virtuais (CAD/CAE), foi possível desenvolver o projeto do ferramental utilizado para fabricação das peças, por processo de moldagem por injeção de termoplástico. Então, conforme metodologia proposta, foram desenvolvidas as ferramentas (pré-projeto da base superior e inferior do molde), tendo como base as peças-modelo que compõem o produto. Dessa forma, foi possível conectar todo o projeto em CAD à malha original, ou seja, qualquer alteração realizada no primeiro recurso do projeto em CAD “automaticamente” revisava todos os componentes do projeto até o ferramental gerado. As Figuras 7b e 7c mostram o pré-projeto dos moldes.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cenário poderá ser capaz de produzir protótipos físicos utilizados em testes e reproduzir modelos reais por meio de usinagem ou fundição. Além dessas características, apresentou muita flexibilidade, permitindo que seja facilmente configurado para produção de peças de diferentes geometrias e mais complexidade. Assim também a integração da digitalização 3D com a prototipagem rápida pode acelerar o processo de desenvolvimento e manufatura do produto.

Assim sendo, pode-se, inicialmente, chegar a algumas conclusões a respeito das etapas finalizadas, apesar de não terem sido procedidas as fases de prototipagem rápida e usinagem do molde, propostas na metodologia.

Primeiramente, a engenharia reversa integra-se aos *softwares* CAD comerciais, o que tem demandado desses *softwares* recursos para trabalhar com imagens adquiridas diretamente de uma peça já existente, e não somente recursos para o desenho em si. A adoção de *softwares* específicos, como *rapidform XO redesign*, que possui ferramentas de modelação e criação de superfícies, ou de *softwares* que possibilitam implementação de modelos matemáticos e/ou algoritmos de correção de superfície, como *solidworks*, são avanços promissores.

Ajustar superfícies para uma distribuição aleatória de dados tem sido também assunto de muito interesse. Nas reconstruções 3D, os métodos de tratamento dos pontos, fornecidos pelo sistema de aquisição de dados, têm caráter determinante sobre o resultado final da superfície e o tempo de processamento. Além disso, é possível obter várias superfícies aproximadas ou interpoladas, dependendo do método de construção utilizado e do objetivo almejado.

Quanto ao equipamento utilizado para digitalização, pôde-se constatar que existem variáveis que afetam diretamente a precisão da geometria e o resultado final, como, por exemplo, o tamanho da ponta da sonda, a velocidade dos motores e a distância de teste. A definição da relação de quanto cada parâmetro interfere no processo individualmente ou combinado dependerá da análise de experimentos futuros.

Outro ponto importante que se pode considerar é que a parametrização de todo o projeto, ou seja, todas as três peças que formam o conjunto externo do corpo, está relacionada entre si, tendo como base a malha (casa). Assim, qualquer alteração feita no primeiro recurso do projeto em CAD, que é a malha, revisará “automaticamente” todos os componentes do projeto, até o ferramental e, conseqüentemente, a programação CNC de usinagem. Isso torna o projeto totalmente adaptável ou parametrizado, em função do ajuste de uma ou diversas variáveis (customização padronizada).

Por fim, quanto à aplicabilidade do cenário proposto, pode-se inicialmente concluir que o resultado do trabalho de *redesign* do *mouse* não pode resumir-se à simples reprodução do produto atualmente comercializado, pois, neste caso, a troca de fornecedor pelo consumidor seria exclusivamente motivada pela quotização de preço inferior para o produto. A partir da implementação das melhorias nos processos de desenvolvimento e fabricação do produto, pode-se diferenciá-lo dos modelos nacionais ou concorrentes, desenvolvendo-se um processo inovador e um produto com diferencial de mercado.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES, pela concessão da bolsa de Mestrado para o primeiro autor; e à FAPEMIG (PPM-00393-09) e CNPq pelo suporte financeiro.

## 7. REFERÊNCIAS<sup>1</sup>

- Abella, R.J., Daschbach, J. and Mc Nichols, R.J., 1994, “Reverse engineering industrial applications”, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 26, No. 2, pp. 381-385.
- Curtis, W., 2006, “Rapid Prototyping: trully functional prototype”. *Time-Compression Technologies*. 10 Março 2010, <hppt//www.timecompreess.com>.
- Boulanger, P., 1998, “NRC/VIT reverse engineering project”. 02 Abril 2009, <http://www.vit.iit.nrc.ca/pierre/rep1.html>.
- Ferreira, J.C. and Alves, N.F., 2003, “Integration of reverse engineering and rapid tooling in foundry technology”, *International Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, pp. 374-382.
- Geiger, K. and Huber, R., 1994, “Reverse Engineering, Institute for Computer Applications in Planning and Design”, Karlsruhe: Faculty of Mechanical Engineering: University of Karlsruhe.
- Guerreiro, V., 1999, “Digitalizadores/medidores 3D agilizam projetos”. *CADesign*, Vol. 53, São Paulo, Brasil, pp. 33-35.
- Hilton, P.D. and Jacobs, P.F., 2000, “Rapid tooling: technologies and industrial applications”, Vol. 1, Ed. Marcel Dekker, Inc., New York, NY, 1. ed., pp. 3-13
- Ingle, K.A., 1994, “Reverse engineering”, Lexington: McGraw-Hill, pp. 162-280.
- Lee, K.H. and Woo, H., 1998, “Use of reverse engineering method for rapid product development”. *Computer & Industrial Engineering*, Vol. 35, No. 1-2, pp. 21-24.
- Legge, D.I., 1996, “Integration of design and inspection systems: a literature review”, *International Journal of Production Research*, Vol. 34. No. 5, pp. 1221-1241.

---

<sup>1</sup> Este trabalho foi revisado de acordo com as novas regras ortográficas.

- Lepikson, H. A., 2005, "Sistemas Integrados de Manufatura". In: IFM (coord.), Tecnologias Avançadas de Manufatura. Vol.1, Ed. Novos Talentos, S.Paulo, Brasil, 1.ed., pp. 13-34.
- Marri, H.B., Gunasekaran, A. and Grieve, R.J., 1998, "An investigation into the implementation of computer integrated manufacturing in small and medium enterprises", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 14, pp. 935-942.
- Nogueira, T. B. R. and Lepikson, H. A. L., 2006, "Um método de engenharia reversa para projeto de produto mecatrônico aplicado à pequena e média empresa". XXVI ENEGEP, Fortaleza. (TR490328 6827).
- Osiris Júnior, C., 2007, "Estrutura de informação necessária em ambientes de projeto orientado para a manufatura de peças plásticas injetáveis". Revista Gestão, Vol. 1, São Paulo, Brasil, pp. 13-20.
- Otto, K. and Wood, K., 1998, "A reverse engineering and redesign methodology", Research in Engineering Design, Vol. 10, No. 4, pp. 226-243.
- Otto, K. and Wood, K., 1996, "A reverse engineering and redesign methodology for product evolution". ASME Design Engineering Technical Conferences, Vol. 1, p.15.
- Pereira, E.C.O. and Erdmann, R.H., 1998, "Do planejamento e controle da produção à produção integrada por computador: a evolução do gerenciamento da produção". Vol. 5, Ed. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, No. 10, pp. 147-152.
- Raja, I., Vinesh II, F., and Kiran, J., 2008, "Reverse engineering: an industrial perspective". London: Springer – Verlag. pp. 1-8 (ISBN: 978-1-84628-855-5).
- Romeiro Filho, Eduardo., 2007, "Sistemas Integrados de Manufatura" – Apostila da disciplina: Curso EPD-030., Vol. 1, Universidade Federal de Minas Gerais: LIDEP, Belo Horizonte, Brasil, No. 4, PP. 36-69.
- Silva, C.E.S., Fernandes, C.E, Arthur, R., Diniz, S. and Almeida, B.F., 2005, "O potencial da engenharia reversa como meio de obtenção de tecnologia de produto e processos em pequenas e médias empresas", Trabalho apresentado no XII SIMPEP - Bauru, SP, Brasil. p. 10.
- Volpato, N., 2007, "Prototipagem rápida: conceitos e aplicações". Instituto Nacional de Tecnologia da Informação. Vol.1, Ed. Edgar Blücher, São Paulo, 1. ed., pp. 2-28.
- Yau, H-T, Haques, S. and Menq, C.H., 1993, "Reverse engineering in the design of engine intake and exhaust parts". Manufacturing Science and Engineering, Division: Production Engineering. Vol. 64, pp. 139-148.
- Yoshimura, M., 2007, "System design optimization for product manufacturing", Concurrent Engineering: Research and Applications, Vol. 15, No. 4, pp. 329-343.
- Zhang, Yu, 2003, "Research into the engineering application of reverse engineering technology", International Journal of Materials Processing Technology, Vol. 139, pp. 472-475.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

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

### **MANUFACTURING SCENARIO: Reverse Engineer and Product Redesign**

**Wanderson de Oliveira Leite, wandersonol@uai.com.br<sup>1</sup>**  
**Eduardo Romeiro Filho, romeiro@ufmg.br<sup>1</sup>**  
**Paulo Eustáquio de Faria, paulofaria@ufmg.br<sup>1</sup>**  
**Juan Carlos Campos Rubio, juan@ufmg.br<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Av. Antonio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG - Brasil. CEP. 31.270-901

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Mecânica, Av. Antonio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG - Brasil. CEP. 31.270-901

**Abstract:** *the goal of this paper is the proposal of a scenario inside of an academic environment for the development of parameterized or customized products having as starting point the use of the reverse engineering. So, the identification and measurement of parameters of reference products had demanded technical actions different in nature with respect to those normally adopted in the traditional development of product in integrated manufacture. At the same time, it gets a glimpse an environment of engineering integrated by computer, the combination technologies such a Three-dimensional Scanners, CAD Systems Modelers Surfaces and Rapid Prototyping, among others; is part of the proposed scenario. Finally, the practical study developed, in other words, the redesign of the product and the adaptation of its manufacture had not been summarized to the simple reproduction of the product currently commercialized, since, from the tools used in the scenario it was possible to develop a product customized and a flexible process for the development of new products.*

**Keywords:** *Reverse Engineer, Product Redesign, Computer Integrated Manufacturing, Parametric Modeling, Three-dimensional Digitizer.*