

Geração de Seqüências Viáveis para Montagem Automatizada

Gilcina Guimarães

P.O Boaventura Netto

Ricardo M. Naveiro

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Campus - Rua S. Francisco Xavier, 524, RJ

COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro
Cidade Universitária - Ilha do Fundão -B1.F

Palavras chave: Pesquisa Operacional, Montagem Automatizada, Teoria dos Grafos.

Keywords: Operations Research, Automatic Assembly, Graph Theory.

RESUMO

Este trabalho consiste numa aplicação das técnicas de modelagem por grafos à geração de seqüências de montagem de um produto discreto (composto de uma série de peças). Utilizamos como referência para o trabalho método desenvolvido por A. Bourjault [5] e T. Fazio e D. Whitney [6].

ABSTRACT

This work is an application of graph modelling techniques for assembly sequence generation of a discrete product. We used as reference for the work the method developed by A. Bourjault [5] with the simplifications proposed by T. Fazio and D. Whitney [6].

Introdução

O processo de transformação de matéria-prima em produtos industrializados é denominado processo de produção ou de fabricação. Dentre as várias fases de um processo de fabricação destaca-se, por sua importância, a da montagem, que é a operação de unir peças fixando-as através de técnicas específicas, com a utilização de elementos de ligação tais como: porcas, parafusos, pinos, rebites e similares, ou por meio de soldagem, colagem, formas de montagem prensada, encaixe simples ou baseado na dilatação térmica.

A importância dos processos de montagem fica caracterizada pelo fato de que esta representa 53% do tempo total do processo de fabricação. A mão-de-obra direta envolvida em montagem em alguns tipos de produção em linha dá uma idéia da dimensão do problema (NEVINS E WHITNEY (1978) [1]):

maquinaria agrícola.....	30.2%
veículos	33.5%
máquinas ferramenta	11.0%
rádio e televisão	23.9%

A montagem de um produto é, então, o conjunto de ações desenvolvidas para a obtenção de um produto composto. Estas ações obedecem a uma ordem de execução denominada seqüência de montagem. As sucessivas configurações assumidas pelo produto durante o processo de montagem são ditadas pela seqüência escolhida para realização da composição do produto.

Um produto discreto (composto de várias peças) admite, habitualmente, diferentes or-

dens de montagem. A cada ordem de montagem que permite a composição final correta do produto chamaremos seqüência válida (ou possível) de montagem.

Tradicionalmente vem sendo destinado ao homem o trabalho de montagem que, por sua complexidade e manipulação detalhada, não pode ser ainda executado por um substituto adequado. Por outro lado, sendo as tarefas de montagem essencialmente repetitivas e, por conseqüência maçantes, com facilidade elas provocam fadiga e apresentam baixa confiabilidade. Nos países desenvolvidos, onde a mão-de-obra desqualificada é escassa e em processo de qualificação, a demanda por automação das operações vem aumentando (Ricardo M. Naveiro, 1987) [2].

Para os grandes lotes de produção (acima de 1 milhão de peças por ano) normalmente se adota a automação rígida da montagem, onde máquinas especializadas executam as operações de movimentação, posicionamento e união propriamente dita. Para lotes de produção anuais considerados médios (300.000 a 1.000.000 de peças por ano), a solução passa a ser a automação flexível, utilizando-se manipulador programável (“robot”) para execução das operações de montagem. O uso de manipuladores programáveis pressupõe a existência de duas condições básicas:

a) Compatibilidade física entre manipulador e componentes a serem montados. Esta compatibilidade é alcançada com o uso adequado de pinças e outros dispositivos acoplados ao manipulador.

b) Prévio conhecimento das seqüências possíveis de montagem.

É de se esperar que, com este conhecimento, se efetuem simulações das diversas opções

de seqüência de montagem e das respectivas trajetórias do manipulador.

Esta tendência da automação de processos de montagem beneficia a produção na medida em que reduz os custos, uniformiza os produtos, aumenta a eficiência, elimina os riscos, facilita a inspeção e melhora a qualidade. Ela também influencia diretamente a elevação do padrão de vida da região, quando abre caminho para melhores salários, barateia produtos de boa qualidade, reduz a jornada de trabalho, possibilita aumento da segurança do trabalho e propicia inúmeras outras facilidades.

A implantação de um sistema automatizado requer em geral investimento elevado; para minimizar riscos, é desejável que a automação seja planejada e instalada criteriosamente para que se alcancem os benefícios máximos que poderão advir da sua implantação, tanto para a empresa como para a sociedade (HITOMI K. (4979) [3]).

Ganha assim importância fundamental o conhecimento das seqüências viáveis de montagem, dado o fato de o número de seqüências ser extremamente grande mesmo para quantidade pequena de peças, crescendo exponencialmente com o seu aumento. Diante dos vários problemas que se defronta quando da concepção de um sistema de montagem, os estudos nessa área são bastante numerosos, entre os quais podemos citar um dos mais recentes, cuja abordagem é baseada na teoria dos grafos: *And/Or Graph Representation of Assembly Plans* (Luiz S. Homem de Mello e Arthur C. Sanderson (1990) [4]).

Nosso trabalho procura estabelecer a ordem de operações de montagem baseada na estrutura do produto, numa tentativa de criar métodos que viabilizem a transição da produ-

ção tradicional (manual integral ou manual assistido) para a produção automatizada.

A Técnica Utilizada

O processo aqui apresentado baseia-se no método de BOURJAULT A. (1984) [5] que estabeleceu um modelo matemático para o cálculo de seqüências de montagem. Acopladas a tal método estão utilizadas também as simplificações propostas por FAZIO e WHITNEY (1986) [6], que nos propiciaram a criação de um algoritmo para o cálculo de seqüências de montagem válidas com número maior de peças. Neste trabalho, o objetivo principal é o cálculo das seqüências válidas de montagem, cujo conhecimento permite a escolha da melhor seqüência para utilização num sistema semi-automático ou automático flexível de montagem que envolveria as seguintes etapas de estudo:

- a) Análise das seqüências obtidas. Refere-se à análise relativa ao tipo de técnicas necessárias, para a execução das ligações apresentadas nas seqüências, as condições das ligações obtidas (se são estáveis, passíveis, de deformação, fácil execução etc.) ou outras situações que o engenheiro de produção considere necessárias para uma perfeita montagem;
- b) redução pelo aumento de restrições: procura-se eliminar as seqüências que não atendam ao critério de eficiência desejado, como por exemplo as ligações instáveis passíveis de deformação, ou aquelas que sejam de difícil execução face a posicionamentos inadequados, falta de equipamentos e outros fatores.

Para a escolha da seqüência ótima, devemos ter em conta que o conceito de ótimo

varia de empresa para empresa de acordo com o objetivo de cada uma que pode ser o caminho de menor custo, uma melhor qualidade do produto, um menor tempo de execução ou diversos outros critérios ditados pela disponibilidade e pelos objetivos existentes em cada indústria.

No trabalho por nós desenvolvido, o cálculo de seqüências válidas pode ser utilizado para qualquer produto e tipo de montagem que não envolva submontagens isoladas. O nosso objetivo maior é, porém, sua aplicação em montagem semi-automática ou automática flexível. O modelo desenvolvido para determinação de seqüências de montagem é baseado na teoria dos grafos. A nomenclatura utilizada neste artigo é encontrada em Harary, (1972) [7] e Guimarães, G (1989) [8], P.O. Boaventura (1979) [9].

Elementos e Definições Necessárias

O pré-produto é representado por um 1-grafo $G(X,L)$, não orientado, com n vértices (representado as n peças) e l arestas (ligações entre as peças). O grafo G é **rotulado** (seus vértices são identificados) e a identificação dos vértices é feita pelo nome ou código da peça. G é conexo e as cadeias existentes neste grafo caracterizam as seqüências de ligações existentes entre as diversas peças, algumas das quais podem ser associadas a seqüências de montagem.

A transição de uma etapa de montagem para outra é representada por uma operação de compactação de G , até que ele se reduza a um grafo trivial com único vértice correspondente ao produto acabado. Durante estas operações, as arestas superpostas representam

ligações que serão executadas simultaneamente, o que só aparecerá se o grafo G tiver ciclos. Caso contrário, em cada etapa será executada uma e só uma ligação.

Cada seqüência de montagem gerada pelo algoritmo é uma solução do problema, representada por uma árvore orientada, no sentido da ligação inicial (raiz) para a ligação final (folhas). Outras soluções podem ser obtidas dela através de desmontagens, a serem executadas retirando-se as últimas peças que foram colocadas na montagem. Retirar peças de uma montagem equivale a desdobrar vértices reunidos pela operação de compactação desfazendo ligações realizadas, isto é, introduzindo a aresta correspondente a esta ligação, até o ponto em que uma ligação passível de realização não foi utilizada para gerar seqüência. A partir desta ligação, geram-se outras soluções.

O conjunto de soluções é dado por uma floresta onde as raízes (ligações iniciais possíveis) formam uma base.

Métodos de Bourjault e Fazio - Whitney

O método de Bourjault tem o mérito de formular a idéia principal da modelagem, baseada na representação do produto por um grafo e em um questionário dirigido a cada ligação, sobre a possibilidade de sua realização em determinado estágio. O conjunto de perguntas formuladas permite a obtenção dos estados impedidos da seqüência de montagem, o que torna viável a composição dos estados iniciais possíveis. Ocorre, porém, que a técnica de busca dos estados impedidos é longa e de difícil utilização. A partir da primeira etapa, o processo se torna de aplicação difícil porque exige um grande número de

perguntas a serem formuladas, variando de acordo com o conjunto a ser montado. A busca das cadeias e das relações para produtos com um grande número de ligações é impraticável.

O método de Fazio e Whitney é desenvolvido com a utilização inicial das técnicas de Bourjault. Todavia, no estágio das perguntas apresenta um questionário com um número menor de perguntas, as quais são mais abrangentes e envolvem toda a montagem, o que permite a sua utilização para um produto com um maior número de peças. Enquanto Bourjault objetiva a confecção dos estados iniciais possíveis, Fazio e Whitney visam a confecção da lista de precedências. Ambas contêm o mesmo tipo de informações, porém a elaboração desta última é muito mais simples. A partir da lista de precedências, torna-se possível elaborar um algoritmo para o cálculo de seqüências.

Etapas do Método

A primeira etapa envolve a construção do grafo associado ao produto.

Neste processo, de modo geral as ligações são determinadas com razoável facilidade se a fixação das peças é bem definida (contato físico direto entre as peças, ligação envolvendo somente duas peças). A aparente simplicidade deste conceito pode, porém, provocar erros no levantamento de ligações ou, pelo menos, um aumento desnecessário do seu número, aumentando consideravelmente o trabalho de cálculo das seqüências.

O levantamento das ligações existentes é feito através do manual técnico, ou diretamente a partir da “imagem explodida” do produto. Em qualquer dos casos, podemos

nos deparar com ligações mal definidas: ligações indiretas (feitas através de outras peças), inúmeras peças dividindo a mesma fixação, ou ligações móveis. O conceito é flexível, dando liberdade de interpretação (isto é, admite-se incluir ou eliminar ligações) e, quando prudentemente explorado, pode colaborar com a melhoria do processo de cálculo das seqüências, eliminando ligações que não representam uma etapa de trabalho, existindo apenas em função do contato físico.

Um erro por falta de ligações acarretará número menor de seqüências válidas, pois as ligações não computadas deixarão de ser consideradas para a montagem. No caso de se considerarem ligações não existentes, seqüências espúrias serão geradas, aparecendo operações irreais.

Consideramos como componente elementar uma peça única ou um conjunto de peças que, durante toda a montagem, permaneça inalterável. É o caso em que esse conjunto é montado em outro departamento, ou mesmo adquirido como produto acabado, constituindo para a atual montagem um bloco único que pode ser considerado como peça única. Ele será ligado a outra peça, ou a uma submontagem, dependendo da ordem da seqüência. O produto, ao ser elaborado, admite pelo menos uma seqüência de montagem, correspondente à existência de uma cadeia que una todos os vértices, sem sua repetição e, pelo menos, uma tarefa inicial que não impeça a realização das demais. O grafo pode ser uma árvore se envolver uma e somente uma ligação por etapa, caso contrário, haverá ciclos. Nestes casos, a montagem apresenta algumas fases onde mais de uma ligação é executada.

A confecção da lista de precedências é um ponto importante para o cálculo das seqüências de montagem, pois a sua composição de

forma compacta e precisa agiliza a utilização do algoritmo.

As simplificações adotadas, no método de Bourjault, por Fazio e Whiney são obtidas a partir do questionário elaborado para cada ligação que permite gerar a lista de precedências. A lista de precedências, imposta pela montagem, é o conjunto de restrições, isto é, nele a execução de uma ligação precederá outra, sempre que a ordem inversa torne a montagem irrealizável. Para cada ligação L_i , $1 < i < I$, as seguintes questões são formuladas:

Q₁) Quais ligações devem ser realizadas antes de L_i ?

As questões do tipo Q₁ identificam as ligações L_j que são executadas antes da execução de L_i . As ligações que precedem L_i são aquelas que teriam sua execução impedida após feita L_i .

Q₂) Quais ligações devem ser realizadas após a execução de L_i ?

As ligações do tipo Q₂ identificam as ligações L_j que são executadas após a execução de L_i . As ligações que sucedem L_i são aquelas que impedem a execução de L_i .

As questões do tipo Q₁, cuja resposta for “nenhuma”, não geram precedência. Caso contrário, a precedência existe e é representada na forma:

$$L_j \text{ ou } L_k \longrightarrow L_i$$

As questões do tipo Q₂, cuja resposta for “nenhuma”, não geram precedência. Caso contrário, a precedência existe e é representada na forma:

$$L_i \longrightarrow L_s \text{ e } L_t$$

A confecção da lista de precedências é dependente do grafo representativo de montagem. Os ciclos existentes e as ligações que eles determinam devem ser consideradas para que não se gerem precedências contraditórias. É necessário que no estudo das precedências fique assegurado que a realização de mais de uma ligação numa mesma etapa não gere impossibilidades de montagem.

Ao se fazer a lista de precedências questionando cada ligação L_i com as perguntas da forma Q₁ e Q₂, é preciso que se tenha a visão completa da montagem, para evitar que, a partir de certo estágio, ela fique impossibilitada de prosseguir, isto é, torna-se necessário que se tenha uma visão completa da montagem para saber se a ligação questionada impede a execução de qualquer outra.

As seqüências de montagem consideradas válidas neste trabalho obedecem a regras impostas pelas restrições de montagem do próximo produto, isto é, se uma ligação executada impede a realização das demais ligações, existirão restrições relativas a estas ligações na lista de precedências.

O algoritmo foi elaborado a partir da visualização do produto a ser montado através do grafo. Os vértices representam as peças por montar, e as arestas, as ligações a serem executadas. A execução de uma ligação indica a união de duas peças; a aresta relativa a esta ligação já não existe, pois as duas peças são agora uma submontagem correspondente no grafo a um único vértice. O grafo resultante possui, pelo menos, uma aresta e um vértice a menos.

A primeira ligação da seqüência válida é escolhida entre as que não impedem ligações subseqüentes. Pode existir mais de uma ligação nesta situação, o que indica que haverá seqüências começadas por todas estas liga-

ções. Estas ligações formam a base do conjunto de soluções.

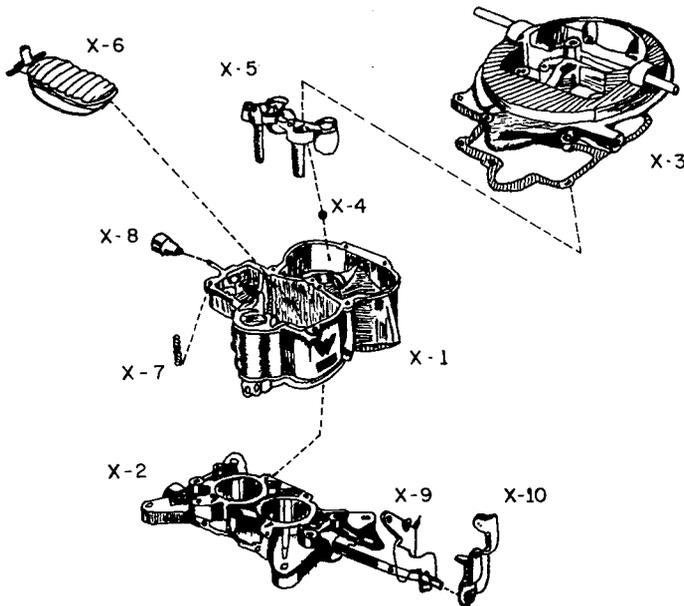
Como foi explicado anteriormente, a composição de novas seqüências de montagem é feita do final para o princípio. Cada grafo compactado representa, através dos vértices compactados, as peças da submontagem já executada. Os demais vértices e arestas definem o trabalho a ser realizado, isto é, as ligações que precisam ainda ser feitas com a respectiva colocação de peças até que, no final do processo, obtenhamos um grafo com apenas um vértice que representa o produto acabado.

As ligações seguintes à primeira são obtidas no grafo somente entre as arestas adjacentes que compartilham o vértice compactado. Entre estas será executada uma ligação que não possua precedências.

Durante o processo de montagem, o grafo é reduzido a um só ponto tantas vezes quantas forem as seqüências válidas calculadas, retornando à situação inicial, com todos os vértices e arestas, só quando é trocada a ligação inicial. É possível decompor o problema geral em problemas menores, fazendo-se o cálculo das seqüências válidas por etapas, isto é, se existirem k ligações possíveis de iniciar o processo de montagem, calculam-se as seqüências válidas iniciadas com cada uma delas.

Exemplo de uma Aplicação Prática

O exemplo considerado representa um problema de montagem de um carburador. Os elementos usados para fixação das ligações não foram considerados como componentes elementares, logo não foram representados por vértices no grafo (Fig. 1)



Foram considerados $n = 10$ componentes elementares (peças) e $l = 12$ ligações (logo, $l > n - 1$).

A cuba (vértice X_1) é uma peça única indivisível que não apresenta dúvidas por ser um componente elementar. Neste mesmo caso se encontram as peças esfera (X_4); mola (X_7) e estilete (X_8).

A tampa (X_9) já necessita de definições sobre o que será o componente elementar. É composta de várias partes, porém sua montagem não é executada com as demais peças, pois para sua confecção são necessárias técnicas especiais não disponíveis no local de montagem. É adquirida praticamente pronta. Optamos por considerar toda parte adquirida como componente elementar. Outras peças que estão neste caso são: suporte (X_5), boia (X_6), braço do acelerador (X_9) e braço do injetor (X_{10}). Estas peças necessitam de montagens especiais que não comportariam na montagem geral, por serem detalhadas demais.

As ligações fáceis de definir são as L_1, L_2 (após a definição do componente elementar), L_3 (idem), $L_4, L_5, L_6, L_9, L_{10}, L_{11}$ e L_{12} . Por outro lado, a L_7 é uma ligação feita indiretamente através da peça X_3 (tampa). Consideramos a L_7 executada quando a cuba é colocada na base, porém sua fixação só é feita quando se prende a tampa. Qualquer seqüência executada na horizontal, em que se coloca primeiro a base e depois a cuba (utilizando a gravidade) é boa prática: as demais seriam ineficientes. A L_8 é também uma ligação indireta, pois não há contato físico da tampa (X_9) com a base (X_2). O contato é feito através do parafuso que fixa ambas. Existe ligação entre o braço do injetor e o braço do acelerador mas não foi considerada devido ser a mesma resultante de um contato físico que não depende de processo de fixação.

Após a definição das peças, ligações e grafo correspondente, foi aplicado para cada ligação L_i um questionário com perguntas dos tipos Q_1 e Q_2 . Estas questões são assim formuladas:

Questionário com perguntas do tipo Q_1 :

Q_1 - Que ligações devem ser (obrigatoriamente) feitas antes de se fazer L_i ?

$i = 1$ Nenhuma ligação deve ser feita antes de L_1

$i = 2$ Antes de unir as peças X_5 e X_{11} , isto é, executar a ligação L_2 , a peça X_4 já deve estar unida a X_1 . A ligação L_1 precede a L_2 .

1 ----> 2

$i = 3$ Nenhuma ligação precisa ser feita antes de L_3 .

$i = 4$ Antes de colocar a peça X_7 em X_1 , é necessário que a peça X_6 esteja em X_1 . A ligação L_3 deve ser executada antes de L_4 .

3 ----> 4

$i = 5$ A colocação da peça X_8 em X_1 impede a colocação da peça X_6 em X_1 . A ligação 3 deve ser efetuada antes da ligação L_5 .

3 ----> 5

$i = 6$ Para a peça X_1 ser ligada a peça X_2 , todas as peças internas devem estar colocadas. L_1 e L_2 e L_3 e L_4 devem estar prontas.

1 e 2 e 3 e 4 ----> 6 como

1 ----> 2 e 3 ----> 4

2 e 4 ----> 6

$i = 7$ Nenhuma ligação precisa ser feita antes de L_7 .

$i = 8$ Colocar a peça X_2 na peça X_3 impede a colocação da peça X_1 . É necessário que L_6 e L_7 já estejam prontas.

6 e 7 ----> 8

$i = 9$ Nenhuma ligação precisa ser feita antes de L_9 .

$i = 10$ A peça X_{10} ligada a X_2 impede a colocação da peça X_9 . A ligação L_9 deve estar pronta.

9----> 10

$i = 11$ A peça X_9 ligada a X_3 impede a colocação da peça X_2 . As ligações L_7 , L_8 e L_9 devem estar prontas.

7 e 8 e 9 ----> 11

$i = 12$ Colocar a peça X_{10} na X_3 impede a colocação da peça X_2 e X_9 . As ligações L_7 , L_9 , L_{10} e L_{11} devem estar prontas.

7 e 9 e 10 e 11 ----> 12

Questionário com perguntas do tipo Q_2

Q_2 - Quais ligações devem ser deixadas para fazer depois de L_i ?

$i = 1$ As peças X_3 e X_5 colocadas na X_1 impedem a colocação de X_4 . As ligações L_2 e L_6 devem ser executadas após a ligação L_1 .

1 ----> 2 ; 1 ----> 6 como 2 ----> 6

1 ----> 2

$i = 2$ A peça X_3 colocada na X_1 impede a

colocação da peça X_5 na peça X_1 . A ligação L_6 deve ser executada após L_2 .

2 ----> 6

$i = 3$ As peças X_3 , X_7 e X_8 colocadas na X_1 impedem a colocação da peça X_6 na X_1 . As ligações L_4 , L_5 e L_6 devem ser deixadas para execução após a ligação L_3 .

3 ----> 4 ; 3 ----> 5 ; 3 ----> 6

como 4 ----> 6 resulta que

3 ----> 4

3 ----> 5

$i = 4$ A colocação da peça X_3 em X_1 impede a colocação da peça X_7 em X_1 . A ligação L_6 deve ser feita após a ligação L_4 .

4 ----> 6

$i = 5$ Nenhuma ligação deve ser executada após a ligação L_5 .

$i = 6$ A ligação das peças X_1 e X_3 fica impedida se as peças X_2 e X_3 já estiverem unidas. A ligação L_8 deve ser executada após a ligação L_6 .

6 ----> 8

$i = 7$ A ligação das peças X_1 e X_2 fica impedida se as peças X_2 e X_3 já estiverem unidas, assim como X_9 e X_3 . As ligações L_8 , L_{11} e L_{12} devem ser executadas após L_7 .

7 ----> 8

7 ----> 11

7 ----> 12

$i = 8$ A colocação da peça X_9 na X_3 impede a colocação da peça X_2 . A ligação L_{11} deve ser executada após L_8 .

8 -----> 11

$i = 9$ A ligação das peças X_2 a X_{10} , assim como a ligação das peças X_3 a X_9 e X_3 a X_{10} , impedem a ligação L_9 . As ligações L_{10} , L_{11} e L_{12} devem ser executadas após a ligação L_9 .

9 ----->10

9 ----->11

9 ----->12

$i = 10$ A ligação das peças X_3 e X_{10} impedem a ligação das peças X_2 e X_{10} . A ligação L_{12} deve ser executada após a ligação L_{10} .

10 ----->12

$i = 11$ A colocação da peça X_{10} impede a colocação da peça X_9 . A ligação L_{12} deve ser executada após a L_{11} .

11 ----->12

$i = 12$ Nenhuma ligação deve ser feita após a ligação L_{12} .

Lista de precedências:

1 ----->2

3 ----->4

3 ----->5

2 e 4 ----->6

6 e 7 ----->8

9 ----->10

7 e 8 e 9 ----->11

7 e 9 e 10 e 11 ----->12

Pela lista de precedências obtida, verifica-se que as ligações que permitem começar a montagem são as ligações L_1 , L_3 , L_7 e L_9 . As que serão executadas no final da montagem são as ligações L_5 e L_{12} .

Pode ocorrer durante uma montagem que determinadas ligações, isoladamente, não impeçam uma outra ligação mas que em conjunto o façam, o que geraria sentenças da forma:

A ----->B e C

A sentença lógica que representa esta precedência não se enquadra nas sentenças lógicas utilizadas nesta técnica. Para evitar usos indevidos, sempre que restrições deste tipo surgirem, é boa prática impor restrições que anulem sua execução. Neste caso, pode-se impor que L_A seja executada antes de L_B e L_C ou entre ambas.

Com esta lista de precedências utilizamos o algoritmo programado e calculamos 2392 seqüências válidas de montagem.

Após a obtenção deste total, é possível restringir as seqüências (por exemplo, por algum detalhe técnico) às que se iniciem por uma peça dada. Para poder avaliar a influência desse tipo de restrição, apresentamos (itens 1 a 4 abaixo) a subdivisão das 2392 seqüências em grupos nos quais a peça inicial é sempre a mesma. Nesta contagem, considera-se que a montagem possa ser feita com as peças em qualquer posição. Isto, no entanto, pode gerar problemas práticos como p. ex., problemas na

fixação dos componentes. Por essa razão, nos itens seguintes nos restringimos a seqüências organizadas de tal forma que a montagem seria executada sobre uma mesa (na horizontal), o que impede a realização de seqüências ao inverso, as ligações sendo prioritariamente executadas sobre cada peça já colocada. No item 5 a primeira peça pode ser X_1 (cuba) ou X_2 (base), o que permite o início por L_7 ou L_9 , enquanto no item 6 somente a cuba foi considerada como inicial, admitindo apenas L_7 como ligação inicial.

1) Seqüências iniciadas pela ligação L_1 ---
-->616

2) Seqüências iniciadas pela ligação L_3 ---
-->840

3) Seqüências iniciadas pela ligação L_7 ---
-->728

4) Seqüências iniciadas pela ligação L_9 ---
-->208

5) Seqüências executadas na horizontal --
--->390

6) Caso anterior, começando pela cuba ---
-->182

Observações Finais e Conclusões.

A técnica aqui discutida e exemplificada permite a geração de conjuntos de seqüências viáveis para operações de montagem automatizadas por meio de manipuladores programáveis ("robôs"). Uma estrutura do grafo é usada como suporte para o funcionamento do algoritmo gerador de seqüências, o qual utiliza ainda informações sobre a precedência das ligações a serem feitas.

O uso de restrições adicionais, como a fixação da peça inicial da montagem ou da posição em que esta deve ser feita, limita o número de seqüências viáveis e permite conclusões sobre as maiores ou menores limitações trazidas ao processo por essas restrições.

Através de valorações atribuídas aos componentes da estrutura é possível, em princípio, classificar as seqüências por valor com vistas à definição eventual de uma seqüência ótima; no entanto, uma valoração adequada a esse fim exige não apenas o conhecimento dos detalhes do equipamento a ser montado mas, ainda, dos associados ao próprio manipulador programável a ser usado, o que a torna essencialmente específica de cada montagem em particular. O desenvolvimento de regras que possibilitem a definição de valorações com um real significado prático é, portanto, um trabalho da ordem de grandeza do que serviu de base ao texto acima e se constitui em um campo aberto de pesquisa.

Referências Bibliográficas

[1] NEVINS J. L. and WHITNEY, D. *Computer-Controlled Assembly*, Scientific American, Vol. 238, nº 2, 62-74 (1978).

[2] NAVEIRO, R. M. *Automação da Produção e Projeto do Produto*, mimeo (1987).

[3] HITOMI, K. *Manufacturing Systems Engineering*, Taylor and Francis Ltda, London (1979).

[4] HOMEM DE MELO, Luiz S. and SANDERSON, Arthur C. *And/Or Graph Representation of Assembly Plans*, IEEE Tran-

sactions on Robotics and Antomation, Vol. 6, nº 2, april (1990).

[5] BOURJAULT, A. *Contribution à une Aproche Metodologique de l, Assemblage Automatisé*, Tese de doutorado, Universidade de France-Comté (1984).

[6] FAZIO, T. and WHITNEY, D. *Simplified Generation of all Mechanical Assembly Sequences*, CSDL-P-2709, The Charles Stark Draper Laboratory, Inc., Cambridge, Massachusetts, June (1986).

[7] HARARY, F. *Graph Theory*, Addison-Wesley, Reading, Mass., (1969).

[8] GUIMARÃES, G. *Seqüência Automática de Montagem*, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, (1989).

[9] BOAVENTURA, P.O. *Teoria e Modelos de Grafos*, Etidora Edgard Blucher Ltda, São Paulo (1979).