



Pós-Graduação Lato Sensu
Engenharia Industrial 4.0
Manufatura Inteligente – Prof. Dalberto Dias da Costa



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SETOR DE TECNOLOGIA – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU
ENGENHARIA INDUSTRIAL 4.0

DISCIPLINA: MANUFATURA INTELIGENTE

Prof. Dalberto Dias da Costa

Março de 2022



APRESENTAÇÃO

O termo “**Indústria 4.0**” é frequentemente associado à ideia de “revolução” e, mais precisamente, à quarta revolução industrial. Boa parte da literatura corrente que versa sobre esse assunto faz menção à **máquina a vapor** como sendo a síntese da 1ª revolução industrial, a qual teve início ao final do século XVII. A segunda revolução teve como marco a invenção das máquinas movidas por energia elétrica. A terceira revolução, em essência, significa **computação digital**.

O que se pode assimilar nessa ideia de marcadores das revoluções é que todos os três estão associados ao surgimento de novas tecnologias que provocaram rupturas do modus operandi do setor industrial.

As duas primeiras tecnologias revolucionaram, de fato, o **fluxo de materiais** dentro do chamado “chão de fábrica”, isto é, na forma como os materiais são movimentados e transformados. A terceira, por sua vez, modificou substancialmente o **fluxo de informação** dentro do chão de fábrica.

Entretanto, quando se procura a **tecnologia identidade** para a “4ª revolução” isto não parece tão obvio, pelo menos no presente momento. De certa forma, parece ser consenso entre alguns pesquisadores, que o que estamos presenciando atualmente ainda é consequência da computação digital, a qual é a base para o surgimento de uma “cesta” de novas tecnologias, as quais, assustadoramente, vêm modificando, muito mais que o chão de fábrica, mas todo o “**ciclo de vida**” dos produtos.

De forma simplificada, pode-se dizer que estamos, no presente momento, testemunhado uma intensa transformação do modus operandi dos sistemas produtivos, porém ainda não se pode creditar a uma simples tecnologia o protagonismo dessa revolução.

A manufatura inteligente é considerada como sendo um dos pilares da indústria 4.0. Entretanto, o conceito de **manufatura inteligente** ainda carece de definição. Ou seja, o que é e o que podemos esperar da manufatura inteligente? Já é realidade ou ainda é algo futurista?

O material aqui apresentado tem por propósito discutir os questionamentos postulados anteriormente, os quais podem ser resumidos no seguinte: a manufatura inteligente já ocorre na indústria atual, ou ainda está sendo preparada? Para isso, dividiu-se essa apostila em duas partes. Na primeira procura-se explicar os fluxos de materiais e de informação que ocorrem em um chão de fábrica, tendo como pano de fundo o conceito de ciclo de vida de um produto e a evolução dos sistemas de manufatura ao longo das três primeiras revoluções.

Na segunda parte, os conceitos de integração e automação são apresentados e discutidos a partir de um estudo de caso construído em um ambiente fictício. Nesse cenário, o fluxo de



Pós-Graduação Lato Sensu Engenharia Industrial 4.0

Manufatura Inteligente – Prof. Dalberto Dias da Costa



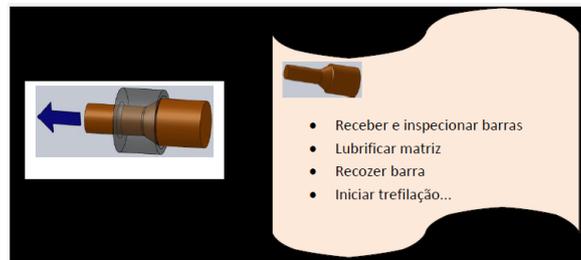
informação entre as fases de projeto e processo é analisado e as lacunas referentes à automação/integração são indicadas e estudadas.

No transcorrer desta apostila, a máquina-ferramenta será o tópico central. O seu estado da arte, a sua relação com os fluxos de materiais e de informação e a sua dependência em relação ao ser humano para as tarefas de planejamento, diagnóstico e otimização serão analisadas.

Ao final, será proposto e discutido que o caminho para a manufatura inteligente deve ser construído a partir da simplificação e automação do fluxo de materiais e da integração de dados baseada em um modelo neutro que contemple todas as fases do ciclo de vida de um produto.

Uma boa leitura e que, ao final, novas questões possam surgir.

PARTE I



□ fluxo de materiais e de informação no chão de fábrica

Nesta primeira parte, o foco principal será o estudo dos fluxos de materiais e de informação em sistemas de manufatura.

No escopo considerado nesta apostila, um sistema de manufatura (SM) pode ser entendido como sendo uma atividade econômica realizada por uma ou mais empresas; a qual tem como base a aplicação do trabalho humano que somado a recursos energéticos, máquinas e ferramentas possibilita a transformação de materiais brutos em produtos acabados.

1.1 – O FLUXO DE MATERIAIS

Ao se analisar as diferentes etapas, a partir das quais um produto é transformado, observa-se que no caso de produtos para fins mecânicos, parte da manufatura acontece como se fosse um fluxo contínuo de materiais. Isto significa que em determinado instante do processo não se pode separar e/ou identificar esses produtos em unidades.

A título de ilustração, a Figura 1 contém, de forma esquemática, o fluxo de materiais necessário à produção do aço, o qual finaliza na forma de produtos semiacabados. Apesar de serem separados em unidades, as barras e/ou chapas assim produzidas geralmente passarão por outros processos antes de alcançarem o consumidor final. Dessa forma, pode-se considerar a produção do aço como uma manufatura contínua.

Por outro lado, a produção de parafusos, esquematicamente representada na Figura 2, é um bom exemplo da manufatura discreta. Na maioria dos casos, parafusos simples são fabricados a partir de barras trefiladas, também denominadas de fio-máquina, tal como ilustrado (Fig. 2 A). Esse fio é alimentado em uma primeira máquina que executa o corte em pequenas barras e a conformação do corpo e da cabeça em 4 estágios, tal como ilustrado na imagem inferior (Fig. 2 B). Esses 5 estágios são executados em apenas uma máquina (ilustração superior da Fig. 2 B). Geralmente¹, uma segunda máquina é empregada na laminação da rosca (Fig. 2 C). Após a laminação das roscas, e dependendo do material, os parafusos ainda são submetidos a um processo de tratamento térmico e proteção superficial.

Ao analisarmos os dois fluxos de materiais (figuras 1 e 2) podemos concluir o seguinte:

- i) A manufatura contínua produz peças semiacabadas, as quais, apesar de serem quantificáveis em unidades, perdem essa característica com a aplicação subsequente de outros processos;
- ii) A manufatura contínua produz peças com geometrias simples;
- iii) Em decorrência da grande quantidade de material produzido na manufatura contínua, inevitavelmente se formarão estoques;
- iv) A manufatura discreta possibilita a produção de peças com geometria complexa e variável;
- v) A manufatura discreta possibilita a rastreabilidade de peças; e
- vi) A formação de estoque pode ser mínima com a manufatura discreta².

¹ Existem aplicações onde o forjamento (corpo e cabeça) e a laminação da rosca são executados em apenas uma máquina.

² Vide o conceito de produção em **Just in time**.

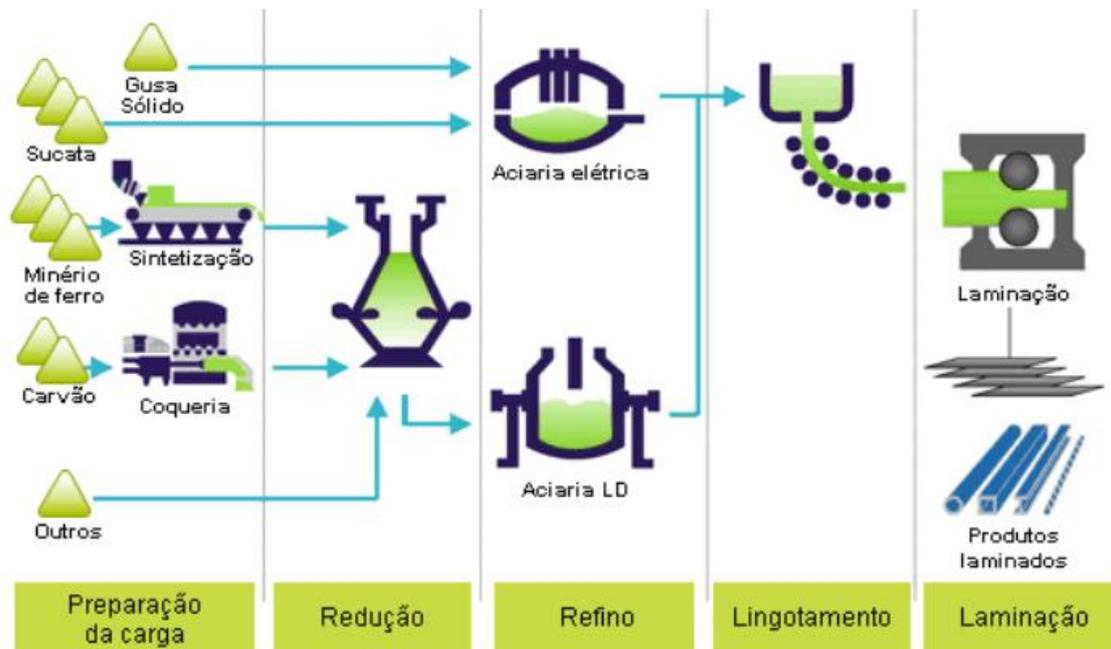


Figura 1 – Manufatura contínua – fluxo de materiais na produção do aço– versão simplificada.

Fonte: Instituto Aço Brasil, disponível em:

<http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>



Figura 2 – Manufatura discreta – fabricação de parafusos

A produção de parafusos, adotada para exemplificar o fluxo discreto de materiais, pode ser estendida a outros materiais e componentes para fins mecânicos. Em síntese, podemos dizer que existe um instante no qual o fluxo de materiais deixa de ser contínuo e passa a ser discreto. Essa interrupção é relevante do ponto de vista da organização das empresas, formação de estoques e competências.

O primeiro impacto dessa interrupção está no surgimento de uma atividade econômica que é a distribuição de materiais. Empresas do ramo de distribuição atuam como “pulmões” e facilitam a fragmentação dos grandes volumes produzidos no modo contínuo em volumes menores, mais adequados à manufatura discreta em pequenos lotes.

Na manufatura discreta, boa parte do fluxo de materiais é determinado pela cinemática do processo, a qual modifica a forma do material em um dado instante do fluxo. Com uma abrangência razoável, podemos pensar em uma classificação do processo baseada na complexidade dessa cinemática.

No escopo dos processos, a cinemática é entendida como sendo o controle dos movimentos (direção, velocidades e posicionamentos). Por exemplo, nos processos baseados em formação, os movimentos realizados entre a ferramenta (molde) e o material são relativamente simples, geralmente unidirecionais, com velocidade constante e controle de posição definido pelo volume do molde, isto é, o processo cessa quando o volume do molde é preenchido.

Nos processos baseados em geração, como por exemplo a usinagem ou corte, o material é removido pela combinação de movimentos em várias direções, seguindo curvas complexas, o que requer a variação de velocidade e um controle muito fino de posição.

A Figura 3 contém, na forma de uma ilustração, a classificação de alguns processos quanto à complexidade cinemática. Processos baseados estritamente em moldagem, tais como a fundição, a injeção, a extrusão, o sopro e o processamento de pós dependem apenas de um movimento unidimensional do material para dentro do molde, sendo que o produto resultante será uma cópia da cavidade do molde.

No caso do processo de brasagem, a sua complexidade cinemática pode variar dependendo do seu nível de automação. Ela pode ser bem simples, quando o aquecimento é realizado em fornos – peça e liga mantidos estáticos, ou conter trajetórias mais sofisticadas se o aquecimento for feito por indução.

Os processos de conformação, na sua quase totalidade, são baseados em moldagem, o que implica em cinemática similar à fundição. A exceção aqui é a conformação incremental³ que

³ Esse processo de conformação é realizado em máquinas-ferramenta equipadas com comando numérico, ao invés das tradicionais prensas. A trajetória de um punção de ponta esférica é controlada por meio do CNC, de tal maneira que o punção deforma, progressivamente, o material bruto (chapa) transformando-o em uma peça acabada. Peças com grande complexidade geométrica podem ser processadas por esta técnica. Para maiores detalhes vide os trabalhos de Valle, P.D. (2016 e 2018).

pode ser realizada em máquinas equipadas com Comando Numérico (CN), tornando-a um processo típico de geração.

A soldagem pode ser realizada com movimentos unidimensionais (principalmente se realizada manualmente) ou com trajetórias multidimensionais, quando realizada por robôs.

A usinagem fotoquímica é um processo de remoção por controle da corrosão. Esse controle pode ser feito por meio de fotolitos, o que a torna um processo de formação. Quando o controle da corrosão é feito pela polimerização da resina por meio de um feixe laser, uma cinemática bidirecional é observada e a fabricação se dá por geração indireta⁴.

Os processos de corte por chama, plasma, jato d'água e laser possuem cinemática bidimensional e se assemelham à usinagem fotoquímica com polimerização a laser.

Os processos de manufatura aditiva são essencialmente bidimensionais. Entretanto, contrariamente aos processos de corte mencionados acima, eles são utilizados para a produção de peças tridimensionais, o que demanda um controle das camadas da peça a ser produzida.

Os processos de usinagem são, em sua maioria⁵, processos de remoção por geração, demandando uma cinemática extremamente complexa em alguns casos.

Atualmente, o maior grau de complexidade cinemática pode ser visto em processos denominados por manufatura híbrida. Nesse caso, existe uma combinação de fabricação por adição (geralmente deposição por laser) e usinagem.

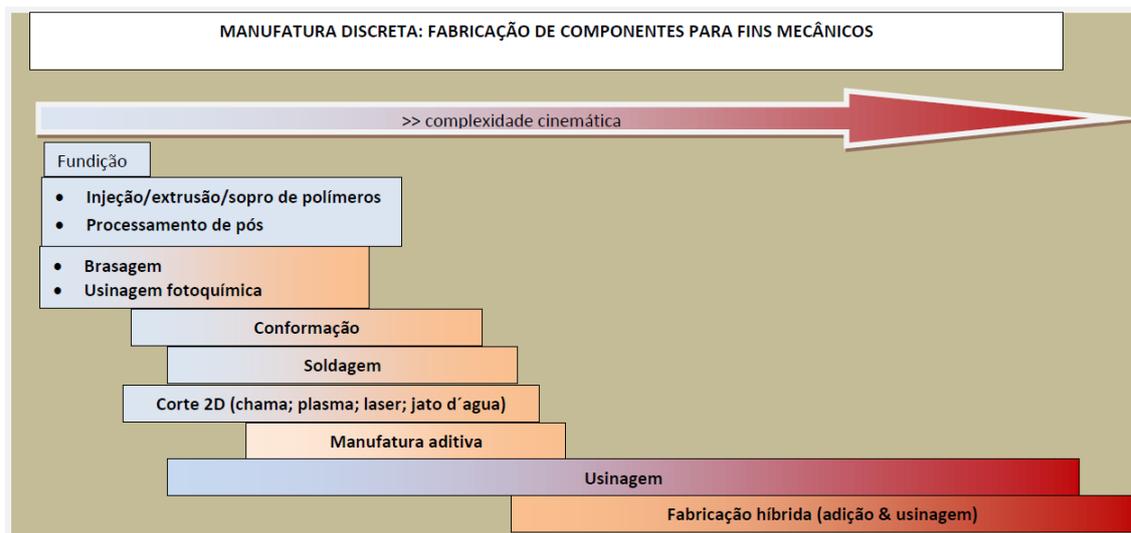


Figura 3. - Classificação de alguns processos de fabricação em função da complexidade cinemática.

⁴ Essa geração é indireta, pois é utilizada apenas para a polimerização da resina, sendo que a corrosão ocorrerá e um estágio posterior.

⁵ Existem alguns processos que são, tipicamente, de formação e exigem cinemática unidimensional. Como exemplo podemos citar os processos de brochamento e aplainamento.

Além da cinemática, o fluxo de materiais também é influenciado pelo tipo de energia empregado na transformação. De modo análogo ao que foi apresentado para a discussão sobre cinemática, a Figura 4 contém a classificação de alguns processos tendo como base o tipo de energia. Quando a energia for mecânica, resultam sobre a peça em processo elevadas tensões. Em alguns casos, essas tensões superam o limite de ruptura do material. Por outro lado, quando a energia utilizada for térmica, resultarão sobre a peça, elevadas temperaturas, sendo que em alguns casos poderá ocorrer a superação do seu ponto de fusão.

Em alguns processos, como por exemplo a usinagem, a energia utilizada é, basicamente⁶, mecânica, a qual produz tensões muito elevadas sobre a peça culminando com a formação de cavaco por cisalhamento. Por outro lado, nos processos de fundição por gravidade, soldagem por arco elétrico e corte (chama, plasma e laser) a energia fornecida está na forma de calor. Nestes processos, a temperatura alcançada pela peça supera o seu ponto de fusão.

No processamento de polímeros (termoplásticos) ocorre uma combinação de energia mecânica e térmica. O calor fornecido deve ser suficiente para fundir o material. Por meio de uma ação mecânica, esse material fundido é injetado dentro da cavidade do molde.

Em outros processos, também ocorre uma combinação de calor e tensões mecânicas, porém nem as temperaturas excederão o ponto de fusão e nem as tensões excederão o limite de ruptura do material. Nessa condição encontram-se os processos de conformação e metalurgia do pó.

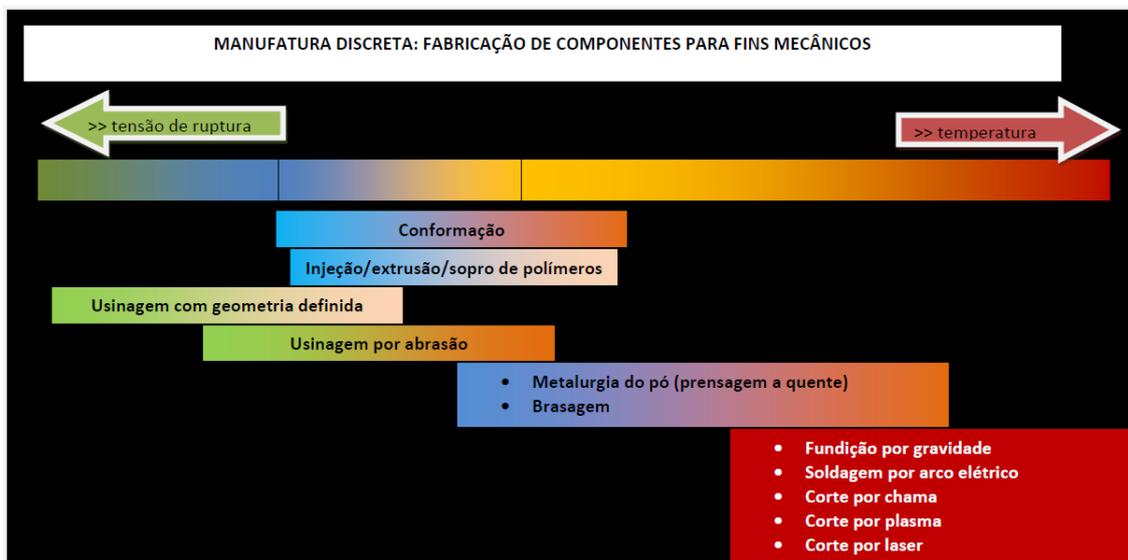


Figura 4. – Classificação de alguns processos de fabricação em função do tipo de energia empregado na transformação.

⁶ Existem alguns casos particulares, por exemplo no torneamento de peças grandes em ferro fundido, aonde se recomenda a aplicação de uma fonte de calor para evitar o resfriamento muito brusco da superfície usinada.

Em resumo: um observador externo ao sistema de manufatura consegue enxergar e, eventualmente, mensurar, o fluxo de materiais. Ou seja, ele consegue ver os movimentos e as transformações sofridas pelo material bruto até se tornar um produto acabado. Entretanto, existe um outro fluxo, invisível a esse observador, que determina o **que, como, quando e quanto** deve ser produzido. Esse fluxo é denominado **fluxo de informação** e será discutido na próxima seção.

1.2 – O FLUXO DE INFORMAÇÃO

O fluxo de informação é imprescindível ao fluxo de materiais. Sem exagero, pode-se afirmar que, em se tratando de processos de manufatura, o fluxo de materiais não acontece sem a informação. A sua complexidade está diretamente ligada à complexidade do produto, a qual pode ser melhor compreendida ao se analisar o seu ciclo de vida, tal como representado esquematicamente na Figura 5.

O ciclo de vida ilustrado pela Figura 5 foi adaptado a produtos mecânicos. Não obstante, esse conceito pode ser estendido a produtos para outras finalidades.

O ciclo de vida aqui apresentado compreende as seguintes etapas: **necessidade; concepção; projeto; manufatura; distribuição; montagem; uso; descarte e reciclagem.**

A etapa de concepção acontece após a explicitação de uma determinada comunidade por melhorias em produtos já existentes. Pode acontecer também por um ato criativo do sistema produtivo, ou de um indivíduo, a partir da identificação consciente, ou não, de uma necessidade ainda não manifestada pela comunidade.

Na etapa de concepção define-se claramente a função do produto. Dessa forma, seu primeiro modelo é representado (esboçado) a partir de sua funcionalidade.

O ato de projetar é entendido aqui como sendo a descrição estrutural do produto a partir da análise de seu comportamento quando em funcionamento. Essa descrição estrutural pode ser feita por meio de uma lista de itens, caso o produto seja composto por vários componentes, e os respectivos desenhos desses componentes. Isto também pode ser feito pela elaboração de um protótipo, do tipo maquete, em escala e material diferentes.

A manufatura é dividida em duas fases: o planejamento e a execução. O planejamento compreende a descrição de como fazer (plano de processos/inspeção) e quando/quanto fazer (plano de produção). A execução é, em essência, a movimentação e transformação de materiais de forma repetitiva o que, em síntese, é denominado de produção.

A montagem é uma atividade de manufatura, mas foi considerada aqui de forma separada, pois, em caso de produtos complexos, pode ser realizada em um momento e lugar diferentes das demais fases do ciclo.

O planejamento das diversas atividades de manufatura, incluindo aqui a montagem, deve acontecer em concomitância com o projeto. Entretanto, as atividades de execução só podem acontecer após uma modelagem inequívoca do produto e dos planos para sua manufatura.

A distribuição é o ato de comercializar e entregar o produto para os consumidores. No caso de produtos de elevado consumo, isso pode ser feito por empresas diferentes daquela responsável pelas outras etapas do ciclo. Em diversas situações, nesta etapa acrescenta-se ainda aos produtos uma embalagem, a qual pode ser entendida com um outro produto, mas que não necessariamente implicará em uso.

O uso compreende a atividade de consumo do produto até sua transformação ou descarte, no caso dos bens de consumo; ou na sua depreciação e/ou obsolescência em se tratando de bens de capital.

O descarte pode ser de todo o produto ou de uma de suas partes, no caso de substituição de componentes avariados ou desgastados.

A reciclagem e/ou reutilização compreende o aproveitamento do produto, ou de seus componentes, para outros fins, ou a transformação em matéria prima para a fabricação de novos componentes.

Na parte central da Figura 5 pode-se ver uma seta indicando que o ciclo acontece no sentido anti-horário (da necessidade para a reciclagem⁷). Todavia, quando se associa o fluxo de informação ao ciclo de vida, os seguintes aspectos devem ser observados:

- i) O fluxo de informação pode ocorrer em várias direções (entre fases) e em diferentes sentidos;
- ii) A informação oriunda dos planejamentos, por exemplo, não necessariamente precisa ser gerada sequencialmente. Isto é, ela deve, na medida do possível, ocorrer de forma simultânea; e
- iii) Fazendo uma analogia com o curso de um rio, pode-se dizer que uma certa etapa do ciclo está jusante ou a montante em relação a outra.

Por conseguinte, a seta no centro da Figura 5 nos dá uma boa ideia do fluxo de materiais, porém não é suficiente para representar o fluxo de informação. Um modelo do fluxo de informação não é tão linear assim. Ele pode ocorrer simultaneamente em diferentes etapas, ele pode voltar em sentido oposto ao sentido do ciclo. E, mais importante, ele pode gerar mudanças no produto a qualquer instante do seu ciclo de vida.

O que se busca atualmente é um modelo de dados sobre o ciclo de vida que possa suportar essa dinâmica do fluxo de informação. Para tratarmos desse modelo iremos considerar, a seguir, três momentos históricos ligados ao desenvolvimento industrial. O primeiro momento

⁷ Na literatura em língua inglesa é comum encontrar a expressão "*Cradle-to-grave*", significando que o ciclo de vida compreende uma análise do produto desde o berço (**cradle**) até o seu fim de vida (**grave**). Mais informação sobre esse conceito/terminologia pode ser encontrada em: <https://www.epa.gov/>

precede à primeira revolução industrial e todo o sistema produtivo ainda tem como base o trabalho artesanal. O segundo momento tem como marco a produção movida por energia elétrica e o fluxo de materiais organizados a partir dos princípios do Taylorismo. Por fim, estaremos falando dos dias atuais, entrando nessa quarta revolução industrial, e tendo como cenário a enorme capacidade de gerar, transmitir, processar e armazenar dados.

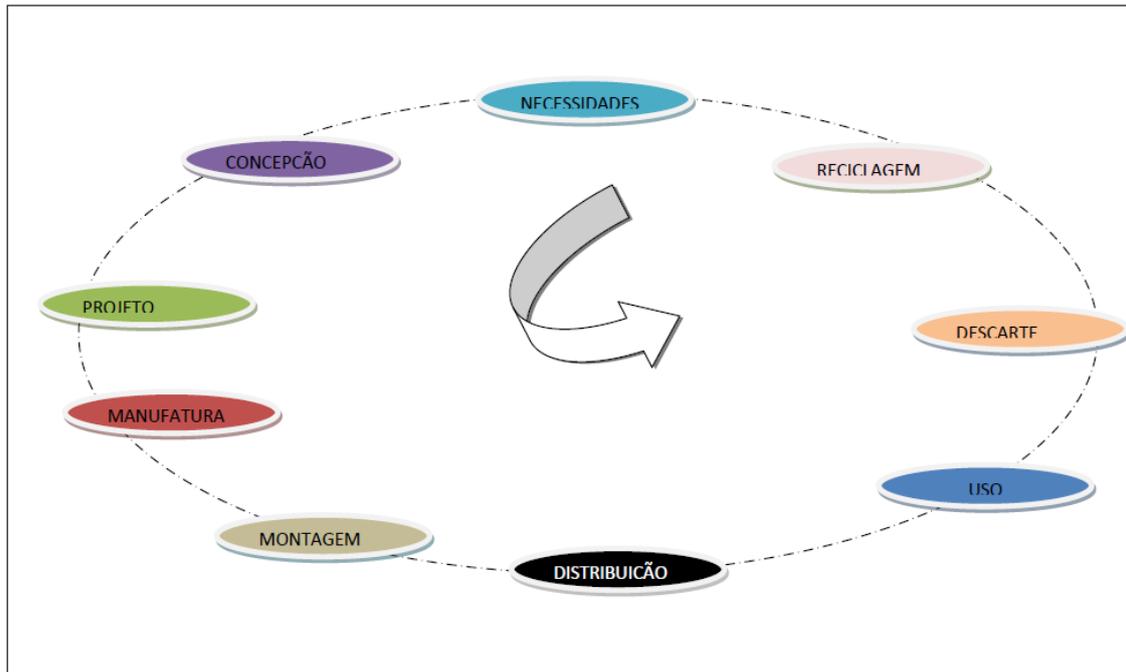


Figura 5 – ciclo de vida de um componente mecânico

1.2.1 –No tempo do artesão

A distinção entre o artesanato e o trabalho realizado dentro de uma fábrica não se resume a comparar o trabalho manual com aquele realizado por meio de máquinas. A partir da ótica do fluxo de informação, o que melhor caracteriza o trabalho do artesão é o domínio que ele tem sobre o “saber fazer” em todas as fases do ciclo de vida de um produto.

Na maioria dos casos, o artesão entrega um produto acabado ao seu cliente. Ele, e somente ele, é responsável por selecionar e contratar os seus fornecedores. No seu relacionamento com esses dois extremos — fornecedores e clientes — a informação é transferida de forma verbal, raramente existe um contrato escrito.

Se algo dá errado durante a manufatura, o bom artesão faz os ajustes/retrabalhos necessários, mas não entrega um produto que possa vir a comprometer o seu nome. Essa capacidade de “reagir” aos imprevistos advém, principalmente, do fato de que todo o conhecimento necessário execução do ciclo de vida de seus produtos reside, e é dominado, por uma ou poucas pessoas.

Dessa forma, o fluxo de informação é algo invisível ao um observador externo. Ele está apenas na mente do artesão. Não é exagero dizer que, na cabeça do artesão, o ciclo de vida do produto está completamente integrado e não fragmentado em etapas, tal como ilustrado pela Figura 5.

1.2.2. A administração científica

O conceito de administração científica⁸ apareceu ao final com século XIX com as publicações feitas por F. W. Taylor e seus colaboradores. Em seu livro “The Principles of Scientific Management” Taylor defende a divisão do trabalho, basicamente separando o planejamento da execução, como sendo a condição necessária para o aumento de eficiência da trabalho e do trabalhador.

O trecho apresentado por meio da Figura 6 foi retirado da publicação “The Principles of Scientific Management – pg. 30” e ajuda a entender melhor a ideia da divisão de trabalho como uma das componentes da administração científica proposta ao final século XIX e início do século XX.

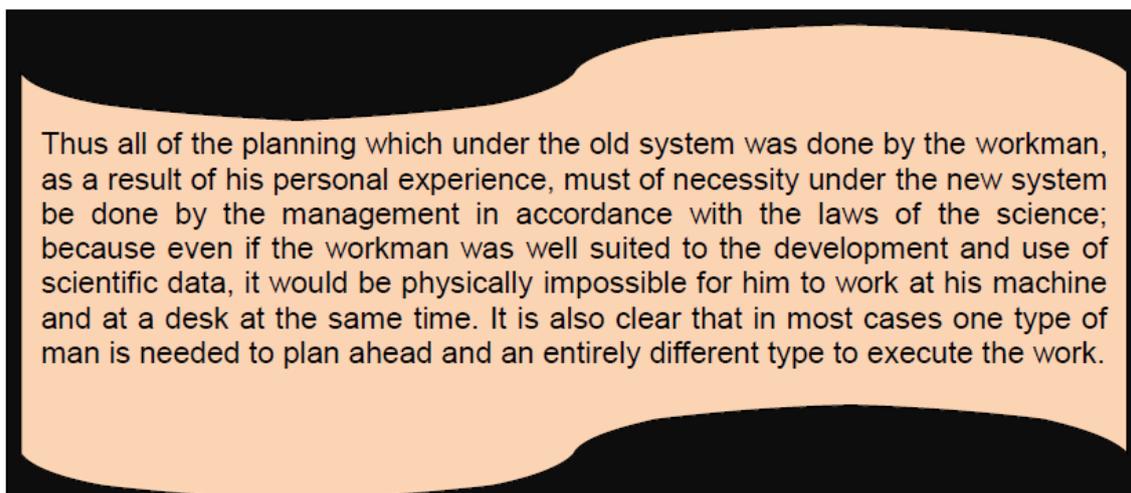


Figura 6. – Excerto retirado da página 30 do livro “The Principles of Scientific Management”

Existem dois adventos que, somados à invenção das máquinas e à necessidade de aumento de eficiência, contribuíram, de forma significativa para o redesenho dos fluxos de materiais e informação e conduziram à administração científica, tal como proposta por Taylor. O primeiro foi a adoção do desenho mecânico como linguagem para representação de conhecimento e,

⁸ O termo “Scientific Management” não foi cunhado por F. W. Taylor, mas segundo alguns autores pelo jurista Louis Brandeis.



por conseguinte, como meio para transferência de informação. O segundo foi o estabelecimento da intercambiabilidade como métrica para avaliação da qualidade dos componentes manufaturados.

O desenho baseado em vistas ortográficas, tal como conhecemos hoje, foi idealizado por Gaspard Monge e tornado público por volta de 1795. A grande vantagem dessa técnica advém da possibilidade de se representar objetos tridimensionais de forma não ambígua em uma folha de papel. Muito além da técnica de projeção geométrica o trabalho de G. Monge propiciou o surgimento de uma linguagem de engenharia, a qual é baseada em representações bidimensionais e símbolos. Por meio de um desenho, e umas poucas palavras, é possível transferir informação sobre o que, como e quando/quanto deve ser manufaturado.

Intercambiabilidade é o termo frequentemente utilizado como sendo o motivador de um sistema de produção que ficou conhecido como sistema americano de manufatura (American System of Manufacturing). De acordo com Gordon (1988) a ideia de se utilizar peças intercambiáveis surgiu na área militar em decorrência da necessidade de se efetuarem os reparos dos armamentos no próprio campo de batalha.

Intercambiabilidade implica em alta repetibilidade dos processos de fabricação. Para se alcançar isso, algumas empresas americanas, inicialmente aquelas fornecedoras de armamentos, passaram a desenvolver e fazer uso intensivo de instrumentos de medição, gabaritos, moldes e matrizes, os quais propiciaram o controle de posição com elevada repetibilidade.

Inicialmente, o uso destes dispositivos provocou uma mudança significativa no fluxo de materiais, pois o posicionamento correto das peças a serem produzidas exige um sequenciamento baseado na lógica do processo.

Apesar de o desenho mecânico e o fluxo de materiais, já determinado pelos dispositivos de localização/fixação, serem condições suficientes para a manufatura de um dado componente, Taylor e seus colaboradores observaram, ao final do século XIX, que a eficiência da produção era baixa e podia ser aumentada.

Essa eficiência tem como ponto de partida um pequeno trecho do livro “*The Principles of Scientific Management*” e reproduzido como imagem na Figura 6. A síntese desse texto é a seguinte: o planejamento deve ser separado da execução. Além disso, a administração científica, tal como concebida por Taylor se baseia no estudo dos movimentos e, por conseguinte, nos tempos necessários à execução de uma dada tarefa. Dessa forma, a determinação clara dos movimentos e seus tempos de referência, juntamente com a especificação dos meios (máquinas, ferramentas, dispositivos de fixação) constitui o que, atualmente, denominamos de folha de processos.

A folha de processos contém o **que**, o **como** e a **duração** do que deve ser feito . O seu impacto sobre o fluxo de informação e de materiais foi enorme, pois possibilitou o detalhamento dos processos produtivos, aumentando a sua repetibilidade e eficiência.



Indubitavelmente, a administração científica, tal como concebida por Taylor e seus colaboradores, aumentou a eficiência do “Sistema Americano de Manufatura” e pavimentou o caminho para o surgimento das linhas de montagem⁹ e da automação, tal como as conhecemos hoje.

Entretanto, a divisão do trabalho teve como efeito colateral a departamentalização das atividades correlatas às etapas do ciclo de vida do produto. O organograma de algumas empresa ainda reflete bem isso. Nestas, podemos enxergar o “Departamento de Projetos”; o “Departamento de Compras”; o “Departamento de Processos”, etc.

Quando comparamos o fluxo de informação dentro de uma estrutura organizacional departamentalizada com aquele, supostamente, presente na mente do artesão, constata-se o seguinte:

- i) Fragmentação do fluxo de informação;
- ii) Maior lentidão na tomada de decisão;
- iii) Dificuldade em promover melhorias e inovações; e
- iv) Maior tempo de resposta às perturbações externas.

1.2.3. A revolução digital

Alguns autores consideram a invenção e produção do transistor com sendo o marco da revolução digital, o que ocorreu por volta de 1950.

De certo modo, a indústria metalmeccânica já se beneficiava dos avanços da eletricidade/eletrônica, bem antes do advento do transistor. A utilização de motores elétricos individuais para o acionamento de máquinas-ferramenta teve início em 1900. Um pouco depois, as linhas de montagem e linhas transfer eram equipadas com relês eletromecânicos que atuavam como chaves de fim de curso para controle de posição.

Esse casamento mecânica/elétrica propiciou uma melhoria significativa no controle do fluxo de materiais. Por outro lado, o fluxo de informação permaneceu praticamente inalterado.

Entretanto, ao final de década de 1940 e início de 1950 a indústria metalmeccânica em geral e, mais especificamente, os fabricantes de máquinas-ferramenta testemunharam o surgimento de uma nova tecnologia, também oriunda do casamento mecânica/eletrônica, denominada comando numérico.

Essa tecnologia foi financiada pela Força Aérea dos Estados Unidos e desenvolvida no Instituto de Tecnologia de Massachusetts a partir de uma ideia concebida por John T. Parsons.

⁹ Existe certa controvérsia na literatura corrente acerca da real influência do Taylorismo sobre a linha de montagem criada por Ford no início do século XX. Para maiores informações vide: Paxton (2012).



Segundo Younkin (2008) o projeto original, tal como proposto por J. Parsons, era baseado em um leitor de cartões perfurados como meio de entrada de dados. Entretanto, isso se mostrou inadequado (muito lento) para atender às velocidades demandadas. Posteriormente, a fita perfurada foi adotada como meio de entrada. O primeiro controlador foi baseado em 292 válvulas eletrônicas (tubos de vácuo do tipo thyratrons).

Com o surgimento dos semicondutores (transistor) e, posteriormente dos microprocessadores, houve uma melhora significativa da tecnologia de comando numérico fazendo com que as máquinas, cuja entrada de dados era a fita perfurada, passassem a operar baseadas em microcomputadores, inaugurando-se assim a era do Comando Numérico Computadorizado.

O desenvolvimento da tecnologia CNC possibilitou uma revolução do controle do fluxo de materiais, em especial naqueles processos de fabricação com maior complexidade cinemática, tal como comentado na Seção 1.1.

Em essência, Comando Numérico (CN) significa controle de movimentos (trajetórias, velocidades e posições) a partir de uma entrada simbólica de dados (programa). Por conseguinte, além de substituir por completo o controle de posição baseado em sistemas mecânicos (gabaritos/moldes) e eletromecânicos (relês), a tecnologia CN incorporou um novo atributo ao fluxo de materiais: a **flexibilidade**.

Do ponto de vista do fluxo de materiais, a flexibilidade é sinônimo de “graus de liberdade”, ou seja, é a facilidade de se modificar um processo em resposta às alterações do produto. Nesse sentido, a usinagem baseada em comando numérico passou a ser o processo de fabricação mecânica mais flexível, pois além de poder ser empregada na fabricação de uma gama muito vasta de materiais, mudanças nas ferramentas e em suas trajetórias podem ser realizadas apenas pela substituição de poucos caracteres do programa CN.

Como já mencionado no início desta Seção, a revolução proporcionada pela invenção dos semicondutores (transistor) não trouxe ganhos diretos e imediatos para a indústria metalmeccânica, mas essa se beneficiou, de forma indireta, dos avanços da indústria eletrônica.

Dentre esses avanços, o mais significativo para a indústria metalmeccânica foi, sem dúvida, o microcomputador.

A evolução dos computadores, associada ao surgimento de uma nova disciplina conhecida como geometria computacional, propiciou o surgimento de novos sistemas de informação voltados à representação e manipulação de entidades geométricas, culminando com os softwares atualmente denominados por CAx, os quais facilitam o design (CAD), a simulação da manufatura (CAM) e a análise (CAE).

Pode-se dizer que a eletrônica embarcada nas máquinas, associada aos sistemas CAM/CAE, possibilita o controle e a simulação do fluxo de materiais em uma escala microscópica permitindo se assim o registro digital de todas as modificações que o material bruto sofre até se transformar em produto pronto para o uso.

No tocante ao fluxo de informação, o par eletrônico/CAx, tem propiciado o seguinte:

- i) Eliminação do papel enquanto meio de transferência de dados;
- ii) Edição e modificação extremamente rápidas;
- iii) Armazenagem com baixo custo de grande volume de dados;
- iv) Visualização e cotação em três dimensões; e
- v) Interfaceamento de máquinas.

Um breve resumo desses três momentos pelos quais as atividades industriais de manufatura passaram e estão passando, nos diz o seguinte:

Antes da revolução industrial, o fluxo de materiais era difícil, exigia muita força humana (ou animal) e era muito lento. Por outro lado, o fluxo de informação era invisível (estava na mente do artesão) e indivisível, pois era extremamente integrado.

A revolução industrial trouxe os conversores de energia, as máquinas, os gabaritos, os copiadores hidráulicos, os moldes e provocou um aumento extraordinário da produção de bens de consumo. Os métodos da administração científica propostos por Taylor e seus colaboradores implicaram na divisão e simplificação do trabalho e modificaram, significativamente, o fluxo de informação dentro dos sistemas produtivos.

A invenção dos motores elétricos, e dos relés eletromecânicos, possibilitou uma melhoria significativa do controle do fluxo de materiais, dando origem ao surgimento das linhas de montagem e das linhas transfer¹⁰. A invenção da válvula eletrônica possibilitou o surgimento dos sistemas de controle mais sofisticados tais como o comando numérico. A partir desse momento, o fluxo de materiais ganha flexibilidade.

Em um estágio seguinte, os microprocessadores impulsionam as melhorias da tecnologia CN e o advento dos sistemas gráficos, inaugurando-se assim a era do controle digital, tanto do fluxo de materiais como o de informação.

Ainda nessa retrospectiva, podemos destacar quatro fatos:

- i) A capacidade produtiva, leia-se também produtividade, aumentou muito deste o artesão até os dias atuais;
- ii) Para se alcançar essa produtividade elevada foi necessário fragmentar o fluxo de informação, o qual era extremamente integrado no tempo do artesão;
- iii) A fragmentação do fluxo de informação implicou em fragmentação do conhecimento. Em contrapartida as melhorias no controle do fluxo de materiais aumentou a repetibilidade e reprodutibilidade dos processos.
- iv) O surgimento da eletrônica, mais especificamente dos microprocessadores, trouxe flexibilidade ao fluxo de materiais e digitalizou o fluxo de informação; e

¹⁰ Linha transfer é o nome dado a uma linha de produção, a qual consiste-se de várias estações de trabalho integradas em série por um mecanismo comum e um sistema de controle único.

- v) A digitalização, associada ao aumento da velocidade de processamento de dados, ainda não é suficiente para se recuperar o nível de integração do fluxo de informação existente no tempo do artesão.

Essa falta de integração, ainda verificada nos sistemas de manufatura modernos, será o assunto da próxima seção. Entretanto, antes de darmos início a ela, vamos executar uma atividade cujo propósito é sedimentarmos os conceitos de fluxo de materiais e fluxo de informação.

Atividade I

Considere que o componente representado como imagem na Figura 7 faz parte de um produto bem complexo, como por exemplo uma locomotiva. Diante disso, descreva o fluxo de informação para a produção desse componente, supondo os seguintes cenários:

- Você não tem nenhuma informação sobre essa peça (desenho, material, tolerâncias de montagem,...) e deve produzir apenas uma unidade; e
- Você possui um modelo completo desse componente e sabe que essa peça deve ser produzida em lotes relativamente grandes, ou pequenos (a escolha é sua).

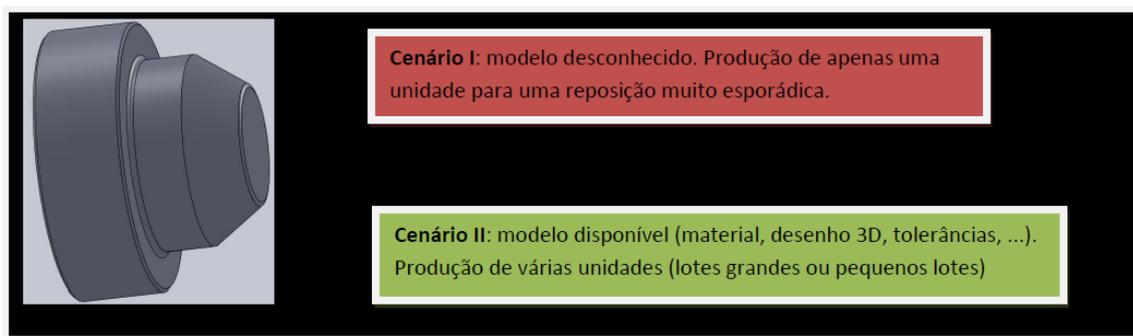


Figura 7. Atividade I – elaboração do fluxo de informação considerando os cenários dados.



Parte II

INTEGRAÇÃO E AUTOMAÇÃO

Na **Parte I**, foi mostrado que a incorporação da eletrônica aos sistemas mecânicos existentes resultou, praticamente, na automação completa do fluxo de materiais no chão-de-fábrica e no aumento da flexibilidade dos sistemas produtivos. Entretanto, apesar da completa digitalização do fluxo de informação, a sua automação e, mais importante, a sua integração, ainda continuam em aberto nos sistemas de manufatura atuais.

Nesta segunda parte da apostila, iremos abordar justamente isso: automação e integração do fluxo de informação.

2.1 Automação e integração do fluxo de informação

Dizer que um sistema de manufatura (SM) é integrado, ou automatizado, não é uma tarefa fácil. Integração é um conceito ligado ao fluxo de informação. Por sua vez, a automação refere-se tanto ao fluxo de materiais como o de informação.

A ideia geral que se tem da integração se baseia no fluxo de informação que existia na mente do artesão, o qual era o único responsável pelo processamento de todos os dados relativos ao seu negócio. Sendo assim, um sistema de manufatura integrado deveria atender às seguintes premissas:

- i) um mesmo dado não deve entrar, ou ser armazenado, mais de uma vez;
- ii) uma alteração realizada em qualquer instante do ciclo de vida deve ser propagada a jusante e a montante do ciclo de vida do produto; e
- iii) todos os agentes do sistema (máquinas ou pessoas) podem, se devidamente autorizados, ter acesso a qualquer informação em qualquer momento do ciclo de vida do produto.

É interessante observar que, em decorrência da divisão do trabalho e, por conseguinte, com o surgimento da departamentalização, os SM's dificilmente atendem a tais premissas.

A proposta de uma manufatura integrada por computador (CIM – do inglês *Computer Integrated Manufacturing*) ganhou força no início da década de 1990 com a redução do custo, melhoria e disseminação dos computadores nos SM's.

Inicialmente houve uma certa confusão entre os conceitos de integração e interfaceamento. Diante disso, várias empresas propuseram o uso de “tradutores” para, equivocadamente, promover a integração de diferentes máquinas com diferentes formatos de dados.

Correntemente, tradutores são denominados por interfaces, as quais são condições **necessárias**, mas não **suficientes**, à integração. A integração deve compreender o fluxo de informação em todas as fases do ciclo de vida dos produtos e contemplar o negócio do SM com um todo.

Segundo alguns pesquisadores, o alcance da integração compreende o estabelecimento de um modelo para representação de dados que sustente as premissas mencionadas anteriormente.

Entretanto, o desenvolvimento de um modelo desse tipo, por parte de um único sistema de manufatura, é extremamente difícil. Essa dificuldade decorre de dois fatos: primeiramente, um SM convive com um volume muito grande de dados que entram e saem em diversos formatos. Por fim, toda vez que um novo hardware ou software é adquirido, o modelo deve ser ajustado para comportar esses novos formatos de dados.



Com o intuito de reduzir custos de desenvolvimento e eliminar o uso de formatos proprietários, a International Organization for Standardization (ISO), por meio do Comitê Técnico (TC184) e Subcomitê (SC4) propôs o desenvolvimento de um modelo de dados que contempla todo o ciclo de vida de um produto. Esse modelo é conhecido pelo acrônimo STEP (STandard for the Exchange of Product model data) e é definido pela norma ISO 10303 (Pratt, 2001).

O desenvolvimento do STEP é baseado em um processo dinâmico, progressivo e condicionado à votação e aprovação pelos integrantes do comitê 184/SC4. Ele é um projeto ambicioso de grande envergadura, pois além de contemplar todo o ciclo de vida do produto ele também possibilita a modelagem de acordo com o nicho de negócio no qual o SM se encontra.

O STEP compreende uma estrutura modular composta por vários protocolos de aplicação (AP do inglês Application Protocol) direcionados a um determinada atividade ou fase do ciclo de vida. Atualmente, somente dois protocolos foram adotados pelos desenvolvedores de CAD/CAM: o AP203 e o seu similar o AP214.

Vários softwares de CAD oferecem suporte para conversão de seus modelos em conformidade com esses AP's. Na outra ponta, vários softwares de CAM possuem recursos para leitura e renderização de produtos modelados em STEP.

Apesar de ainda estar longe da tão sonhada integração, o projeto ISO STEP tem contribuído muito para consolidação da modelagem tridimensional (3D) e para o interfaceamento entre sistemas CAD-CAM. Mais detalhes sobre os AP's 203 e 214 serão fornecidos mais adiante, durante um estudo caso.

Por sua vez, a automação pode ser entendida como sendo a realização de tarefas físicas e mentais que podem ser executadas sem a participação humana.

A quantidade de tarefas que é feita sem a participação humana determina o nível de automação em um dado sistema de manufatura. Essa ideia de nível de automação surgiu na literatura especializada há muitos anos atrás e vem sendo aperfeiçoada e adaptada para os sistemas modernos.

Amber e Amber, 1962 propuseram um sistema de métricas (indicadores) denominado "Yardstick of automation" para avaliar a extensão da atividade humana que está sendo substituída pela máquina. Posteriormente, esse quadro foi atualizado por Degarmo, et al. (1997). O quadro apresentado na Figura 8 é uma tradução/adaptação desse sistema.

Não existe, no referido quadro, uma datação para os níveis. De certa forma, sistemas de manufatura diferentes alcançam esses níveis em momentos distintos das suas histórias. O que se pode afirmar é que, na atualidade, todas as empresas do setor metalmeccânico já atingiram o nível A4. O nível seguinte (A5) já é realidade em algumas empresas consideradas de ponta.

O nível A6 pode ser considerado com o marco para a era da manufatura inteligente e, certamente, será um componente do pacote tecnológico presente na "Industria 4.0".

Apesar de o nível A7 ser considerado como muito “futurista”, pois trata da substituição de uma característica marcante dos seres humanos; algumas pesquisas já foram, e vem sendo, realizadas sobre esse tema. Um trabalho considerado como referência foi publicado por Margaret Boden na revista Artificial Intelligence em 1998.

Obviamente que o último nível (A8) é tema de filmes e livros de ficção e, pessoalmente, espero que não seja alcançado. Entretanto, não podemos esquecer que o uso crescente de sistemas colaborativos, tais como os exoesqueletos já em uso em linhas de montagem, como também o número crescente de pesquisas sobre a fusão humano-máquina é um indício de que, no futuro, não teremos mais condição de distinguir entre humanos e máquinas.

Vários projetos sobre o tema fusão humano-máquina estão em desenvolvimento atualmente. Um bom relato sobre isto pode ser visto em “HAL: Hybrid Assistive Limb based on Cybernics”. Nesse artigo o autor Yoshiyuki Sankai apresenta o conceito de Cybernics, o que, segundo ele, é um novo domínio de pesquisa interdisciplinar baseado em várias disciplinas, tais como: cibernética, mecatrônica e informática, neurociência, robótica, engenharia de sistemas, tecnologia da informação, ergonomia, fisiologia, ciências sociais, etc.

Uma maior discussão sobre os níveis de automação será empreendida a partir do estudo de caso apresentado a seguir.

Nível de automação	Atributo humano substituído	Exemplos
A0	Sem substituição	Apenas trabalhos manuais com ferramentas rudimentares
A1	Energia	Máquina a vapor; motor elétrico
A2	Destreza	Controle de posição por chaves de fim de curso e/ou relés eletromecânicos
A3	Diligência	Automação rígida (comes, sistemas hidráulicos e pneumáticos)
A4	Julgamento	Autoajuste; comando numérico
A5	Avaliação; adaptação a partir de análise	Máquinas equipadas com sensores e controle adaptativo
A6	Raciocínio e aprendizagem por experiência	Redes neurais e sistemas especialistas. Sistema para planejamento de processos; reconhecimento de features.
A7	Criatividade	Ainda sem exemplos na indústria, mas existem pesquisas sobre o tema. Vide, por exemplo, Boden, M. “Creativity and Artificial intelligence”. Artificial Intelligence 103 (1998) 347-356
A8	Domínio	Ficção

Figura 8 – “Yardstick of automation”. Adaptado de Degarmo, et al.

2.2 Um estudo de caso: manufatura na empresa XYZ

Para fins de discussão e ilustração dos conceitos de integração e automação, vamos considerar um estudo de caso fictício que ocorreu em uma empresa também fictícia, a “XYZ”. Essa empresa atua no segmento metalmeccânico e desenvolve soluções para a indústria de máquinas agrícolas, em especial componentes para sistemas hidráulicos. O caso a ser tratado aqui foi ilustrado por meio das figuras 10 a 13, as quais contêm o fluxo de informação referente ao produto [P2018Z412](#).

O fluxo de informação para produção do **P2018Z412** segue aquele modelo apresentado na primeira parte desta apostila e esquematizado na Figura 5.

Com o intuito de facilitar a discussão do conceito de automação e integração vamos considerar uma redução de escopo do fluxo de informação. Essa redução implicará no seguinte:

- i) o fluxo de informação ocorre apenas dentro da XYZ;
- ii) o componente é relativamente simples (**P2018Z412F1**), tal como representado na Figura 9, mas faz parte de um produto mais complexo (**P2018Z412**);
- iii) as fases do ciclo de vida consideradas serão apenas o design (projeto) e a manufatura;
- iv) apenas os processos de usinagem serão considerados na fase de manufatura;
- v) os fluxos relacionados à inspeção, ao controle e ao planejamento da produção não serão detalhados, mas apenas mencionados nos momentos oportunos;
- vi) As explicações/comentários sobre as fases que compõem o ciclo de vida do **P2018Z412** serão baseadas em questões/respostas, tal como apresentado a seguir.

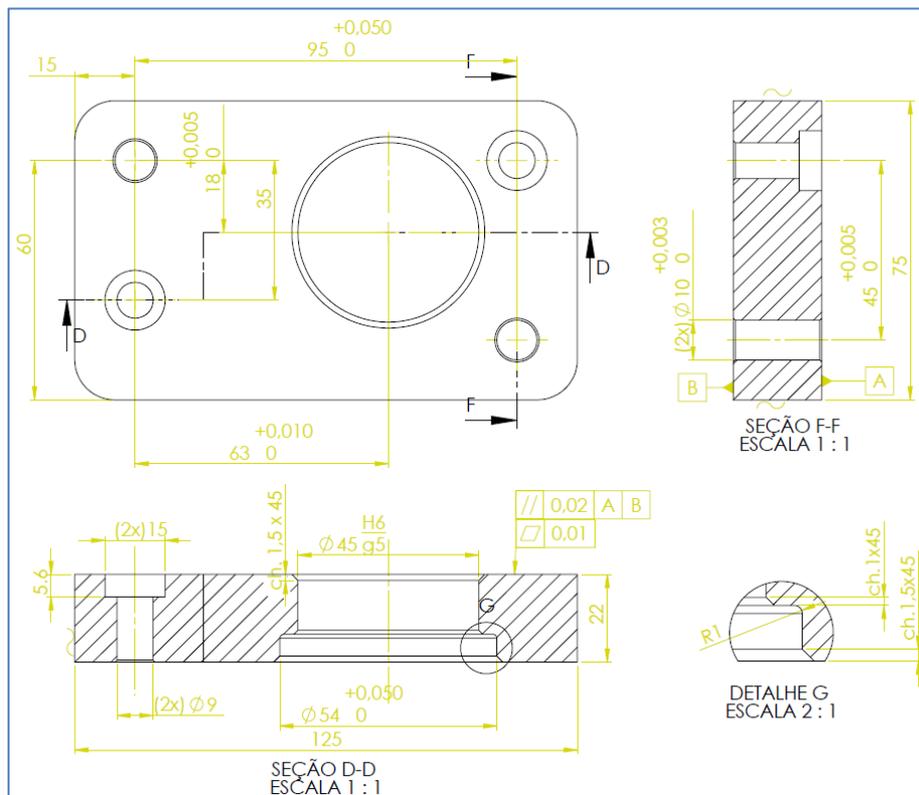


Figura 9 – representação ortográfica do componente **P2018Z412F1**.

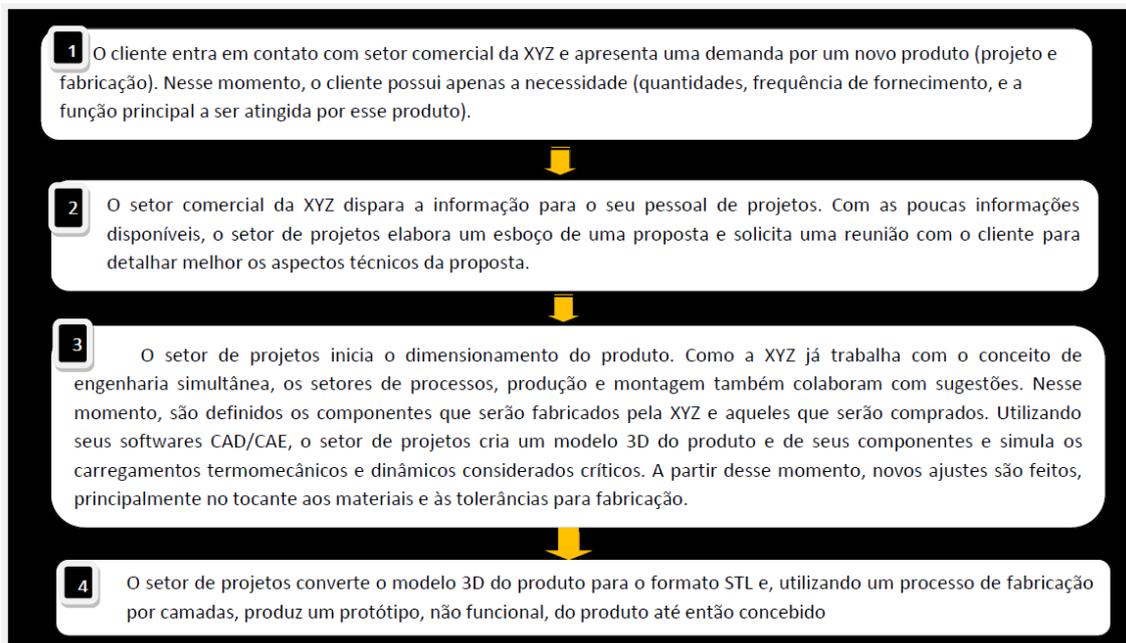


Figura 10 – ciclo de vida do P2018Z412 e fluxo de informação dentro da XYZ

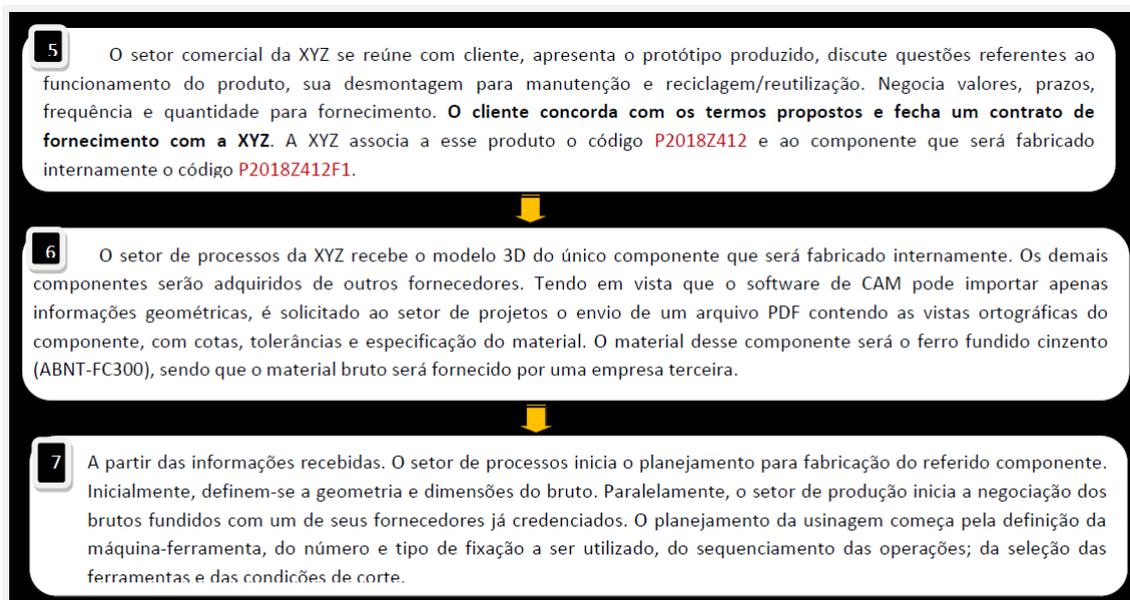


Figura 11 – continuação: ciclo de vida do P2018Z412 e fluxo de informação dentro da XYZ

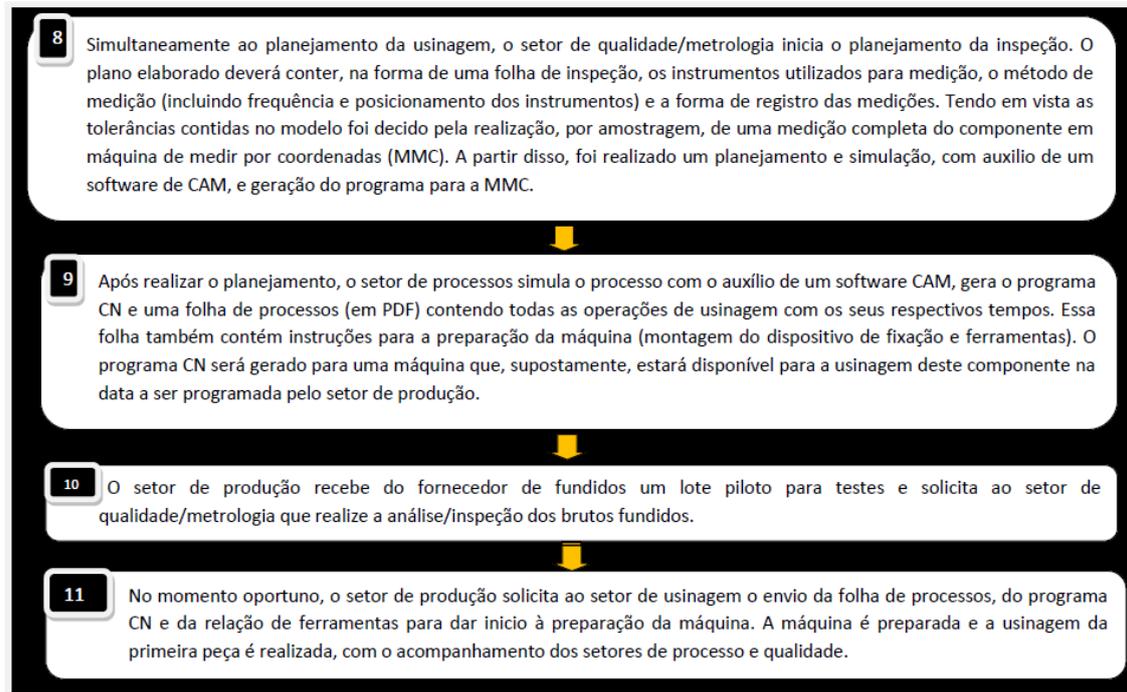


Figura 12 – continuação: ciclo de vida do P2018Z412 e fluxo de informação dentro da XYZ

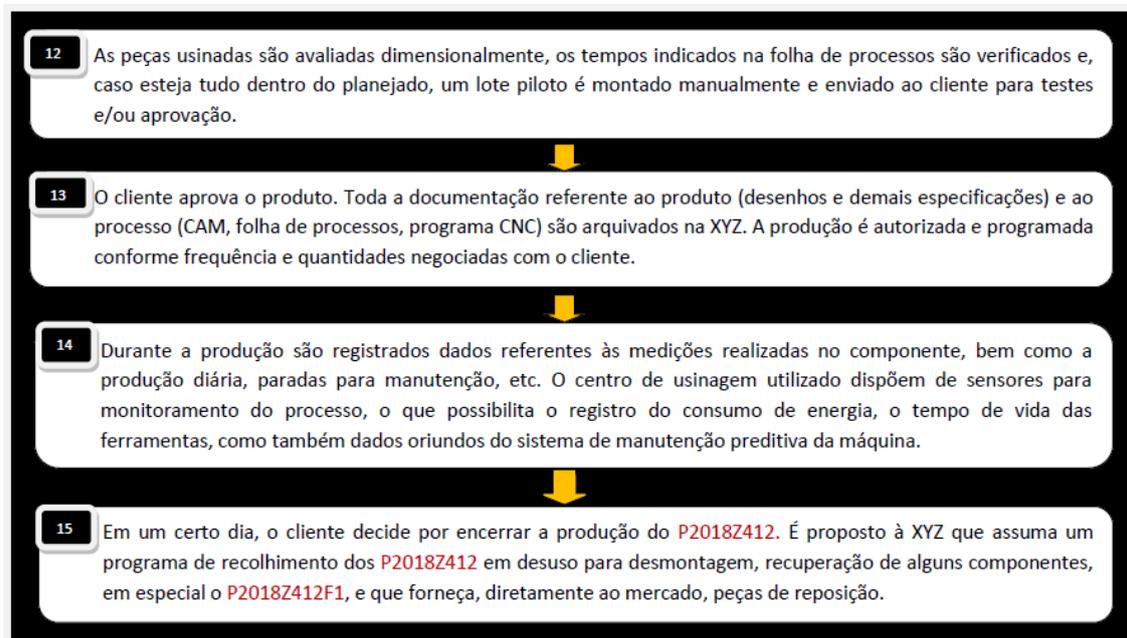


Figura 13 – finalização do ciclo de vida do P2018Z412 e fluxo de informação dentro da XYZ

Questões

Q1. Nas duas primeiras etapas, ao se iniciar a conversa com o cliente, seria interessante que a XYZ fizesse uso de algum tipo de formalismo para registro das necessidades?

Na maioria dos casos, essa “conversa” cliente-fornecedor não é registrada e é apenas transmitida de forma verbal, o que implica em várias reuniões entre o cliente e o setor de projetos. O que é importante observar é se, nestas duas etapas, os requisitos do produto, leia-se aqui sua função e comportamento, são formalmente registrados e, mais importante, se esses registros (dados) podem dar suporte às demais fases do ciclo de vida.

Segundo Ratchev et al (2011), o sucesso da conversão das necessidades (requisitos) do cliente no design de um produto depende de um casamento preciso entre esses requisitos e o domínio, por parte do fornecedor, sobre seus produtos e processos.

O entendimento das necessidades do cliente e a sua conversão em atributos do produto exige um conjunto de métodos, os quais se constituem em uma nova disciplina denominada de **Engenharia de Requisitos**.

A engenharia de requisitos tem vínculo muito forte com o desenvolvimento de softwares, mas os seus fundamentos vêm sendo adotados em outras áreas, tais como o projeto de produtos para fins mecânicos (Darlington e Culley, 2002). Vários exemplos da aplicação da engenharia de requisitos no domínio mecânico podem ser encontrados no artigo elaborado por Wiesner et al. (2017).

Atualmente, já existem soluções comerciais para facilitar a formalização das necessidades do cliente e sua conversão em requisitos de projeto. Uma dessas soluções, oriunda da engenharia de software, é o projeto DOORS distribuído pela IBM Rational.

Outras soluções já são ofertadas diretamente para o universo mecânico, tais como o Siemens Teamcenter® PLM (Product Lifecycle Management) software e o Catia PLM.

Uma proposta para implantar esse tipo formalização em formato aberto vem sendo construída pelo projeto ISO STEP (ISO 10303) e, mais especificamente, no *Application Protocol* AP233.

Ratchev et al (2011) propuseram o uso do protocolo AP233 em conjunto com uma metodologia denominada KARE (knowledge Acquisition and sharing for Requirement Engineering) para desenvolver um aplicativo (plug-in) para o software DOORS. Segundo eles, uma aplicação piloto se mostrou efetiva na especificação de requisitos de projeto, o que contribuiu para a redução do tempo de desenvolvimento dos produtos avaliados.

Q2. Para apresentar a primeira versão do produto (protótipo) a XYZ reuniu os seus diversos setores de engenharia. Possivelmente essa fase consumiu bastante tempo entre reuniões, discussões e rascunhos, até se chegar ao protótipo. Seria possível pensar, baseando-se nas



tecnologias que dispomos atualmente, em uma forma de reduzir esse tempo de prototipagem?

A resposta a essa questão está diretamente ligada à pergunta anterior e passa pela capacidade em transformar as necessidades do cliente em especificações de projeto. Se essa transformação for eficiente, então será possível propor um modelo para os requisitos que esse produto deva atender.

A partir desse modelo, uma metodologia baseada em técnicas de recuperação e reutilização de conhecimento poderia ser aplicada para encontrar soluções (projetos) já desenvolvidos pela XYZ e, dessa forma, adaptá-los ao problema corrente, diminuindo-se assim o tempo de desenvolvimento do novo produto.

A norma ISO 10303-AP233 mencionada anteriormente aborda, exatamente, essa questão da representação/formalização dos requisitos do produto. Por se tratar de um formato aberto e legível, ela pode ser utilizada para o desenvolvimento de aplicativos que auxiliem no processo de recuperação e reutilização de projetos já desenvolvidos para problemas similares.

A título de ilustração, a Figura 14 contém um fragmento de um arquivo gerado após a modelagem dos requisitos de um produto. A partir desse exemplo, pode-se observar uma estrutura de dados no formato de texto e plenamente legível, o que facilita a recuperação de dados sem a necessidade de interfaces especiais ou pagas.

Segundo Lim et al (2015), já foi reportado na literatura especializada que mais de 75% das atividades de projeto compreendem a reutilização de soluções passadas, e que engenheiros geralmente consomem de 20 a 30% do tempo na recuperação e processamento de informação de projetos.

Ainda segundo eles, esses fatos sugerem que o desenvolvimento de um sistema que auxilie, ou execute, nesse processo de recuperação de informação é vital. Entretanto, o desafio aqui é como esses “dados abertos” podem ser misturados ao conhecimento já existente para trazer maiores benefícios à empresa.

Atualmente, vários pesquisadores vêm propondo o uso de técnicas de inteligência artificial para a recuperação e reutilização de projetos antigos para a solução de problemas novos. Nessa linha, uma das técnicas mais promissoras é o raciocínio por analogia, ou raciocínio baseado em casos.

Goel e Craw (2006) reportaram sobre o sucesso dessa técnica na recuperação de projetos de engenharia. Romero et al. (2014) desenvolveu um sistema para auxiliar na recuperação de projetos para indústria aeronáutica. Segundo eles, o raciocínio baseado em casos foi o método central utilizado no referido sistema.

Outras técnicas de inteligência artificial também vem sendo aplicadas no desenvolvimento de sistemas para redução do tempo de projeto de novos produtos. Saridakis e Dentsoras (2008) apresentaram, a partir de uma revisão da literatura, vários casos onde técnicas de inteligência



artificial podem ser aplicadas em problemas de design, em especial as técnicas de lógica nebulosa e redes neurais. Nesse referido trabalho eles cunharam o termo SCAD (Soft Computing Aided-Design), ou seja, projeto auxiliado por comutação inteligente.

Se consideramos que existe um grande interesse no desenvolvimento de sistemas para auxiliar na recuperação de projetos, podemos imaginar que futuramente essa atividade, a qual ainda é considerada como exclusiva do ser humano, possa ser automatizada. Quando e isso ocorrer, e se ocorrer, estaremos atingindo o nível A7 na escala de automação, tal como ilustrado por meio da Figura 8.

Enquanto isso não chega, a XYZ pode fazer uso de duas técnicas já bem conhecidas pelos projetistas que são o “projeto orientado pela manufatura” e o “projeto orientado pela montagem”.

Essas duas técnicas têm como ponto comum um conceito denominado DFX (do inglês Design for eXcellence). No projeto voltado à excelência, as atividades à jusante no ciclo de vida do produto são consideradas antes de se dimensionar um produto. As fases mais importantes, embora existam outras, são a fabricação e a montagem.

Tanto a fabricação quanto a montagem impõem certas restrições ao dimensionamento do produto. Se essas restrições forem avaliadas antecipadamente, o tempo de desenvolvimento poderá ser encurtado significativamente.

Além disso, reuniões acaloradas e baseadas em opiniões poderão ser evitadas, reduzindo-se assim o estresse que geralmente ocorre no lançamento de novos produtos. Sobre esse assunto existe uma literatura muito vasta, em especial aquela dirigida ao projeto mecânico. Um livro referência é o “Product Design for Manufacture and Assembly” escrito por Boothroyd et al (2010).

```
AP233
System Engineering

AP233 Requirements Part 21 file (ARM based)
Generated by Eurostep Demonstrator Tool

ISO-10303-21;
HEADER;
FILE_DESCRIPTION (('Ian Bailey'), 2,1);
FILE_NAME ('C:\Program Files\Eurostep\AP233 Demonstrator\Elevator.stp', 2003-05-07T14:02:48, (''), ('Ian Bailey'),
'ATBX V1.0 - AP233_PBR_ALPHA1 Toolbox Version 1.0 (2002-07-02)', 'ATBX V1.0', 'C:\Program Files\Eurostep\AP233 Demonstrator\Elevator.stp.log');
FILE_SCHEMA (('AP233_PBR_ALPHA1'));
ENDSEC;
DATA;
#1 = PRODUCT_CATEGORY ('requirement', 'requirement', 'a required property or functionality');
#2 = PRODUCT_CATEGORY ('system', 'system', 'An assembly of interacting, active components or elements forming a whole');
#3 = VIEW_DEFINITION_CONTEXT ('Systems Engineering View', $, 'System Design Stage');
#4 = REPRESENTATION_CONTEXT ('SysEng', 'Systems Engineering');
#8 = PRODUCT_CATEGORY_ASSIGNMENT (#2, (#5));
#12 = PRODUCT_CATEGORY_ASSIGNMENT (#1, (#9));
#36 = PRODUCT_CATEGORY_ASSIGNMENT (#1, (#33));
#46 = PRODUCT_CATEGORY_ASSIGNMENT (#1, (#43));
#56 = PRODUCT_CATEGORY_ASSIGNMENT (#1, (#53));
#70 = PRODUCT_CATEGORY_ASSIGNMENT (#1, (#67));
#79 = PRODUCT_CATEGORY_ASSIGNMENT (#1, (#76));
#90 = PRODUCT_CATEGORY_ASSIGNMENT (#1, (#87));
#135 = SYSTEM_DESIGN ((#3), #134, 'MP1v1.0view1', #3, 'MP1v1.0view1', .F.);
#134 = SYSTEM_VERSION ('1.0', 'version 1.0 of MP1', #133);
#133 = SYSTEM ('Description for Maintenance panel', 'MP1', 'Maintenance panel');
#140 = SYSTEM_DESIGN ((#3), #139, 'DT1v1.0view1', #3, 'DT1v1.0view1', .F.);
#139 = SYSTEM_VERSION ('1.0', 'version 1.0 of DT1', #138);
#138 = SYSTEM ('Description for Diagnostic tool', 'DT1', 'Diagnostic tool');
#161 = PRODUCT_CATEGORY_ASSIGNMENT (#2, (#158));
#142 = SYSTEM_ASSEMBLY_RELATIONSHIP ($, 'Diagnostic tool', #140, #125, 'System Assembly', $, $, $);
#137 = SYSTEM_ASSEMBLY_RELATIONSHIP ($, 'Maintenance panel', #135, #125, 'System Assembly', $, $, $);
#9 = REQUIREMENT ('High reliability', 'R1', 'Reliability');
#33 = REQUIREMENT ('Lift 200 people', 'R2', 'Lift capability');
#43 = REQUIREMENT ('Maximum number of passengers', 'R3', 'Maximum passenger load');
#53 = REQUIREMENT ('Maximum weight', 'R4', 'Maximum weight');
#67 = REQUIREMENT ('Speed requirements', 'R5', 'Speed');
#5 = SYSTEM ('A state-of-the-art elevator', 'EV1', 'Elevator');
#6 = SYSTEM_VERSION ('1.0', 'version 1.0 of EV1', #5);
#7 = SYSTEM_DESIGN ((#3), #6, 'EV1v1.0view1', #3, 'EV1v1.0view1', .F.);
```

Figura 14 - Excerto da norma STEP-AP233 – fonte: U'Ren, Jim. 2003. “An Overview of AP233 - STEP's Systems Engineering Standard.” Presentation for AP233 Working Group, Defense Technical Information Center 6th Annual System Engineering Conference. 20 October 2003

Q3. Na etapa nº 4, por que o modelo CAD original foi convertido para STL? Qual a utilidade desse modelo para demais fases do ciclo de vida do P2018Z412? Aparentemente, houve uma violação da 1ª premissa da integração?

De fato houve uma violação da 1ª premissa da integração: **um mesmo dado não deve entrar, ou ser armazenado, mais de uma vez.** Esse modelo STL é uma cópia simplificada do modelo 3D original.

Não obstante, deve ser entendido que isso ocorreu em função de uma restrição imposta pela maioria das máquinas utilizadas nos processos de manufatura aditiva. O software que acompanha tais equipamentos tem com entrada modelos 3D baseados em triangulações, sendo que o formato STL é considerado como padrão “de facto” nessa área.

O STL é um acrônimo para Standard Tessellation Language e foi desenvolvido, sob encomenda, pela empresa 3D System por ocasião do lançamento do seu processo de manufatura aditiva baseada na polimerização de resinas por raio laser, o qual também é conhecido por estereolitografia.

A triangulação é o nome que se dá ao processo de conversão de modelos 3D, baseados em outras técnicas de representação, ou pela modelagem direta a partir de curvas 2D, em malha não organizada composta de vários triângulos.

Do ponto de vista geométrico, a triangulação não se caracteriza por uma modelagem sólida, mas sim de suas superfícies externas. A estrutura de dados de um modelo STL é extremamente simples e poder ser formatada em ASCII¹¹ e binário. Sendo este último o mais usual, tendo em vista a sua inerente compactação de dados.

A vantagem do formato ASCII é sua legibilidade. Isto é, ao abrir o arquivo podemos entender como os dados estão estruturados, tal como apresentado na Figura 15. Para cada triângulo existe uma estrutura (entre chaves na Figura 15) cujas palavras em negrito são termos próprios do formato. “Facet Normal” refere-se ao vetor unitário normal à superfície definida pelo triângulo. A ordem dos três vértices do triângulo deve, obrigatoriamente, coincidir com o sentido dado pelo vetor normal. Dessa forma, um observador externo deve enxergar os vértices orientados no sentido anti-horário. As outras duas palavras reservadas “solid” e “endsolid” indicam, respectivamente, o início e fim do arquivo. Os termos entre colchetes são opcionais, mas geralmente se utiliza o nome do arquivo.

Ainda na Figura 15 podemos observar o resultado da triangulação do componente **P2018Z412F1** composta por 2944 triângulos.

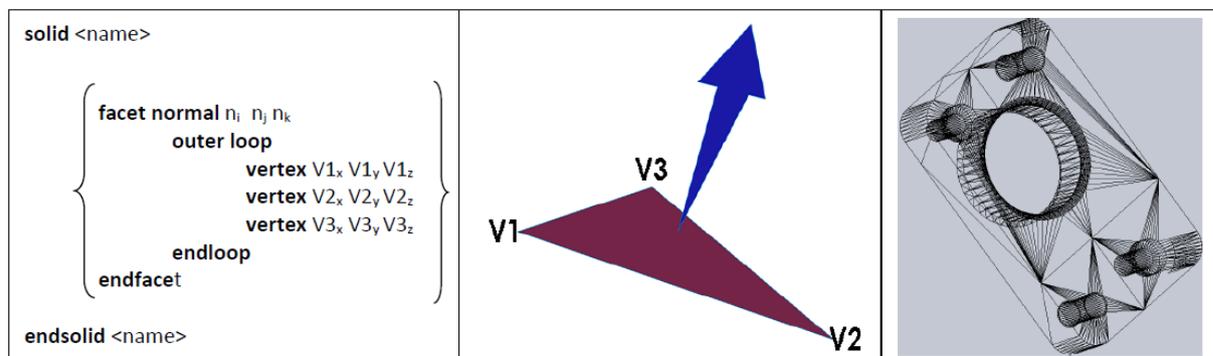


Figura 15 - Estrutura de dados do STL e triangulação do **P2018Z412F1**.

No caso da XYZ, a conversão do modelo original para STL só servirá para a fabricação do protótipo por meio da manufatura aditiva. Ele não terá nenhuma serventia para as demais fases do ciclo de vida do **P2018Z412**.

Já existe uma proposta, no âmbito da norma ISO 10303, para inclusão da triangulação como técnica de representação geométrica. Nesse caso, um novo formato, ligeiramente diferente do STL atual, seria adotado. Essa proposta já foi incluída no AP242 “*Managed model-based 3D engineering*”.

¹¹ ASCII (do inglês American Standard Code for Information Interchange) é um formato de dados baseado em texto.

Q4. Ainda na etapa nº 4, o que significa modelo não funcional? Isto agrega algum valor ao tempo de desenvolvimento, custo e desempenho do **P2018Z412**?

Ao produzir um protótipo do **P2018Z412** o propósito da XYZ foi convencer o cliente da viabilidade do seu projeto. Ao optar pelo processo de manufatura aditiva, provavelmente uma técnica de FDM (Fusion Deposition Modelling) foi empregada. Por meio dessa técnica é possível produzir protótipos em polímeros termoplásticos, geralmente ABS ou PLA.

Nesse caso, os protótipos servem apenas para aumentar o grau de realismo do produto concebido, portanto constituindo-se em um modelo não funcional.

De certa forma isso agrega valor e pode ser útil para a identificação problemas durante as demais fases do ciclo de vida, em especial a montagem e desmontagem. Entretanto, dependendo do processo e material escolhidos, isso pode agregar um custo razoável ao produto.

Na literatura especializada existem vários artigos sobre esse assunto.

Vide, por exemplo, o periódico Rapid Prototyping Journal (<https://www.emeraldinsight.com/journal/rpj>).

Artigos de revisão podem ser visto em: Thomas e Gilbert (2014), com uma abordagem baseada em custos, como também em Bikas et al. (2016).

O livro de autoria de Neri Volpato “Prototipagem Rápida Tecnologias e Aplicações “ contém uma boa revisão sobre técnicas de manufatura aditiva.

Q5. Aparentemente o código **P2018Z412F1** atribuído ao componente que será usinado é apenas um número sequencial que guarda relação com o produto ao qual ele pertence. Seria possível utilizar outro tipo de codificação? Se afirmativo, isto teria algum impacto sobre os fluxos de materiais e informação?

O código gerado é apenas um número seriado que guarda relação com o produto (**P2018Z412**) do qual ele faz parte. Se o arranjo produtivo da XYZ não for do tipo celular e ela desejar adotá-lo no futuro, então seria importante a aplicação da tecnologia de grupo para classificação e codificação dos seus produtos.

A tecnologia de grupo (TG) pode ser definida com uma filosofia de manufatura baseada na identificação de peças similares e no aproveitamento disso para o organizar o arranjo produtivo (fluxo de materiais e leiaute) no formato de uma célula de manufatura.

Além disso, baseando-se na premissa de que peças similares atendem a requisitos e processos similares, a TG pode ser aplicada na simplificação do projeto e no planejamento de processos. Após a classificação das peças, pode-se obter um código para cada uma delas o qual, futuramente, pode ser utilizado no planejamento das demais fases do ciclo de vida.

Um dos sistemas de codificação mais antigos foi desenvolvido na Universidade de Aachen (Alemanha) no início da década de 1970 e, em homenagem ao seu criador, foi denominado sistema Opitz.

A título de ilustração, a Figura 16 contém um exemplo da aplicação desse sistema. Uma boa revisão sobre esse assunto pode ser encontrada em Papaioannou e Wilson (2010).

Campo	valor	significado	Ilustração
C1	1	Peça rotacional ($0,5 < L/D < 3$)	
C2	1	Elemento da forma externa escalonado em das extremidades	
C3	1	Elemento da forma interna liso ou escalonado em das extremidades	
C4	0	Usinagem de superfícies planas	
C5	3	Furo auxiliar radial	
C6	2	$50 < \text{diâmetro} < 100$	
C7	3	Material – aço de médio carbono	
C8	0	Forma interna - cilíndrica	
C9	2	precisão	

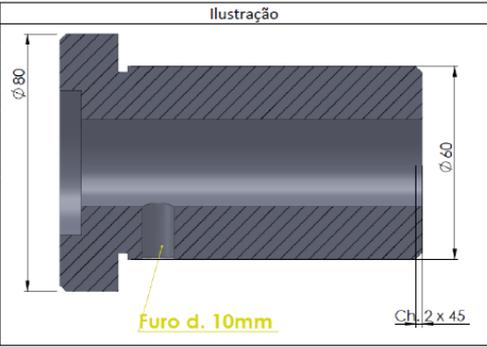


Figura 16 - Codificação de uma peça baseada no sistema Opitz.

Q6. Na etapa nº 6 ocorre uma violação da 1ª premissa da integração, além de gerar uma grande perturbação no fluxo de informação. Qual foi a causa disso e o que pode ser feito para minorar/eliminar esse problema?

Na atualidade, os sistemas CAM (do inglês Computer-Aided Manufacturing), quando não desenvolvidos pelo mesmo fabricante do CAD, importam apenas os dados geométricos do modelo.

Nesses casos, a utilização de modelos sólidos é preferível, principalmente aquela baseada em na técnica de representação por fronteiras. A vantagem disso é que o modelo pode ser exportado com todas as suas restrições topológicas. Apesar disso, as informações relativas ao material, às cotas e tolerâncias são perdidas.

Diante disso, informações verbais, ou armazenadas em outras mídias, ainda se fazem necessárias para dar início ao planejamento/simulação da usinagem.

Uma solução para esse problema passa pela adoção dos formatos neutros tal como proposto pela norma ISO-10303. Vide mais sobre essa norma na questão nº 14.

Q7. Implicitamente, pode-se entender que o material bruto será um fundido sob medida. Diante disso, o setor de produção terá que negociar com um de seus fornecedores o desenvolvimento desse fundido. Obviamente, isso terá um impacto sobre os fluxos de materiais e informação, tornando a integração mais difícil. Diante disso, o que poderia ser feito para minorar esse problema?

Uma solução seria a utilização de barras fundidas, o que implicaria apenas na inclusão de um processo de serramento. Obviamente que um fundido sob medida aumenta a entropia do fluxo de informação, sem considerar o tempo de transporte que poderia ser maior, somado ao fluxo de materiais dentro do fornecedor.

Outra alternativa seria a utilização da manufatura híbrida, mas isso será discutido na questão nº 16.

Q8. Ainda na etapa nº 7, pode-se observar que o setor de processos deve empreender um grande esforço para planejar todo o processo de usinagem, pois ele exige um detalhamento muito grande. A questão aqui é a seguinte: tem como automatizar isso?

Essa atividade é denominada, por alguns pesquisadores, como microplanejamento de processos de fabricação. Nesse campo, a usinagem se destaca pela sua elevada complexidade e riqueza de detalhes. Isto vem desafiando a comunidade científica e técnica há várias décadas. Nas empresas, observa-se a presença de equipes com vasta experiência.

O Planejamento de processos de usinagem pode ser resumido da seguinte forma: (Steudel, 1984 e Alting e Zhang, 1989):

- Interpretação do desenho do produto;
- Seleção dos processos de usinagem;
- Seleção das máquinas;
- Seleção das ferramentas;
- Determinação dos dispositivos de fixação e superfícies de referência;
- Seqüenciamento das operações;
- Determinação das condições de corte; e
- Cálculo dos tempos de usinagem.

A complexidade de cada uma das etapas listadas acima torna impossível a geração do plano ideal na primeira tentativa. O refinamento do plano é uma obrigatoriedade para que se possa executá-lo com sucesso. Entretanto, o ato de planejar está desvinculado, na maioria dos casos, do ato de executar.

O desenvolvimento de programas computacionais para o planejamento de processos é justificado para sistemas de manufatura que operam sob encomenda ou em pequenos lotes. Nestas circunstâncias, a definição dos planos de produção, inspeção e o orçamento para fins de concorrência são dependentes de um plano de processos bem detalhado e preciso.

Em outros ambientes, entretanto, a importância do planejamento com auxílio de computadores não reside mais na urgência, mas sim na otimização dos processos e, conseqüente, na redução de custo e melhoria da qualidade dos produtos.

Por outro lado, sistemas para planejamento dependem de sistemas de manufatura integrados por computador. Neste caso, informações transmitidas via papel, ou verbalmente, são difíceis de serem processadas e transmitidas. Isto implica em criar uma “ilha de automação” no meio de um “mar de papel”.



O uso de computadores no planejamento de processos tem sido advogado como o elo necessário à integração das atividades de projeto e manufatura. O tempo necessário para realizar um plano completo é muito grande e requer um profissional com larga experiência. Essa experiência, entretanto, não pode ser transmitida a um profissional mais jovem num curto intervalo de tempo. Quando esse especialista se aposenta, ele leva consigo todo esse conhecimento.

Esse cenário é um argumento fortíssimo em favor do emprego de computadores no planejamento de processos. Estudos nesse sentido datam desde Niebel, num trabalho publicado em 1965, (citado por Alting e Zhang, 1989).

A sigla CAPP (do inglês Computer-Aided Process Planning) está ligada a um grande número de sistemas computacionais que foram propostos/implementados com o intuito de auxiliar o processista ou automatizar o planejamento de processos. Uma boa parte dos CAPP's propostos se baseia na construção de sistemas especialistas.

O desenvolvimento de Sistemas Especialistas surgiu a partir de uma mudança conceitual por parte de alguns pesquisadores em Inteligência Artificial (IA). Em síntese, isto implicou em aceitar que a potência de um programa reside no conhecimento especializado e não somente no formalismo e esquemas de inferência nele contidos. Anteriormente, a estratégia era construir programas de aplicação geral (general problem solver - Newell e Simon, 1972). Entretanto, quanto maior a generalidade de um programa (tipos de problemas a serem tratados) menor sua eficiência ao enfrentar problemas específicos. Essa nova mentalidade resultou na elaboração de técnicas para a representação do processo cognitivo.

Um Sistema Especialista é uma tentativa de simular o comportamento humano na resolução de uma tarefa bem específica e limitada, e não sendo, em hipótese alguma, um modelo de inteligência.

Uma revisão bem atualizada sobre esse assunto pode ser vista em Kumar (2017).

Q9. A etapa nº 8 é referente à inspeção. Em vários casos, essa atividade é subestimada. Em parte, porque ela pode ocorrer de modo paralelo à produção, influenciando muito pouco o “lead time”. Entretanto, essa atividade tem um impacto muito grande na integração, pois é nesse momento que se identificam as falhas da produção, as quais, em alguns casos, só podem ser resolvidas por meio de alterações no modelo do produto. Diante disso, surgem duas questões: essa atividade pode ser automatizada? E como fazer para que as alterações necessárias sejam propagadas à montante (setor de projetos) e à jusante (setor de produção)?

A automação dessa atividade é, na atualidade, relativamente elevada. Ela pode ser empregada na própria máquina-ferramenta ou pelo transporte da peça (geralmente utilizando um AGV¹²) até uma estação (MMC) de medição. Relatórios são gerados automaticamente, sem interferência humana, e alarmes podem ser gerados em casos de não conformidades.

Quando realizada na própria máquina-ferramenta, as dimensões não conformes são identificadas e, caso estejam correlacionadas com o desgaste das ferramentas, o programa CN

¹² AGV é um acrônimo para Automated Guided Vehicle (veículo auto guiado)

pode ser automaticamente atualizado, caracterizando-se assim um sistema de manufatura no nível A5, conforme ilustrado na Figura 8.

Entretanto, se houver necessidade de corrigir um valor de tolerância no modelo original, isto não será possível, pois a propagação para o setor de projetos só poderá ser feita de forma manual.

Q10. Na etapa nº 9, mais uma vez, observa-se uma violação da 1ª premissa da integração, causada pela presença de uma folha de processos em PDF. Além disso, o programa CN gerado pelo sistema CAM foi formatado para uma máquina que, supostamente, estaria disponível em uma data futura. Como resolver/minorar esses dois problemas?

A utilização da folha de processos em PDF, às vezes também impressa em papel, decorre de limitação de alguns sistemas CAM. De um modo geral, esses sistemas geram apenas o código CN, deixando os demais dados, tais como ferramentas, dispositivos de fixação e tempos operacionais disponíveis apenas para visualizações.

Isto implica em uma tarefa a mais para o usuário, qual seja: preparar, com auxílio de outro editor, uma folha de processos contendo as informações necessárias à preparação da máquina e acompanhamento dos tempos operacionais.

Atualmente, vários distribuidores de sistemas CAM oferecem, à vezes como um acessório, recursos para geração da folha de processos, também denominada por “setup sheet”.

O problema com essas folhas, não é a sua geração automática, mas sim a sua integração, pois ao converter uma informação interna para outro formato é, em essência, um impressão. Na atualidade, a folha de processos, seja ela em papel, PDF, MS-Excel, ou outro formato, não possibilita a propagação de alterações à montante.

Em relação à outra questão, “o buraco é mais embaixo”. Apesar da geração do código CN ser uma atividade completamente automatizada, o código gerado deve obedecer à sintaxe do comando utilizado na máquina-ferramenta. Como no mercado atual existe uma gama muito grande de CN’s, ocorre que para cada máquina diferente, faz-se necessária uma atividade extra conhecida como pós-processamento.

O pós-processamento tem como ponto de partida o código G formatado em conformidade com os padrões EIA RS274D ou ISO 6983. O que acontece na prática é que cada fabricante de comando numérico introduz, de forma independente, pequenas alterações no código G, produzindo-se assim uma sintaxe própria.

Diante disso, o usuário deve negociar com o seu provedor do sistema CAM o fornecimento dos pós-processadores necessários ao seu chão de fábrica. Conseqüentemente, com esse investimento extra, o seu problema de geração automática do código CN estará superado.

Entretanto, isso aumenta muito a entropia do fluxo de informação, pois em caso de mudança da máquina-ferramenta, um novo programa deverá ser gerado. Além disso, e mais importante, o

código CN não possibilita a propagação à montante de eventuais alterações sofridas durante a fase de preparação e ajustes da máquina. E, por incrível que pareça, a alteração de um único dígito no programa pode provocar uma mudança radical do produto de tal modo a não refletir mais o modelo CAD original.

Q11. Ainda na etapa nº 9, dois recursos de produção foram mencionados: dispositivo de fixação e ferramentas. De um modo geral, esses recursos são adquiridos de terceiros, portanto impactam muito no fluxo de materiais e informação. No tocante ao dispositivo de fixação, a situação é bem mais complexa, pois se for um dispositivo especial ele demandará um projeto e fabricação sob medida. Diante disso, o que pode ser feito para simplificar o fluxo de materiais e de informação?

Vamos começar com o problema mais difícil: o dispositivo de fixação.

Sempre que possível, utilize dispositivos universais!! Essa é uma regra básica no planejamento da usinagem. Entretanto, nem sempre se consegue aplicá-la. Não sendo possível, o dispositivo deve ser desenvolvido (projetado).

Do ponto de vista da produção, um bom dispositivo será aquele que acarretar no menor tempo de carga-descarga de peças. Do ponto de vista da qualidade, um bom dispositivo será aquele que prover a maior repetibilidade. Em alguns casos, esses dois objetivos se mostram antagônicos.

Além de atender aos objetivos mencionados anteriormente, o projeto de um dispositivo deve superar as seguintes restrições: localização e fixação. Do ponto de vista mecânico, isto exige tratativas diferentes.

O conceito de localização pode ser entendido como sendo a determinação da posição do componente a ser usinado, dentro do espaço definido pela máquina, de tal forma a restringir todos os seus graus de liberdade. Isto é, no processo de carga só deverá existir uma única posição para montagem do material bruto.

Após a localização da peça dentro da máquina, ela deverá ser fixada de tal forma que as tensões de origem termomecânica não impliquem em movimentos da peça e violem o seu estado de localização.

Isto posto dessa forma, aparentemente, parece fácil. Entretanto, peças com geometria muito complexa demandam muito tempo para o projeto e construção dos dispositivos de fixação. Um bom texto sobre esse assunto pode ser encontrado no livro “Materials and Manufacturing Processes” de autoria de P. Degarmo et al., em especial no capítulo “workholding devices”.

Nesse referido livro, os autores apresentam o conceito de dispositivos de fixação modulares “Modular Fixturing”. Esse tipo de dispositivo conduz a um processo de seleção, ao invés de um projeto em si, portanto encurtando o processo de produção do dispositivo.

A Figura 17 contém uma ilustração de um dispositivo modular com fixação hidráulica. Obviamente, as peças lá ilustradas diferem do componente P2018Z412F1, mas poderia ser uma boa alternativa para a XYZ.

O projeto/seleção automática de dispositivos de fixação é um problema que intriga a muito tempo a comunidade científica. A utilização de técnicas de inteligência artificial, tais como raciocínio baseado em casos; raciocínio baseado em regras; lógica nebulosa e redes neurais tem sido advogada em vários trabalhos científicos. De acordo com Hashemi et al. (2014) esse conjunto de técnicas associadas à modelagem por elementos finitos compõem uma disciplina denominada CAFD (do inglês *Computer Aided Fixture Design*).

Ainda segundo Hashemi et al. (2014), apesar dos grandes avanços já realizados, o projeto/seleção automática de dispositivos de fixação ainda permanece uma questão aberta para o planejamento de processos.

No tocante ao problema da seleção de ferramentas, pode-se dizer que estamos em um estágio bem avançado de automação. Alguns sistemas CAM já executam isso de forma automática, para casos simples de usinagem e considerando ferramentas padronizadas.

A palavra-chave para a seleção de ferramentas é padronização. Enquanto as operações de usinagem puderem ser executadas com ferramentas padronizadas, a seleção será facilitada. Em casos especiais, as ferramentas devem ser projetadas sob medida, tornando o problema tão complexo quanto o projeto dos dispositivos de fixação.

A utilização de técnicas de inteligência artificial tem sido empregadas largamente no desenvolvimento de sistemas especialistas para seleção de ferramentas. Uma boa parte desses sistemas é composta de bases de conhecimentos e uma máquina de inferência baseada em regras de produção (*production rules*), lógica nebulosa, raciocínio baseado em restrições, dentre outras. Alguns exemplos podem ser encontrados em Mookherjee e Bhattacharyya (2001) e Tan et al. (2012).



Figura 17 - dispositivo de fixação modular com acionamento hidráulico. Fonte: <http://pawsholding.com/>

Q12. A inspeção mencionada na etapa nº 10 é realmente necessária? Ela agrega valor ao P2018Z412F1?

A resposta aqui é bem direta: NÃO. A inspeção realizada na etapa nº 10 não agrega valor ao produto. Além de alongar o fluxo de materiais ela aumenta a entropia do fluxo de informação.

O que se recomenda em casos como esse é investir no desenvolvimento de fornecedores e transferir a eles a responsabilidade por fornecer produtos dentro das especificações acordadas.

Não obstante, deve ser entendido que um erro, por exemplo de composição química ou microestrutura, só poderá ser verificado durante o uso, o que implicará em prejuízos significativos para a XYZ.

Q13. A etapa nº 12 é crucial para a integração. Em caso de modificações, o que pode ser feito para propagá-las para as demais fases do ciclo de vida do P2018Z412?

Essa etapa é crucial porque, em caso de alterações elas devem ser processadas nesse momento. Provavelmente, uma reunião deve ser feita entre todos os setores envolvidos e, caso necessário, todos dos dados à montante serão atualizados.

O problema, e isto não é uma exclusividade da XYZ, é que não existe uma forma de fazer isto automaticamente. Mesmos os sistemas para PLM mencionados na questão 1 não dispõem desse recurso.

A título de ilustração, imagine a seguinte situação: o setor de montagem verifica que um dos componentes que foi adquirido de um fornecedor não monta com o P2018Z412F1. Com o intuito de não atrasar a entrega do lote piloto, é solicitado ao programador do centro de usinagem que altere a distância entre os centros dos furos de 10mm, tal como ilustrado na Figura 18. No programa original, gerado a partir do modelo concebido pelo setor de projetos, as distâncias entre centro são 95 e 45mm nos eixos X e Y, respectivamente.

A mudança no programa é muito sutil, apenas dois caracteres, conforme destaque em vermelho na Figura 18, mas é suficiente para provocar uma mudança significativa no P2018Z412F1. Se isto não for comunicado ao setor de projetos, ou ao fornecedor externo para que ajuste o seu componente, a produção estará comprometida na 13ª etapa.

De fato, as modificações que se fizerem necessárias nesta etapa e não forem propagadas às demais etapas do ciclo implicarão na violação da segunda premissa da integração.

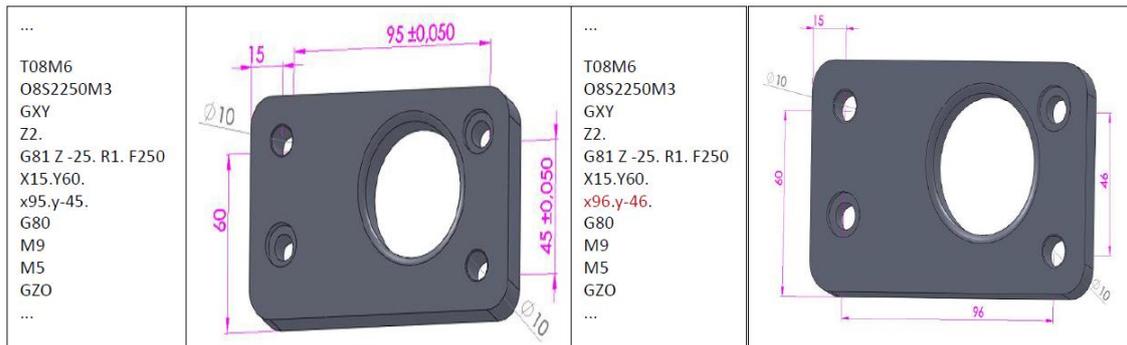


Figura 18 – Trecho do programa e desenho utilizado para a usinagem do P2018Z412F1. À esquerda: programa original. À direita: programa modificado.

Q14. Qual seria a melhor forma para a XYZ armazenar os dados referentes ao P2018Z412, tal como mencionado na etapa nº 13, de modo a torna-los úteis ao desenvolvimento de novos produtos?

A melhor resposta seria um sistema tipo PLM (Product Lifecycle Management) implementado com metodologia proposta pela norma ISO 10303. Entretanto, tal sistema não existe.

Em relação à referida norma, o que existe no mercado são os conversores para padrão o STEP (ISO 10303 AP203 ou AP214). O AP203 é dirigido aos produtos do setor aeroespacial, enquanto que o AP214 é voltado ao setor automotivo. Diversos softwares de CAD/CAM oferecem recursos para exportação/importação desses formatos.

Atualmente, o comitê técnico ISO/TC 184 e o subcomitê SC4 aprovaram, e já publicaram, o AP242, o qual mescla e expande o escopo dos AP's 203 e 214. Tendo como base o conjunto de AP's já publicados, pode-se dizer que a norma ISO 10303 provê as condições suficientes para modelagem do ciclo de vida do produto, vide por exemplo o escopo definido no AP239 (Product lifecycle support - PLCS).

Além disso, em 2007 o ISO/TC 184/SC4 aprovou e publicou o AP238, incorporando assim os avanços realizados por pesquisadores e empresas europeias voltados à programação de máquinas-ferramenta. Dessa forma, o AP238 ou STEP-NC, como também é conhecido, vai muito além da simples substituição da ISO 6983 (EIA RS274D) para a programação de máquinas. Ele consiste em um modelo baseado em programação orientada por objetos e incorpora os conceitos de features e operações (workingsteps) que refletem as necessidades atuais de uma usinagem em alto desempenho. Além disso, o AP238 possibilita a integração da máquina CNC com os demais sistemas utilizados nas demais fases do ciclo de vida, tais como o CAD e o CAM.

Apesar dos enormes esforços de pesquisadores e empresas do setor industrial, a utilização do STEP em sistemas comerciais ainda é extremamente tímido. Não obstante, espera-se que em futuro próximo as empresas possam fazer uso de um modelo aberto e suficiente para modelagem do ciclo de vida de seus produtos e negócios.

Como mencionado anteriormente, a única implementação disponível comercialmente é a conversão de modelos CAD proprietários para o AP203/AP214. A título de ilustração, a Figura 19 contém um trecho do arquivo no formato STEP do componente **P2018Z412F1**. Essa conversão foi realizado por meio do software CAD Solidworks.

Por meio das figuras 14 e 19, pode-se observar que o formato STEP resulta em um arquivo legível e neutro, isto é, ele não é propriedade de uma empresa específica. O aspecto atrativo disso é que, quando todas as atividades do ciclo de vida de um produto estiverem assim modeladas, qualquer agente do sistema produtivo poderá, a qualquer instante, recuperar e modificar, caso necessário e autorizado, os dados referentes ao produto modelado. Quando isso acontecer, todas as premissas da integração estarão atendidas.

```
ISO-10303-21;
HEADER;
FILE_DESCRIPTION (('STEP AP214'),
  '1');
FILE_NAME ('pc_fig9.STEP',
  '2018-09-08T20:15:47',
  (''),
  (''),
  'SwSTEP 2.0',
  'SolidWorks 2010',
  '');
FILE_SCHEMA (('AUTOMOTIVE_DESIGN'));
ENDSEC;

DATA;
#1 = CIRCLE ('NONE', #374, 22.94538588100769500 );
#2 = CYLINDRICAL_SURFACE ('NONE', #360, 7.4999999999999992900 );
#3 = FACE_BOUND ('NONE', #1005, .T.);
#4 = FACE_BOUND ('NONE', #1019, .T.);
#5 = CYLINDRICAL_SURFACE ('NONE', #357, 22.94538588100769500 );
#6 = CONICAL_SURFACE ('NONE', #343, 4.9999999999999990200, 0.7853981633974482800 );
#7 = FACE_OUTER_BOUND ('NONE', #90, .T.);
#8 = CYLINDRICAL_SURFACE ('NONE', #338, 4.9999999999999990200 );
#9 = FACE_OUTER_BOUND ('NONE', #11, .T.);
#10 = FACE_BOUND ('NONE', #48, .T.);
#11 = EDGE_LOOP ('NONE', (#1169, #1165, #1164, #1163));
#12 = FACE_OUTER_BOUND ('NONE', #1047, .T.);
#13 = ORIENTED_EDGE ('NONE', *, *, #314, .F.);
#14 = ORIENTED_EDGE ('NONE', *, *, #311, .T.);
#15 = EDGE_LOOP ('NONE', (#1146, #1079));
#16 = FACE_OUTER_BOUND ('NONE', #1001, .T.);
#17 = CONICAL_SURFACE ('NONE', #359, 24.94538588100768500, 0.7853981633974447300 );
#18 = FACE_OUTER_BOUND ('NONE', #1090, .T.);
#19 = CYLINDRICAL_SURFACE ('NONE', #346, 10.0000000000000000000 );
```

Figura 19 - fragmento do arquivo STEP referente ao componente **P2018Z412F1**.

Q15. Dados. Isso resume a etapa 14. São muitas as questões aqui. Por exemplo: Como obtê-los, como registrá-los e torna-los úteis (informação)? Como converter essa informação em diagnóstico do comportamento da produção? Como tornar essa informação em conhecimento e aprender sobre o processo de usinagem?

Nessa etapa, o processo de usinagem do **P2018Z412F1** está consolidado e o setor de produção deve apenas programar a frequência e o tamanho dos lotes a serem fabricados e, posteriormente, encaminhando-os ao setor de montagem.

Ao se afirmar que a máquina-ferramenta da XYZ dispõe de sensores para o monitoramento do consumo de energia, da vida das ferramentas, das dimensões críticas da peça e do seu estado



de manutenção, pode-se dizer que essa máquina, de fato, atende aos requisitos da indústria 4.0.

A questão aqui é saber se esses dados são internos à máquina ou se podem ser externados? Vamos por partes...

Sobre o monitoramento da energia consumida.

Há mais de uma década que alguns fabricantes de máquinas-ferramenta CNC fornecem uma interface para apresentação de dados referentes ao consumo/carga durante a energia. Entretanto, essa interface é apenas dirigida ao operador da máquina e tem o propósito de alertá-lo sobre um consumo excessivo. Baseando-se no escopo da indústria 4.0, a máquina deveria externar, via internet, os dados referentes ao consumo de energia.

É razoável supor que as máquinas que estão sendo projetadas/produzidas a partir de agora já sejam entregues com esse recurso. Não existe aqui nenhuma barreira tecnológica a ser vencida para que isso possa acontecer.

Dados sobre o consumo de energia são importantes tanto para a avaliação da eficiência energética do processo quanto para acompanhamento da produção. Um MES (do inglês Manufacturing Execution System) poderia ser alimentado com tais dados para gerar informações sobre paradas de máquinas, peças produzidas etc...

Sobre o monitoramento da vida¹³ das ferramentas:

Ao contrário do consumo de energia, a determinação do fim de vida da ferramenta não é uma tarefa trivial. Monitorar as ferramentas vai além da questão econômica (consumo); uma ferramenta deteriorada pode implicar em perda da peça e, eventualmente, até causar danos à máquina.

Se considerarmos que a vida deve ser monitorada em tempo real, atualmente existem três métodos que possibilitam isso¹⁴: medição da potência elétrica ativa; análise de vibrações e análise de emissão acústica.

Nos três métodos, temos que considerar o uso de sistemas baseados em microprocessadores, pois seria inviável a exportação via IP de dados brutos para serem processados por um sistema de análise localizado em outro lugar.

Entretanto, o estado atual do desenvolvimento dessas tecnologias ainda indica uma certa cautela sobre quando isso poderá, de fato, estar embarcado em uma máquina-ferramenta.

¹³ Vida da ferramenta é o tempo que ela trabalha efetivamente (deduzido os tempos passivos) até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingido esse tempo, a ferramenta deve ser reafiada ou substituída

¹⁴ Existem também métodos baseados em análise de imagens e que são razoavelmente eficientes na detecção de quebra de ferramentas, porém ineficazes para monitoramento do desgaste.

Uma boa referência sobre o assunto pode ser encontrada em Teti (2010) e mais recente, já com o contexto da indústria 4.0, em Caggiano et al. (2016).

Sobre a inspeção da peça em processo

Nos quesitos controle de velocidade e posição, uma máquina de medir por coordenadas (MMC) utiliza os mesmos recursos existentes em uma máquina-ferramenta, ou seja, a tecnologia CNC. Por conseguinte, não é de se estranhar que apenas pela simples troca de uma ferramenta por um apalpador, pode se efetuar a medição das peças. Isto já é utilizado há muito tempo e basta instalar um apalpador e integrá-lo ao comando.

Entretanto, existem três problemas com essa abordagem. O primeiro está relacionado com os aspectos produtividade. Para se efetuar esse tipo de medição, as operações de usinagem devem ser suspensas, isto é, deixa de se produzir. O segundo problema decorre da dilatação térmica da peça. Por último, mas não menos importante, existe o problema da calibração (trajetória e posicionamento) do apalpador.

Não obstante, várias pesquisas vem sendo efetuadas nessa área, a qual é denominada por medição em usinagem ou OMM (do inglês On-Machine Measurement). Uma revisão sobre esse assunto pode ser encontrada em Mutilba et al. (2017).

Sobre o monitoramento do estado de manutenção da máquina-ferramenta

Basicamente, uma máquina-ferramenta é composta por uma estrutura mecânica (base, guias fusos, eixos, mancais, unidades de hidráulicas e de ar comprimido, etc.); uma unidade de potência (motores e acionamentos); uma unidade de controle auxiliar (CLP – Controlador Lógico Programável) e o CNC (Comando Numérico Computadorizado). A Figura 20 contém uma esquematização das principais interfaces entre o CNC, as unidades de potência e o CLP.

O CLP executa um papel periférico, no que diz respeito à usinagem em si, mas que é muito importante no tocante à segurança operacional e estado de manutenção da máquina. A falta de lubrificantes, baixa pressão pneumática/hidráulica, aumento de temperatura e sobrecargas elétricas são exemplos do monitoramento e atuação exercidos pelo CLP.

Entretanto, poucas são as máquinas que oferecem condições para externar esses dados. Máquinas com interfaces LAM (Local Internet) ainda são novidades no chão de fábrica de boa parte das empresas. Além disso, esses dados refletem uma condição passada: **“ocorreu uma sobrecarga no servomotor M1”**.

O que é desejado aqui é uma manutenção preditiva que seja capaz de se adiantar às possíveis falhas e gerar dados para a programação das manutenções corretivas.

No que diz respeito aos sensores, pode-se utilizar aqueles recomendados para o monitoramento da vida das ferramentas, isto é: wattímetros e acelerômetros. Acrescenta-se ainda os sensores de temperatura. Os dados analógicos produzidos por esses sensores devem

ser digitalizados por meio de conversores A/D (Analogico/Digital), microprocessados e analisados em conjunto para tomada de decisão e/ou geração de relatórios.

Uma abordagem sobre esse assunto no contexto da Indústria 4.0 pode ser encontrada em Mourtzis et al. (2016).

Após essa discussão, devemos reavaliar se a etapa nº14 é uma realidade, ou algo a ser esperado pela XYZ. De fato, baseando-se no estágio atual do parque de máquinas-ferramenta, podemos afirmar que a XYZ ainda está longe daquilo que Liu e Xu (2017) propuseram como sendo um CPMT (do inglês Cyber-Physical Machine Tool).

Segundo esses autores, o CPMT é uma máquina-ferramenta 4.0, a qual compreende a integração da máquina em si com o processo de usinagem, computação e redes. Nesse tipo de máquina, os computadores embarcados podem monitorar e controlar o processo em um tipo de “malha fechada” na qual a usinagem pode afetar a computação e vice-versa.

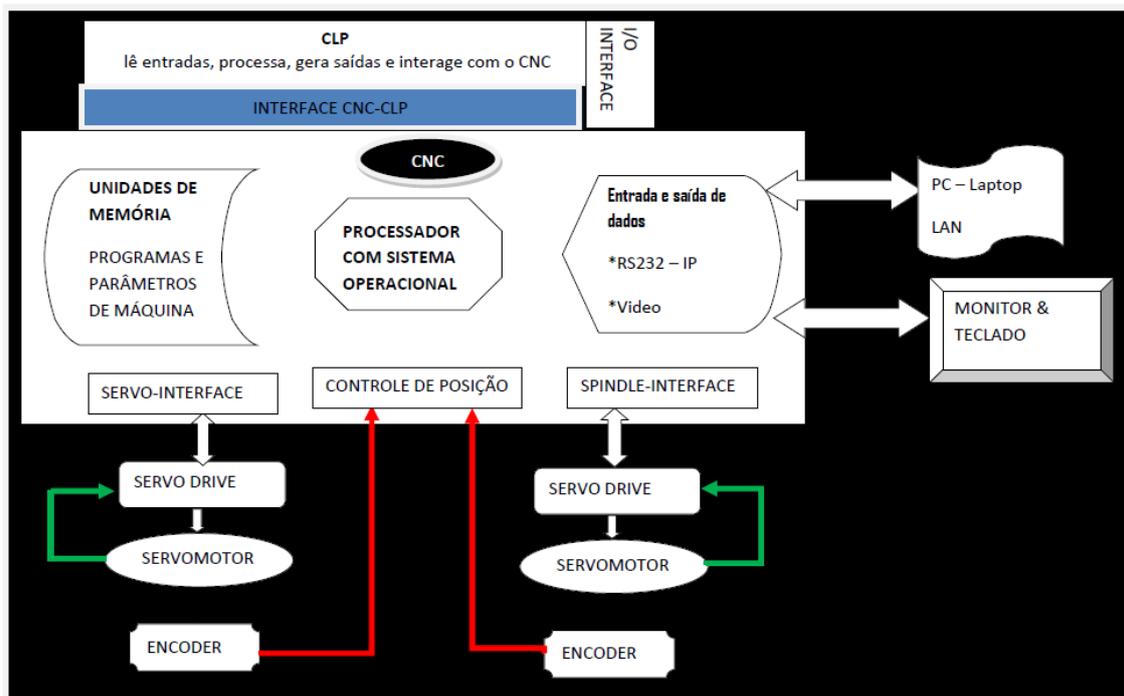


Figura 20 - Diagrama de blocos de uma máquina CNC – Adaptado de Chatterjee (2016) – disponível em: <http://pchats.tripod.com/pc.pdf>

Em todo esse cenário descrito anteriormente, no qual a palavra **dados** é mais do que protagonista, não podemos nos esquecer que, para transformá-los em informação e conhecimento, temos que processá-los.

De um modo geral, o processamento de dados oriundos de transdutores de corrente/tensão, acelerômetros, termopares, e imagens não é uma tarefa trivial. Antes de torna-los digitais,



deve-se filtrá-los para eliminar os ruídos que certamente são aleatórios e presentes em ambientes industriais.

Além disso, faz-se necessário, após a sua digitalização, separar as regiões de interesse, por exemplo dados oriundos durante o regime de corte daqueles oriundos do regime em vazio. Posteriormente, esses dados separados devem ser ajustados por um modelo matemático.

Somente após a realização dessas etapas é que teremos condições de analisá-los para extrairmos a informação esperada. Atualmente, ferramentas de análise baseadas em técnicas de inteligência artificial e programação inteira e seus métodos complementares vem sendo largamente empregados nessa tarefa.

Além da informação necessária à tomada de decisão e à rastreabilidade podemos derivar novos conhecimentos a partir dos dados coletados e, por exemplo, alterar os algoritmos utilizados nas fases de planejamento e projeto.

A geração de conhecimentos, a capacidade de dar explicações e a alteração de algoritmos requer métodos de programação bem avançados. Redes neurais, logica nebulosa e raciocínio qualitativo são exemplos de que a inteligência artificial está, de fato, chegando ao chão de fábrica.

Q16. A última etapa indica o crepúsculo do P2018Z412. Ele já entrou em obsolescência e apenas componentes para reposição devem ser produzidos. Com o passar do tempo essa demanda deve tender a zero. No caso específico do P2018Z412F1, valeria a pena manter a sua fabricação por fundição/usinagem?

No estágio indicado pela etapa nº 15, a XYZ deverá fabricar para o mercado de reposição. Sabendo-se que esse mercado demandará um número cada vez menor de produtos, pode ser que os processos planejados anteriormente se tornem antieconômicos.

No caso em particular do P2018Z412F1, o qual demanda os processos de fundição sob medida e usinagem, com certeza haverá um aumento de custo.

Uma solução poderia ser a aquisição de barras fundidas, ao invés da fundição sob medida, e a utilização de dispositivos universais como, por exemplo, uma morsa, pois não haveria necessidade de se manter o dispositivo modular utilizado originalmente.

Outra alternativa, embora bem mais ousada, seria a XYZ investir em processos de manufatura híbrida, com o intuito de recuperar, não apenas o P2018Z412F1, mas todos aqueles componentes/produtos demandados em menor escala pelo mercado de reposição.

A manufatura híbrida que combina a fabricação por adição e a usinagem é, relativamente, uma proposta nova, porém os fabricantes tradicionais de máquinas-ferramenta já estão ofertando ao mercado esse tipo de tecnologia. Ao leitor mais interessado nesse assunto, vale a pena procurar mais informações diretamente nos sites dos fabricantes, como o exemplo, a DMG

Mori em <https://nl.dmgmori.com/products/machines/advanced-technology/additive-manufacturing/powder-nozzle/lasertec-65-3d-hybrid>. No mercado brasileiro, a Romi (<http://www.romi.com/>) também oferta um equipamento similar.

Na literatura especializada existem bons artigos sobre o assunto, como por exemplo: Flynn et al. (2016) e Lorenz et al. (2015).

Apesar dos problemas ainda a serem resolvidos, pois a manufatura híbrida ainda possui limitações, esse tipo de tecnologia já apresenta os seguintes atrativos:

- i) O fluxo de materiais é simplificado, pois o material bruto estará na forma de pós ou arames, portanto não exigindo pré-processamentos, como por exemplo a fundição sob medida;
- ii) Eliminação de problemas típicos da usinagem, tais como o design de dispositivos e ferramentas especiais. Além de simplificar o fluxo de materiais, isto também simplifica o fluxo de informação; e
- iii) Não haverá necessidade de se efetuar, por meio de sistemas intermediários, as etapas clássicas, por exemplo aquelas necessárias à usinagem e à conformação, tais como o planejamento de processos e as simulações de trajetórias. A informação poderá ser enviada diretamente do sistema CAD.

Devido ao seu elevado grau de automação, esse tipo de processo poderá ser facilmente integrado às demais fases do ciclo de vida do produto, tais como o projeto e a montagem. Abusando um pouco da linguagem, podemos dizer que trata-se de um “processo atômico”, isto é, ele não necessita ser mais dividido, nem quanto à informação nem quanto à movimentação de materiais. Em outras palavras: ele deixa de ser um processo e passa a ser uma operação.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Ao longo desta apostila discutimos vários conceitos e ideias básicas que nos auxiliaram a entender melhor o que está vindo nessa nova onda denominada de **Indústria 4.0**, a qual tem como um de seus pilares a **manufatura inteligente**.

Pudemos entender que o fluxo de materiais aumentou em complexidade e velocidade ao longo da história dos sistemas produtivos. Observamos que a sua dependência em relação ao ser humano vem diminuindo progressivamente em decorrência da utilização de novas fontes de energia, associada à invenção de dispositivos mecânicos, elétricos, eletrônicos e digitais. Nos dias atuais, podemos afirmar que o fluxo de materiais está, praticamente, automatizado; e que ele pode acontecer com baixa, ou nenhuma, interferência humana.



Por outro lado, o fluxo de informação teve sua complexidade e volume significativamente aumentados. Iniciando como uma coisa praticamente intangível, algo que só ocorria na mente do artesão, ele ganhou em formalismo e detalhamento com a divisão do trabalho proposta pela administração científica, aumentou em entropia com a “Torre de Babel” erguida pela digitalização e, pelo que tudo indica, tende a aumentar em volume, pois está saindo dos muros do sistema de manufatura e movendo-se em direção às “nuvens”.

Entendemos também que os pilares da manufatura inteligente são a automação e a integração de dados, pois são condições necessárias para que as empresas se mantenham competitivas dentro dos seus nichos de mercado.

Para que a plena integração de dados possa acontecer, faz-se necessário o investimento em modelos de longo alcance (todo o ciclo de vida) e, mais importante, neutros, para que diferentes sistemas de manufatura possam interagir entre si e com seus clientes/fornecedores em uma mesma linguagem.

Nesse sentido, registramos que já existe um grande esforço por parte de uma comunidade internacional, composta por universidades e empresas, para desenvolver esse modelo para troca de dados, ao qual é recomendado pela norma ISO 10303 e também conhecido por STEP (STandard for the Exchange of Product model data).

Ao final da segunda parte, foi comentado que a simplificação dos processos produtivos é uma outra via para a simplificação de ambos os fluxos, mas mais importante para o fluxo de informação.

Como proposta de simplificação de processos foi apresentada a manufatura híbrida, a qual, apesar de ainda estar no seu alvorecer, tem tudo para suportar aquilo que denominamos por “processo atômico”.

Nesse sentido, um “processo atômico” significa um processo que não demanda mais divisões, pois trata-se de algo autônomo, exigindo como entrada apenas o material bruto, fornecido em uma forma genérica (pós ou fios); o modelo do produto e a energia para movimentação e transformação.

Esse tipo de processo não demanda microplanejamento (detalhamento de operações) não demanda inspeções, pois poderá fazê-la em modo simultâneo com a transformação. Obviamente ele demandará manutenções, mas será capaz de apresentar diagnósticos do seu estado de conservação e programar suas paradas necessárias.

Obviamente que, apenas pela utilização de manufatura híbrida, não será possível alcançar isto, tendo em vista o grande volume de produção nos diferentes sistemas de manufatura ao redor do mundo.

Não obstante, o sistema de manufatura que pretende se manter vivo nesse novo modelo competitivo, já indicado pela Indústria 4.0, terá que investir fortemente em simplificação.



Pós-Graduação Lato Sensu Engenharia Industrial 4.0

Manufatura Inteligente – Prof. Dalberto Dias da Costa



Antes de “descarregar dados em uma nuvem”, mantenha os pés no chão e simplifique. Simplifique seus leiautes, selecione e desenvolva melhor os seus fornecedores, invista na atualização do seu parque de máquinas e ferramentas. Essa atualização não necessariamente significa adquirir novas máquinas e ferramentas com conexão IP, mas também passa pelo retrofitting (reforma + modernização) e, muito importante, simplifique os seus projetos.

Simplificar projetos implica em simplificar todo o ciclo de vida do produto!

Atividade II

Esta atividade está relacionada com a elaboração dos fluxos de materiais e informação realizada na atividade I. Nesta atividade teremos como desafio gerar um programa CN para a usinagem da peça mostrada na **Figura 7**. Ao fazer isso, iremos sedimentar melhor o conceito de complexidade (no sentido de refinamento) inerente ao fluxo de informação em um processo de usinagem. O programa CN deve ser escrito em conformidade com o padrão EIA 274D (ISO 6983), mas que possa ser executado em um torno Mazak equipado com comando Mazatrol Matrix. Os dados necessários à programação estão Figura 21 e as notas de aula, necessárias à elaboração do programa, podem ser consultadas em http://www.labusig.ufpr.br/cnc/Aula_tornoCNC.pdf.

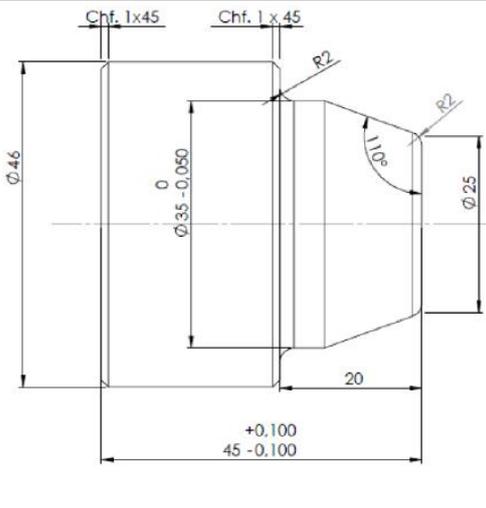
		
<p>Modelo da peça a ser usinada</p>	<p>Ferramenta</p>	<p>Material bruto: tarugo (φ52 x 48) em polietileno ou polipropileno</p>

Figura 21 - Dados para a usinagem no torno Mazak – QTN100



Bibliografia

- Alting, L. e Zhang, H-C. "Computer-Aided Process Planning: the State-of-the-art survey." *Int. J. Prod. Res.*, v. 27, nº 4, p. 553-585, 1989
- Bikas H, Stavropoulos P, Chryssolouris G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *Int J Adv Manuf Tech.* 2015. DOI: 10.1007/s00170-015-7576-2.
- Boden, M. A. (1998). Creativity and artificial intelligence. *Artificial Intelligence*, 103(1 998), 347–356
- Boothroyd, G. Dewhurst, P. e Knight, W. (1994) " Product Design for Manufacture and Assembly ". CRC Press.
- Caggiano, A. Segreto, T. e Teti, R. "Cloud manufacturing frame-work for smart manufacturing of machining," *Procedia CIRP*, Vol.55, pp. 248-253, 2016.
- Chatterjee, P. "An overview of Computerized Numerical Control (CNC) and Programmable Logic Control (PLC) in machine automation", *Engine Division Maintenance TELCO*, 2016.
- Darlington, M.J. and Culley, S.J. (2002). Current Research in the Engineering Design Requirement, In: *Proceedings of IMechE, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 216(3): 375–388.
- DeGarmo, P. E. et al. *Materials and Processes in Manufacturing*. Prentice-Hall. 1997
- Flynn, J. M., Shokrani Chaharsooghi, A., Newman, S. T. and Dhokia, V. (2016) Hybrid additive and subtractive machine tools research and industrial developments. *International Journal of Manufacturing Technology and Management (IJMTM)*, 101. pp. 79-101. ISSN 1368-2148
- Goel A, Craw S. Design, innovation and case-based reasoning. *Knowledge Engineering Review* 2005;20 (3):271–6.
- Gordon, R. B. 1988. Who turned the mechanical ideal into mechanical reality? *Technology and Culture*, 29: 744–78
- Hashemi, H. et al. (2014), "Fixture Design Automation and Optimization Techniques: Review and Future Trends", *International Journal of Engineering*, Vol. 27, No.11.
- K. A. Lorenz, J. B. Jones, D. I. Wimpenny, and M. R. Jackson, "A Review of Hybrid Manufacturing," in *Solid Freeform Fabrication Conference Proceedings*, 2015, vol. 53.



K. Saridakis, A. Dentsoras, Soft computing in engineering design - a review, *Advanced Engineering Informatics* 22 (2) (2008) 202 – 221, network methods in engineering. doi:10.1016/j.aei.2007.10.001.

Kumar, S.L. State of the Art-Intense Review on Artificial Intelligence Systems Application in Process Planning and Manufacturing. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2017, 65, 294–329.

Liu C, Xu X. Cyber-physical machine tool – the era of machine tool 4.0. *Procedia CIRP* 2017;63:70–5

Mourtzis D, Vlachou E, Milas N, Xanthopoulos N. A cloud-based approach for maintenance of machine tools and equipment based on shop-floor monitoring, *Procedia CIRP*; pp. 655-660

Mutilba, U.; Gomez-Acedo, E.; Kortaberria, G.; Olarra, A.; Yagüe-Fabra, J.A. Traceability of On-Machine Tool Measurement: A Review. *Sensors* 2017, 17, 1605.

Newell, A. e SIMON, H. *Human Problem Solving*. New York, 1972, Prentice Hall

Papaioannou, G. and Wilson, J.M., 2010. The evolution of cell formation problem methodologies based on recent studies (1997-2008): review and directions for future research. *European Journal of Operational Research*, 206 (3), pp. 509 - 521.

Paxton, J. Mr. Taylor, Mr. Ford, and the Advent of High-Volume Mass Production: 1900-1912. *Economics & Business Journal: Inquiries & Perspectives*. Volume 4 Number 1 October 2012

Pratt, M. J., 2001, "Introduction to ISO 10303—the STEP Standard for Product Data Exchange," *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, pp. 102–103

R. Mookherjee and B. Bhattacharyya, Development of an expert system for turning and rotating tool selection in a dynamic environment, *Journals of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 306-311, 2001.

Romero Bejarano, J. C., Coudert, T., Vareilles, E., Geneste, L., Aldanondo, M. and Abeille, J. (2014) 'Case-based reasoning and system design: An integrated approach based on ontology and preference modeling, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 28(1), 49-69.

S. M. Ratchev, K. S. Pawar, E. Urwin, D. Mueller, "Knowledge-enriched requirement specification for one-of-a-kind complex systems", *Concurrent Engineering: R&A*, vol. 13, no. 3, pp. 171-183, 2005.

S.C.J. Lim, Y. Liu, Y. Chen, *Ontology in design engineering: status and challenges*, pp. 1-10, 2015.

Sankai Y: HAL: Hybrid Assistive Limb based on Cybernetics. In *Robotics research*. Springer tracts in advanced robotics. vol. 66. Edited by: Kaneko M, Nakamura Y. Berlin: Springer; 2011



Stuedel, H. J. Computer-Aided Process Planning: Past, Present and Future. *Int. J. Prod. Res.*, v. 22, nº 2, p. 253-266, 1984

Taylor, F. W. *The Principles of Scientific Management*. New York: Harper, 1911 .

Tan, C.F.; Kher, V.K. ; Ismail, N., 2012. —An expert carbide cutting tools selection system for CNC lathe machine . *International Review of Mechanical Engineering*, 6 (7), pp. 1402-1405

Teti R, Jemielniak K, O'Donnell G, Dornfeld D (2010) Advanced monitoring of machining operations. *CIRP Annals —Manuf Technol*59:717–739

Thomas D.S., Gilbert, S.W., 2014, *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing; A Literature Review and Discussion*. NIST Special Publication 1176

VALLE, P. D.; MARCONDES, P. V. P.; da Costa, Dalberto ; AMORIM, F. L. . Experimental investigations on the incremental sheet forming of commercial steel ASTM A653 CS-A G90 to predict maximum bending effort. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 40, p. 1, 2018

VALLE, P. D. *Investigação Téorico-Experimental dos Esforços de Conformação Mecânica na Estampagem Incremental Assimétrica*. Curitiba: Tesede Doutorado, 2016.

Volpato, N. et. al. *Prototipagem Rápida: tecnologias e aplicações*. São Paulo: Edgard Blücher, 2007

Wiesner, S., Nilsson, S. and Thoben, K.-D. (2017), “Integrating requirements engineering for different domains in system development – lessons learnt from industrial SME cases”, *Procedia CIRP*, Vol. 64, pp. 351-356. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.013>

Younging, G. Origin of Numerical Control. *IEEE Industrial Applications Magazine*. 2008. 4(5), 10–12. doi:10.1109/MIAS.2008.927525